

Riske Manuel Schlüter

Zum Holismus der Überprüfbarkeit von Klimamodellen

1 Einleitung

Ich untersuche verschiedene Methoden der wissenschaftlichen Vorhersage und Erklärung des Klimas. Mein Anliegen ist es, einen Einblick in die epistemischen Fragen der Modellierung zu geben. Dabei geht es auch um die Frage, inwieweit neue wissenschaftliche Methoden, in diesem Fall Computersimulationen, neue epistemische Fragen aufwerfen können.

Eine zentrale Methode in den Klimawissenschaften ist die Konstruktion von globalen Klimamodellen, die Computersimulationen der Klimaentwicklung erlauben. Allerdings sind die Modelle aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge im globalen Klima sehr umfangreich. Deswegen stützt sich die Entwicklung nicht auf eine einzelne epistemische Quelle. Bei der Entwicklung der Modelle wird im Wesentlichen auf zwei Quellen zurückgegriffen, die ich entsprechend untersuche: Erstens theoretisches Wissen und zweitens Messdaten aus Beobachtungen. Basierend auf den beiden Quellen lassen sich solche Methoden unterscheiden, die vor allem auf theoretisches Wissen zurückgreifen, und solche, die mit empirischen Daten arbeiten.

Im Folgenden sollen die Grenzen der Überprüfbarkeit der Modelle diskutiert werden. Von Johannes Lenhard und Eric Winsberg ist argumentiert worden, dass Klimamodelle derart komplex seien, dass es nicht möglich ist, fehlerhafte Vorhersagen bestimmten Teilen der Modelle zuzuordnen. Diese spezifische These des Holismus der Überprüfung besagt, dass es nur möglich ist, Klimamodelle als Ganzes zu testen. Die Untersuchung dieser These soll der Schwerpunkt meines Beitrags sein.

Der Aufbau meines Textes ist dabei folgender: Zunächst will ich kurz allgemein einiges zur Überprüfbarkeit von Theorien und abgeleitet von Modellen sagen. Anschließend werden beide Arten von Methoden der Modellentwicklung analysiert. Und schließlich werde ich die Entwicklung von Klimamodellen als eine Kombination verschiedener Methoden anhand eines konkreten Beispiels analysieren: der Erforschung von Wolkenmodellen. Die dabei eingesetzten Methoden der Überprüfung vergleiche ich dann mit der These von Lenhard und Winsberg.

2 Überprüfbarkeit von Modellen

Die Überprüfung wissenschaftlicher Theorien anhand von Beobachtung lässt sich zum Beispiel mittels der hypothetisch-deduktiven Methode durchführen. Diese basiert auf Karl Poppers Konzept der Falsifizierbarkeit. Eine wissenschaftliche Hypothese ist falsifizierbar, wenn sich aus ihr Vorhersagen ableiten lassen, die prinzipiell mit Beobachtungen verglichen werden können. Die Hypothese wäre falsifiziert, wenn eine Vorhersage nicht eintritt. Somit besteht die hypothetisch-deduktive Methode darin, Hypothesen aufzustellen, aus diesen deduktiv Vorhersagen abzuleiten und diese Vorhersagen empirisch zu überprüfen. Wenn die Vorhersage eintritt, bezeichnet Popper dies als Bewährung der Hypothese.¹ Durch die Bedingung der Möglichkeit des Vergleichs von theoretischen Vorhersagen mit Beobachtungen enthält das Konzept der Falsifizierbarkeit ein Kriterium für die Überprüfbarkeit von Theorien.

Welche Relation haben Modelle aber zu wissenschaftlichen Hypothesen? Im Falle von Modellen kann häufig nur die Adäquatheit eines Modells und nicht dessen Wahrheit überprüft werden. Entsprechend wären zu starke Falsifikationsbedingungen unangebracht, da viele Modelle bewusst falsch sind, beziehungsweise das Zielsystem nur näherungsweise repräsentieren. Die Möglichkeit der Falsifikation von Modellen haben die Klimawissenschaftler David Randall und Bruce Wielicki folgendermaßen beschrieben:

Is a model a hypothesis? When a model is used to perform a calculation, it yields a prediction about the behavior of the atmosphere. To phrase this in

1 Vgl. Popper, Karl: *Logik der Forschung*. Tübingen 2005.

terms of hypotheses, we can say that »we hypothesize that the prediction produced through calculations with the model is true.« Atmospheric measurements can (or should) be able to falsify this hypothesis. If a prediction produced by a model is shown to be in conflict with measurements, then the model itself can be said to have been falsified.²

Die Autoren argumentieren, dass sich aus einem Modell bestimmte Vorhersagen ableiten lassen. Wenn diese Vorhersagen dann nicht eintreten, ist das Modell im klassischen Sinne falsifiziert, weil eine abgeleitete Vorhersage nicht eingetreten ist. Randall und Wielicki beschreiben eine Hypothese, die besagt, dass die Modellkalkulationen eintreffen. Im hypothetisch-deduktiven Modell wird klassischerweise die Theorie selbst als Hypothese bezeichnet, während hier der Vorschlag gemacht wird, eine Hypothese über die Modellvorhersagen zu überprüfen.

Diese Art von Hypothesen lässt sich aus zwei Gründen aber nicht direkt sinnvoll anwenden. Erstens sind wissenschaftliche Modelle in einem strengen Sinne falsch. In der Konstruktion werden idealisierende Annahmen getroffen, sodass zu erwarten ist, dass die Vorhersagen nicht exakt den Beobachtungen entsprechen werden. Zweitens weichen die in Computersimulationen verwendeten numerische Lösungen von exakten Lösungen ab.

Beide Probleme lassen sich in der Form handhaben, dass die Abweichungen von der Realität in der Hypothese berücksichtigt werden. Man könnte etwa formulieren: »Wir stellen die Hypothese auf, dass die Vorhersagen durch Modellkalkulationen ohne zu große Abweichungen richtig sind.« Allerdings fehlt dieser Formulierung das strenge Kriterium dafür, wann ein Modell falsch ist. Es müsste im konkreten Fall jeweils geklärt werden, in welchem Ausmaß man bereit ist, Abweichungen zu tolerieren. Mit dieser Konkretisierung der Falsifikationsbedingungen können auch im strengen Sinne falsche Modelle darauf überprüft werden, ob sie im beabsichtigten Rahmen korrekte Ergebnisse liefern. Die genaue Formulierung einer solchen Hypothese sollte dabei die Absicht eines Modells berücksichtigen und lässt sich über Wahrscheinlichkeitsabschätzungen

2 Randall, David und Wielicki, Bruce: *Measurements, models, and hypotheses in the atmospheric sciences*. Bulletin of the American Meteorological Society, 78 (1997). S. 399-406. Hier: S. 402f.

realisieren.³ Konkret heißt das für die Überprüfung, dass klar sein muss, welche Teile des Modells referieren und welche Übereinstimmung erwartet wird.

3 Methoden der Modellentwicklung

Aktuelle Klimamodelle versuchen, die Entwicklung des Klimas anhand von Simulationen der Entwicklung der physikalischen Größen nachzubilden. Eine zentrale Rolle zur Bestimmung geeigneter Simulationen nehmen Gleichungen ein, die die Dynamik der Atmosphäre mit den Größen *Temperatur*, *Druck* und *Anteil von Wasserdampf* beschreiben. Allerdings sind die entsprechenden Gleichungen zur Berechnung der Atmosphäre nicht analytisch lösbar. Aus diesem Grund wird mit numerischen Verfahren gearbeitet. Für solch numerische Lösungen wird die Atmosphäre als ein Gittermodell repräsentiert. Dabei sind jedem Gittersegment Werte für physikalische Größen zugeordnet.

Bei heutigen Modellen beträgt die Auflösung typischerweise um die 100 Kilometer.⁴ Es gibt aber Prozesse auf kleinerer Skala als die Auflösung der Modelle. Solch kleinerskalige Prozesse sind, da kleiner als die Auflösung, nicht-räumlich zu modellieren. Das entsprechende Verfahren nennt man parametrische Repräsentation oder Parametrisierung. Parametrisierungen sind in der Regel Gleichungen, die den Einfluss der kleinerskaligen Prozesse auf direkt im Gittermodell repräsentierte Größen beschreiben.⁵

Die mathematischen Modelle zur Simulation des Klimas enthalten Idealisierungen und Näherungen. Die numerischen Lösungen sind nur Näherungen an ideale Lösungen der Differentialgleichungen. Es gibt zwei verschiedene Arten

3 Für konkrete Falsifikation sollte auch berücksichtigt werden, dass Beobachtungsdaten nicht perfekt sind, vgl. zum Beispiel Lloyd, Elisabeth: *The role of »complex« empiricism in the debates about satellite data and climate models*. *Studies in History and Philosophy of Science*, 43 (2012). S. 390-401.

4 Vgl. Flato, Gregory; Marotzke, Jochem; Abiodun, Babatunde; Braconnot, Pascale; Chou, Sin Chan; Collins, William; Cox, Peter; Driouech, Fatima; Emori, Seita; Eyring, Veronika; Forest, Chris; Gleckler, Peter; Gulyardi, Eric; Jakob, Christian; Kattsov, Vladimir; Reason, Chris und Rummukainen, Markku: *Evaluation of climate models*. In: Stocker, Thomas; Qin, Dahe; Plattner, Gian-Kasper; Tignor, Melinda; Allen, Simon; Boschung, Judith; Nauels, Alexander; Xia, Yu; Bex, Vincent und Midgley, Pauline (Hrsg.): *Climate change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge 2013. S. 741-866. Hier: S. 144.

5 Vgl. Trenberth, Kevin (Hrsg.): *Climate system modeling*. Cambridge 1992. Insbesondere Kapitel 1 und 9.

von Näherungen: mathematische und konzeptuelle. Mathematische Näherungen werden vorgenommen, um die mathematischen Gleichungen zu lösen. Konzeptuelle Näherungen entsprechen den oben erläuterten Idealisierungen. Die Rechtfertigung von mathematischen Näherungen könne mittels mathematischer Verfahren erfolgen. Idealisierungen sollten nur in begrenztem Rahmen eine abweichende Lösung hervorrufen. Diese Abweichung müsste physikalisch gerechtfertigt werden.⁶ Die mathematischen Näherungen können Einfluss auf die Repräsentation der physikalischen Prozesse haben, weswegen auch deren Grenzen der Genauigkeit einer physikalischen Rechtfertigung bedürfen kann. Eine physikalische Begründung könnte etwa so aussehen, dass das vorhergesagte Verhalten durch das einfache Modell sich nicht mit messbarer Genauigkeit vom deidealisierten Modell unterscheidet.

In der Modellierung des Klimas wird versucht, Probleme, die sich aus der großen Auflösung ergeben, dadurch abzuschwächen, dass Prozesse auf kleinskaliger Größenordnung als Parametrisierung repräsentiert werden. Die Beschreibung eines Objekts mittels unabhängiger Variablen (den Parametern) in bestimmten Wertebereichen wird in der Mathematik als »Parametrisierung« bezeichnet.⁷ Die Verwendung des Begriffs in den Klimawissenschaften ist analog zu diesem mathematischen Begriff der »Parametrisierung«. Es wird ein Objekt, in der Regel ein Prozess, dadurch repräsentiert, dass sein Einfluss auf im Modell repräsentierte Größen beschrieben wird. Im Bericht des *International Panel on Climate Change* (IPCC)⁸ werden Parametrisierungen entsprechend als Beschreibungen von nicht direkt in der Dynamik repräsentierten Mechanismen bezeichnet. So heißt es im Bericht des IPCC von 2013: »Parameterizations are included in all model components to represent processes that cannot be explic-

6 Vgl. Petersen, Arthur: *Simulating nature. A philosophical study of computer-simulation uncertainties and their role in climate science and policy advice*. Amsterdam 2006. S. 22f.

7 Vgl. Weisstein, Eric: *Parameterization*. In: MathWorld. A Wolfram web resource. URL: <http://mathworld.wolfram.com/parameterization.html>, abgerufen am 5. Januar 2018.

8 Das IPCC ist eine große internationale Organisation, die durch die Vereinten Nationen und die Weltorganisation für Meteorologie gegründet wurde. Sie dient der Sammlung von wissenschaftlichen Informationen zum Thema des Klimawandels. Vom IPCC werden im Abstand von einigen Jahren Sachstandberichte herausgegeben. Für den aktuellen Bericht zum Stand der physikalischen Forschung vgl. Stocker, Thomas; Qin, Dahe; Plattner, Gian-Kasper; Tignor, Melinda; Allen, Simon; Boschung, Judith; Nauels, Alexander; Xia, Yu; Bex, Vincent und Midgley, Pauline (Hrsg.): *Climate change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge 2013.

itly resolved; they are evaluated both in isolation and in the context of the full model.«⁹

Parametrisierungen dienen dazu Prozesse zu repräsentieren, die etwa aufgrund der Auslösung der Modelle nicht explizit modelliert werden. Die Evaluierung der Parametrisierung hängt dabei von der Art der Parametrisierung ab. Es lassen sich verschiedene Arten von Parametrisierungen danach unterscheiden, wie die Parametrisierungen entwickelt und wie die enthaltenen Parameter bestimmt werden.¹⁰

4 Ableitung aus Theorie

Ableitung aus Theorie lässt sich am Beispiel von Parametrisierung beschreiben. Zur Ableitung einer Parametrisierung aus Theorie muss eine anwendbare Theorie des jeweiligen Prozesses verfügbar sein. Zum Beispiel können Parametrisierungen von kleinskaligen Mechanismen der Luftströmung, wie etwa Strömung von wärmerer zu kälterer Luft (sogenannte *Advektion*), aus den grundlegenden Theorien der Fluidodynamik bestimmt werden, auch wenn dies Idealisierungen beziehungsweise Näherungen beinhaltet.

Die Ableitung aus Theorie besteht aus zwei Teilen. Erstens sind Bestandteile des Systems zu identifizieren. Unabhängig von der konkreten Wahl der Bestandteile ist dafür wichtig, dass das zu untersuchende System zerlegbar ist. Es muss feststellbar sein, welche Bestandteile das System hat und es muss Wissen darüber geben, welche Bestandteile interagieren. Zweitens müssen diese Bestandteile und ihre Interaktion theoretisch beschrieben werden können. Dazu müssen die Gesetze der Interaktion bekannt sein und diese müssen sich zur Berechnung eignen, wenn ein anwendbares Modell entwickelt werden soll. Insbesondere letzterer Punkt ist in derart komplexen Modellen wie globalen Klimamodellen derzeit nicht ohne Einschränkungen zu erfüllen, sodass Idealisierungen und Näherungen vorgenommen werden.

Innerhalb der Methodik sind an zwei Stellen notwendigerweise empirische Beobachtungen vorzunehmen. Zum einen sind die Bestandteile des Systems zu

9 Flato, Gregory et al.: *Evaluation of climate models*. S. 748.

10 Die hier getroffene Unterscheidung zwischen Parametrisierungen entspricht der in Edwards, Paul: *A vast machine. Computer models, climate data, and the politics of global warming*. Cambridge 2010. S. 338.

identifizieren und zum anderen muss festgestellt werden, in welcher Relation diese zueinander stehen, damit die Gesetze angewandt werden können. Darüber hinaus dienen empirische Beobachtungen zur Prüfung, ob ein auf diese Weise entwickeltes Modell gut mit dem realen Zielsystem übereinstimmt. Doch darüber hinaus wird auch in der Modellentwicklung auf empirische Methoden zurückgegriffen, denn die bekannten Theorien sind nicht immer soweit anwendbar, um die Ableitung von Modellen zu erlauben. Es können etwa einige Einflussfaktoren auf der Ebene der gewählten Bestandteile nur schlecht verstanden sein oder auf diese Weise entwickelte Modelle können schwierig zu berechnen sein. In diesen Fällen kann es möglich sein, den Einfluss solcher Faktoren durch empirische Methoden zu bestimmen.

5 Empirische Methoden

Direkte empirische Messungen sind eine Methode, Parameter zu bestimmen. Zum Beispiel wird die Einstrahlung der Sonne als empirisch bestimmter Parameter übernommen. Das gemessene Muster der Sonneneinstrahlung wird als ein empirisch bestimmter Einfluss ins Modell übernommen, ohne dass die zugrunde liegenden Mechanismen, das heißt die Fusionsprozesse in der Sonne, repräsentiert werden. Für diese Art der Bestimmung müssen verwendete Parameter eine klare physikalische Bedeutung in dem Sinne haben, dass ein physikalischer Einfluss empirisch ermittelt werden kann. Die direkte Messbarkeit ist im Fall der Sonne möglich, da sie ein äußerer Einflussfaktor ist, der über messbare Strahlung auf die Erde einwirkt. Bei Mechanismen innerhalb der Atmosphäre ist dies weniger einfach, da hier in vielen Fällen gegenseitig beeinflussende Faktoren vorliegen.

Manche Parametrisierungen lassen sich weder anhand der Theorie noch durch direkte Messungen konstruieren. Diese Parametrisierungen können etwa dadurch entwickelt werden, dass versucht wird, sie so zu bestimmen, dass das resultierende Verhalten Beobachtungen entspricht oder das Gesamtmodell gut zu Beobachtungen passt. Dies lässt sich anhand eines Beispiels, dem Einfluss von Wolken, erläutern. Wolken hindern Sonnenlicht zum einen daran, zur Erdoberfläche zu gelangen, zum anderen hindern sie Strahlung von der Erdoberfläche daran, in den Weltraum zu gelangen. Typische Wolkenbewegungen sind kleiner als das Gitterraster. Aber die wichtigsten makroskopischen Bedingungen

für die Entstehung von Wolken sind in den Modellen repräsentiert: *Druck*, *Temperatur* und *Menge an Wasserdampf*.

Ein einfaches Beispiel, aus einem Lehrbuch zur Modellierung des Klimas,¹¹ ist folgende Gleichung zur Berechnung der Wolkenmenge (A_C). Die Gleichung wurde in den 1960er-Jahren vorgeschlagen und eignet sich auf Grund ihrer Einfachheit zur Veranschaulichung von Parametrisierungen. Die folgende lineare Funktion beschreibt A_C in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH , die vor allem von *Druck*, *Temperatur* und *Menge an Wasserdampf* abhängt:

$$A_C = a + b (RH - RH_{\text{CRIT}}),$$

mit RH_{CRIT} als kritischem Wert der relativen Luftfeuchtigkeit, bei dem es zu Kondensation kommt, sowie a und b als anpassbaren Konstanten. Um die Parametrisierung zu verwenden, sind genaue Werte festzulegen. Dabei ist zu beachten, ob den Konstanten eine klare physikalische Bedeutung zukommt. Die Bestimmung kann entweder durch direkte Messung des Einflusses von Wolken erfolgen: Zum Beispiel könnte gemessen werden, ab welchem Wert von RH es zu Kondensation kommt. Aus physikalischen Gründen sollte der Wert zumindest im Bereich zwischen 0,8 und 1 liegen. Die Anpassung kann aber auch, wie bei a und b notwendig, abhängig vom Gesamtmodell gewählt werden. Die Werte werden dann so festgelegt, dass die Ergebnisse des Gesamtmodells möglichst gut mit empirischen Daten übereinstimmen. Mittels der Abhängigkeit von RH von der Temperatur und der Menge von Wasserdampf ließe sich diese Gleichung in ein Klimamodell einarbeiten.

Was ist an dieser Art der Parametrisierung problematisch? Im Falle dieser Form der Parametrisierung werden die Wolkenparameter a und b daran angepasst, ob das Gesamtmodell ein Ergebnis erzielt, das mit vorgenommenen Messungen übereinstimmt. Dabei erfolgt ein Vergleich empirischer Daten und Simulationen mit verschiedenen Parameterwerten. Gewählte Werte hängen dann davon ab, wie die großskaligen Messungen mit dem Gesamtmodell zusammenpassen. So kann eine adäquate Wahl der Werte davon abhängen, welche Auflösung das Modell hat. Deswegen müssten solche Parameterwerte abhängig vom speziellen Modell bestimmt werden. Weder die Form der Gleichung noch die Werte der Parameter sind durch Theorie bestimmt. Im Falle einer Abweichung des Modellverhaltens von Messungen kann mittels der

11 Vgl. Kiehl, Jeffrey: *Atmospheric general circulation modeling*. In: Trenberth, Kevin (Hrsg.): *Climate system modeling*. Cambridge 1992. S. 319-370. Hier: S. 359.

Parameter das Modellverhalten im Rahmen der linearen Gleichung an Messdaten angepasst werden.¹² Da diese Anpassung sich auf das Gesamtmodell bezieht, ist die Frage, inwieweit nur das gesamte Modell überprüft werden kann. Diese eingeschränkte Überprüfbarkeit wird unter dem Begriff »Holismus« diskutiert und könnte die Entwicklung der Modelle einschränken.

6 Holismus der Überprüfbarkeit

Wenn die Überprüfung von Vorhersagen eines umfassenden *General Circulation Models* (GCM) zur Weiterentwicklung dieses genutzt werden soll, dann muss zugeordnet werden können, welche Teile eines Modells zu erfolgreichen oder fehlgeschlagenen Vorhersagen geführt haben. Die Überprüfung von Klimamodellen kann, wie oben dargestellt, mit klassischen Theorien der Überprüfung erläutert werden. Mittels der Modelle lassen sich überprüfbare Vorhersagen ableiten. Als Holismus der Überprüfung bezeichnet man dabei den Umstand, dass es nicht möglich ist, einzelne Hypothesen getrennt zu überprüfen. In der klassischen Analyse des Holismus der Duhem-Quine-These spielt dabei insbesondere die Beeinflussung von Messungen durch theoretische Hypothesen eine Rolle, die etwa dadurch entstehen, dass Hypothesen über die Funktionsweise eines Messgeräts gebildet werden.¹³

Lenhard und Winsberg haben die These formuliert, dass im Falle von Klimamodellen eine davon abweichende Form des Holismus der Überprüfung vorliege. Dieser Holismus sei spezifisch für komplexe Computersimulationen. Sie charakterisieren diesen Holismus folgendermaßen:

The holism we want to discuss is about the claim that it is impossible to tell, by any method, where to locate the sources of the failures of our models to match known data. [...] we shall not be concerned with the quality or pedigree of models of real data against which our simulation outputs are compared. We will take it for granted that, for example, our information about

12 Wenn die Modelle an Messdaten angepasst werden, können diese Messdaten nicht zur Überprüfung des Modells herangezogen werden, da nur die Anpassbarkeit des Modells gezeigt werden kann. Ein Modell könnte sich etwa so weit anpassen lassen, dass es mit einer Vielzahl verschiedener Datensätze kompatibel wäre. Dieses Problem wird in der Literatur als »Tuning« oder »Kalibrierung« bezeichnet.

13 Vgl. zum Beispiel Duhem, Pierre: *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. Leipzig 1908.

the past climate of the earth is perfectly reliable. And we will see that even when all the theoretical scaffolding on which those »data« sets stand is taken for granted, a serious kind of confirmation holism persists.¹⁴

Sie stellen die These auf, dass fehlerhafte Vorhersagen der Modelle nicht bestimmten Teilen der Modelle zugeordnet werden können. Dies ist eine Form von Holismus, da dies dazu führt, dass nur das Gesamtmodell getestet wird, aber nicht Teile des Modells. Dabei lässt sich auch voraussetzen, dass die Messdaten unabhängig von theoretischen Annahmen sind und der Holismus der Überprüfung somit nicht auch die theoretische Bestimmung von Messungen miteinbezieht. Diese Form des Holismus unterscheide sich von der allgemeinen Unterbestimmtheit von Theorien und sei eine Besonderheit von bestimmten wissenschaftlichen Modellen, unter anderem Klimamodellen. Dabei seien es bestimmte Eigenschaften der Modelle und zugehörigen Simulationen, die dazu führen, dass es nicht möglich ist, ihre Bestandteile einzeln zu testen.

Lenhard und Winsberg identifizieren zwei Umstände, die zur fehlenden Möglichkeit der Zuordnung führten. Zum ersten legen sie dar, dass die Computerprogramme der Simulationen lediglich sogenannte »fuzzy modularity« zuließen.¹⁵ Dies lässt sich anhand eines Beispiels erklären. Ein Modul eines Computerprogramms zur Klimasimulation könnte etwa der Computercode einer Wolkenparametrisierung sein, das als Eingangswerte den Verlauf der Temperatur und den Wasserdampf erhält und anschließend angepasste Ausgangswerte ausgibt. Die Abtrennung dieses Moduls ist aber schwierig, da dieses während der Anpassung auch Daten mit einem zweiten Modul, das zum Beispiel Aerosole berechnen soll, austauschen kann. Lenhard und Winsberg folgern daraus, dass die Ergebnisse eines Klimamodells deswegen nicht aus der Interaktion der Ergebnisse einzelner Module entstünden, sondern aus der komplexen Interaktion der Module.¹⁶ Als zweiten Grund identifizieren sie sogenannte »kludging«, das in der Anpassung von Modulen und ihrer Verbindung besteht, was lediglich dadurch gerechtfertigt werden kann, dass es zu einem funktionierenden Programm führt.¹⁷ Sie argumentieren, dass durch die Anpas-

14 Lenhard, Johannes und Winsberg, Eric: *Holism, entrenchment, and the future of climate model pluralism*. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 41 (2010). S. 253-262. Hier: S. 254.

15 Vgl. ebd. S. 256.

16 Vgl. ebd.

17 Vgl. ebd. S. 257.

sungen der einzelnen Module auch Einbettungen neuer verbesserter Module beeinflusst werden, da diese mit den bisherigen Anpassungen harmonisieren müssen.¹⁸

Beide Umstände führten zum Holismus. Als Beispiel für die Auswirkung des Holismus geben Lenhard und Winsberg den Vergleich verschiedener Modelle an, bei dem man nicht feststellen könne, welche Teile der verschiedenen Modelle gut funktionieren und welche für Fehler verantwortlich sind:

It is possible, of course, to test the performance of climate models under a variety of conditions. And different models perform better under certain conditions than others. But if model A performs better at making predictions on condition A*, and model B performs better under condition B*, then optimistically, one might hope that a hybrid model – one that contained some features of model A and some features of model B – would perform well under both sets of conditions.

Ideally, to answer that question, one would like to attribute the success of each of the models A and B to the success of particular ones of their submodels – or components. One might hope, for example, that a GCM that is particularly good at prediction of precipitation is one that has, in some suitably generalizable sense, a particularly good rain module. [...] The complexity of interaction between the modules of the simulation is so severe that it becomes impossible to independently assess the merits or shortcomings of each submodel. One cannot trace back the effects of assumptions because the tracks get covered during the kludging together of complex interactions.¹⁹

Lenhard und Winsberg stellen hier die Idee dar, durch Vergleich von verschiedenen Modellen herauszufinden, in welchen Bereichen die Modelle jeweils gute Ergebnisse produzieren, zum Beispiel eine gute Repräsentation der Niederschlagsmenge. Die Hoffnung eines solchen Vergleichs wäre, dadurch herauszufinden, welche Module der Modelle gut funktionieren, und anschließend die besten Module zu kombinieren und ein neues Modell daraus zu entwickeln, das die Vorzüge der einzelnen Modelle verbindet. Dies sei aber nicht möglich, da die Module die beiden oben beschriebenen Charakteristika aufweisen, das

18 Vgl. ebd.

19 Ebd. S. 257f.

heißt stark interagieren und durch »kludging« verbunden sind. Die Überprüfbarkeit der Bestandteile wird hiermit im Rahmen der Überprüfung ihres Einflusses auf das Gesamtmodell formuliert. Die Folgen des Holismus zeigten sich auch in Vergleichsstudien verschiedener Klimamodelle. Bei diesen Vergleichsstudien werden verschiedene Modelle unter bestimmten Randbedingungen für Simulationen verwendet. Das Ergebnis dieser Studien ist, dass kein Modell in allen Hinsichten am besten abschneidet. Außerdem ist es nicht gelungen die Erfolge oder Misserfolge bestimmten Teilen der Modelle zuzuordnen, was Lenhard und Winsberg als Bestätigung für ihre These des Holismus der Überprüfung auffassen.²⁰

Diese Form des Holismus führt aber nicht dazu, dass nur die Überprüfung des Gesamtmodells möglich ist.²¹ Dies werde ich anhand einer Analyse der Entwicklung der Wolkenbeschreibung zeigen.

7 Entwicklung von Modulen in der Forschungspraxis am Beispiel der Wolkenmodellierung

Die Kombination theoretischer und empirischer Methoden findet sich in der Entwicklung globaler Klimamodelle. Die Entwicklung ist entsprechend komplex und besteht aufgrund der vielen zu repräsentierenden Faktoren aus vielen Komponenten. Aus diesem Grund wird sich die Analyse in diesem Kapitel auf einen bestimmten Teil der Entwicklung von Modellen konzentrieren. Dieser Teil ist die Weiterentwicklung von Parametrisierungen.

Ich stütze mich hier auf die *GEWEX Cloud System Study* (GCSS) von Randall und Kollegen aus dem Jahr 2003. Darin legen die Autorinnen und Autoren dar, wie Parametrisierungen, speziell von Wolken, durch Berücksichtigung empirischer Daten weiterentwickelt werden könnten. Im Fall dieser Parametri-

20 Vgl. ebd. S. 259.

21 Lenhard und Winsberg erwähnen als Einschränkung ihrer These sogenannte »sensitivity studies«, bei denen Simulationen mit verschiedenen Parameterwerten innerhalb von plausiblen Grenzen durchgeführt werden, wodurch sich abschätzen lässt, inwieweit bestimmte Unsicherheiten der Parameterwerte die Simulationsergebnisse beeinflussen. Damit ließe sich aber im Beispiel von Wolkendynamik nur abschätzen, »that difference in cloud dynamics can create difference in outcome as big as the observed ones [...]« (Ebd. S. 260) Die im Folgenden ausgeführten Studien gehen über diese mögliche Zuordnung des Fehlers hinaus.

sierungen zeigt sich das Zusammenspiel verschiedener Methoden, mittels derer an Klimamodellen gearbeitet wird. Das Zusammenspiel findet sich zum einen in der Bestimmung der Parametrisierungen und zum anderen in der Integration von Parametrisierungen in das Gesamtmodell.

Randall und Kollegen beschreiben verschiedene Wege, mit denen die empirischen Messungen in der Entwicklung von GCMs berücksichtigt werden können. Klassische Parametrisierungen beschreiben den entsprechenden Einfluss durch die den Gittersegmenten zugeordneten Variablen. Eine Methode der Überprüfung von Parametrisierungen ist, diese als Modell des Wolkenverhaltens einer einzelnen Spalte eines globalen GCM-Gitterrasters zu benutzen. Diese Modelle einer Spalte nennt man *Single Column Model* (SCM). Ein solches Modell lässt sich empirisch überprüfen, indem als Randbedingungen der Simulation reale Messdaten verwendet werden. Die Ergebnisse der Simulation lassen sich anschließend mit zusätzlich gemessenen Größen, wie dem Temperaturprofil und der Wolkendichte, vergleichen. Somit wird eine empirische Überprüfung der Wolkenparametrisierung unabhängig vom restlichen Modell durchgeführt. Eine Anpassung könnte dann an konkreten Messdaten eines Einflussfaktors vorgenommen werden und nicht anhand des großskaligen Verhaltens des gesamten Klimamodells.²²

Im Fall dieser Methode wird versucht, die Parametrisierung als eigenständiges Modell zu überprüfen. Damit lassen sich Änderungen an Parametrisierungen besser abschätzen und die Leistungsfähigkeiten dieses einen Bestandteiles eines GCMs überprüfen. Allerdings können dabei keine Effekte berücksichtigt werden, die dadurch entstehen, dass Wolken auf andere Prozesse einwirken, die dann wiederum Wolken verändern. So können mit dieser Methode keine Effekte abgeschätzt werden, die zum Beispiel durch die Interaktion von Wolken mit festen Aerosolen entstehen. Die Prozesse, die zu Rückkopplung führen können, sind in den SCMs schlicht nicht repräsentiert.

Neben SCMs werden Modelle entwickelt, welche die Bewegung von Wolken höher als diese auflösen. Solche Modelle werden als *Cloud-System Resolving Model* (CSRMs) bezeichnet. Auf Basis dieser Modelle durchgeführte Simulatio-

22 Vgl. Randall, David; Krueger, Steven; Bretherton, Christopher; Curry, Judith; Duynkerke, Peter; Moncrieff, Mitchell; Ryan, Brian; Starr, David; Miller, Martin; Rossow, William; Tselioudis, George und Wielicki, Bruce: *Confronting models with data. The GEWEX cloud systems study*. Bulletin of the American Meteorological Society, 84 (2003). S. 455-469.

nen können wiederum mit empirischen Messungen verglichen werden und zum Vergleich mit den großskaligen Parametrisierungen eines GCM dienen. Die detaillierteren Modelle können dabei an einer größeren Vielfalt an empirischen Daten getestet werden, da sie genauere Vorhersagen machen. Im Fall dieser zweiten Methode muss ein höher auflösendes Modell der Wolken entwickelt werden, wobei wieder die Schwierigkeiten der Modellierung auftauchen, da auch hier die Auflösung begrenzt ist und diesmal mikrophysikalische Mechanismen parametrisiert werden müssen. Die kleinskaligen Modelle werden entsprechend auch durch eine Kombination verschiedenartiger Methoden entwickelt, wobei hier Parametrisierungen etwa von molekularen Einflüssen vorgenommen werden. Die Verhältnisse der verschiedenen Modellarten sind dabei folgende:

- Es werden empirische Daten verwendet, um SCMs und CSRMs zu evaluieren.
- CSRMs werden verwendet um SCMs zu evaluieren.
- SCMs werden als Wolkenmodul in einem GCM verwendet.²³

Die Evaluation funktioniert dabei in der Form, dass empirische Daten als Randbedingungen der Modelle dienen, deren Ergebnisse dann wiederum mit anderen erhobenen Daten verglichen werden. Die Überprüfung von Parametrisierungen alleine kann aber nicht zu besseren Ergebnissen führen, sondern kann nur dazu dienen, die Schwächen beurteilen zu können. Je detaillierter die Modelle sind, umso mehr ist es möglich, Vergleiche mit empirischen Messungen vorzunehmen. Inwieweit lassen sich mittels solcher Methoden Modellbestandteile überprüfen? Um diese Frage zu beantworten, werde ich nun das Verhältnis der verwendeten Methoden untersuchen.

8 Kombination empirischer und theoretischer Methoden

Die Kombination aus verschiedenen Methoden wird verwendet, um Modelle zu entwickeln und damit Vorhersagen und Erklärungen über das Klima zu ermöglichen. Nun soll die Frage geklärt werden, in welcher Form die verschiedenen

23 Vgl. ebd. S. 467. Daneben ist es in modernen GCMs auch möglich, CSRMs als Wolkenmodul einzubauen, im Rahmen von sogenannter Superparametrisierung. Die globalen Variablen werden dann einem Untermodul übergeben, das auf deren Basis kleinskalige Berechnungen durchführt und anschließend wieder globale Variablen ausgibt.

Methoden dazu beitragen, dass eine Überprüfung möglich ist. Im Vorangegangenen wurde dargelegt, wie die Modellierung und Überprüfung einer speziellen Parametrisierung in der Forschung aussieht.

Die kleinskaligen Wolkenmodelle sind nicht allein anhand von Beobachtungsdaten bestimmt, sondern spezielle Beobachtungsdaten sollen dazu dienen, kleinskalige Modelle zu testen, die wiederum auf Theorie, Empirie (teilweise Kalibrierung) und auch Ad-hoc-Annahmen basieren. Die Entwicklung von Parametrisierung beinhaltet dabei die Theoriebildung, da für die kleinskaligen Prozesse keine Theorie vorliegt. Insbesondere im Bereich der Abhängigkeit physikalischer Größen über verschiedene Größenskalen hinweg ist es nicht möglich, auf etablierte Theorie zurückzugreifen. Stattdessen ist es ein Ziel der Forschung, Theorie zu liefern, um numerische Modelle zu verbessern, auch wenn in der konkreten Einbettung in ein Modell auf Kalibrierung zurückgegriffen werden muss.²⁴

Theoretische und empirische Methoden sind dabei keine zwei vollständig unabhängigen Methoden, die man zur Entwicklung zuverlässiger Modelle nutzen könnte. Die theoretische Methode besteht nicht aus dem schematischen Bild, dass man über etablierte physikalische Theorien hat, die zur Entwicklung des gesamten Modells ausreichen. Beobachtungen hätten in diesem Fall zum einen den Zweck, die Anwendung der Theorie zu prüfen, und zum anderen den Zweck, durch die Theorie offene Parameter zu bestimmen. Im Fall der Entwicklung von Wolkenparametrisierungen ist zu sehen, dass Beobachtungen stärker in die Entwicklung der globalen Modelle eingebunden sind. Durch die getrennte Beurteilung der Parametrisierung als Modell, die dann für das großskalige Modell als Theorie genutzt werden, werden direkte Beobachtungen verwendet, um zu erkennen, welche Schwächen verwendete Parametrisierungen haben, und um und diese gegebenenfalls zu kalibrieren. Auch wenn diese Theorie nicht umfassend bestätigt ist, wird ein großskaliges Modell durch ein kleinskaliges erklärt. Im Falle von wolkenauflösenden Modellen findet keine vollständige Ableitung allein aus etablierten physikalischen Gesetzen statt. Es wird damit kein theoretischer Anspruch erfüllt, der eine Ableitung nur aus etablierten

24 Nach Akio Arakawa ist die Verbesserung von numerischen Modellen nicht der einzige Nutzen von verbesserten Parametrisierungen. Sie würden auch theoretische Beschreibungen der Abhängigkeit von großskaligen und kleinskaligen Prozessen enthalten und hätten damit einen eigenständigen theoretischen Wert. (Vgl. Arakawa, Akio: *The cumulus parameterization problem. Past, present, and future*. Journal of Climate, 17 (2004). S. 2493-2525. Hier: S. 2519.)

physikalischen Theorien fordern würde. Hier werden die mikrophysikalischen Abläufe in Wolken nicht aufgelöst und entsprechend parametrisiert. Allerdings folgt daraus nicht, dass keine theoretische Methode angewandt wird. Ein entscheidender Punkt der theoretischen Methode ist die Wahl der Basistheorie, von der ausgehend die Methode angewandt wird. In diesem Fall sind die kleinskaligen Modelle die Basis der theoretischen Methode. Die kleinskaligen Modelle werden dazu verwendet, das Gesamtmodell zu verbessern, wobei bei der Entwicklung der kleinskaligen Modelle auf theoretisches Wissen zurückgegriffen wird und die entwickelten Modelle werden dann empirisch überprüft.

Manche Formen der empirischen Prüfung hängen davon ab, dass die Modelle durch Theorie bestimmt sind. Da die kleinskaligen Modelle entwickelt werden, die in großem Maße auf bekannten Theorien der Bewegung von Wolken basieren, sind diese geeignet, Ergebnisse zu produzieren, die mit speziellen Messungen der Wolkenbewegung verglichen werden können. Anhand der beiden Parametrisierungen lässt sich sehen, dass es in der Forschung verschiedene Wege gibt, einen Prozess, wie die Konvektion in einem GCM zu repräsentieren.

Die Weiterentwicklung von Parametrisierungen auf Basis der Abweichung von den detaillierten empirischen Daten erfordert dabei passende theoretische Ideen, die wiederum getestet werden müssen. Im Falle klassischer Parametrisierung, die den Einfluss der kleinskaligen Größen durch die großskaligen ausdrückt, wird versucht, den kleinskaligen Prozess durch einen Ersatz im Modell zu repräsentieren.²⁵ Die zu klärende Frage ist, wie die kleinskaligen Prozesse die großskaligen beeinflussen. Die Klärung dieser Frage besteht aus der Entwicklung von zugehörigen theoretischen Ideen und empirischen Überprüfungen dieser, wobei die Anwendung theoretischer Ideen auch Kalibrierung beinhalten kann. Entscheidend ist dabei, wie groß der Effekt der Kalibrierung ist.

Für die Überprüfbarkeit der Modelle leistet die theoretische Methode einen Beitrag, indem sie ermöglicht, dass bestimmte empirische Messungen von Teilaspekten der Modelle möglich sind. Es lassen sich Modellbestandteile überprüfen. Dies erfordert den Test alternativer theoretischer Ideen oder Hypothesen, die wiederum nicht allein durch teilweise vorhandene Mikrotheorie bestimmt

25 Eine alternative Möglichkeit der Verbesserung sind die in Fußnote 23 angesprochenen Superparametrisierungen, durch die ein GCM mehr Prozesse auflösen kann. Allerdings erhöht dies die Kosten der Berechnung.

ist. Diese theoretischen Ideen müssen zwar empirischen Prüfungen des Gesamtmodells standhalten, können aber auch getrennt überprüft werden.²⁶

9 Zurück zum Holismus der Überprüfbarkeit

Die Überprüfung von Aspekten lässt sich gut anhand des Beispiels der empirischen Forschung an Wolkenparametrisierungen darstellen. Im Falle der Forschung von Randall und Kollegen an Wolkenparametrisierungen werden Bestandteile des GCM als eigenes Modell abgetrennt und dann für empirisch überprüfbare Vorhersagen verwendet. Dies ist möglich, da die Parametrisierungen physikalische Prozesse repräsentieren, weswegen die Ergebnisse der Parametrisierung mit messbaren Größen verglichen werden können. Diese Absonderung von Aspekten im begrenzten Rahmen ermöglicht die getrennte Überprüfung einzelner Parametrisierungen. Dies ist das besondere an (teilweise) theoretisch konstruierten Modellen. Durch den teilweise theoretischen Aufbau können Teile physikalisch interpretiert werden, was entsprechende Messungen ermöglicht. Im Unterschied zu den von Lenhard und Winsberg dargestellten Vergleichsstudien werden hierbei aber einzelne Parametrisierungen untersucht und keine globalen Gesamtmodelle verglichen. Damit sind diese Studien auf den einzelnen untersuchten Einflussfaktor beschränkt.

Diese abgetrennte Überprüfbarkeit ist nicht dazu geeignet, den Holismus vollständig aufzuheben. Die Komplexität der Modelle führt dazu, dass Interaktionen der einzelnen Bestandteile und deren Auswirkungen tatsächlich holistisch zu überprüfen sind. Die Schwierigkeiten ergeben sich dabei insbesondere in der speziellen Umsetzung in Computerprogramme und den komplexen kausalen Zusammenhängen. Diese Schwierigkeiten sind etwa die von Lenhard und Winsberg angesprochenen »fuzzy modularity« und »kludging«. Die Abtrennung des einzelnen Prozesses und dessen Überprüfung an direkten empirischen Daten erlaubt aber eine andere Form der Überprüfung von Fehlern von Modulen, weil die einzelnen Module bestimmte physikalische Prozesse repräsentieren. Für die Prüfung der Bestandteile gelten dabei ähnliche Bedingungen, wie für die

26 Hierbei ist einzuschränken, dass im Falle von fehlschlagenden Vorhersagen des Gesamtmodells die Zuordnung von Fehlern schwierig ist, sodass häufig unklar ist, an welchen Teilen des Modells Verbesserungen vorgenommen werden sollten.

umfassenden Modelle, da diese auch durch empirische Faktoren bestimmt werden können. Dort findet sich auch wieder ein entsprechender Holismus der Überprüfung, der insofern eingeschränkt ist, dass Teile der Modelle einzeln geprüft werden können. Der Einfluss der aufgefundenen Fehler ist durch eine solche Untersuchung aber nicht festzustellen, denn diese hängt von der Einbettung in das umfassende Modell ab.

Die Überprüfung eines umfassenden Klimamodells besteht entsprechend nicht nur aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit empirischen Daten, sondern auch in der Überprüfung der Bestandteile. Dies bedeutet für die Problematik der Kalibrierung, dass diese durch die verschiedenen Methoden insofern eingeschränkt werden kann, als sie in der Lage sind, die beliebige Anpassung durch Kalibrierung einzuschränken. Die Einschränkung ist dadurch möglich, dass die Bestandteile einzeln überprüft werden können und dabei die Wahl der Parameter durch konkrete Prozessbeobachtungen vorgenommen werden kann. Im Fall der Klimasimulationen verhindert der Holismus nicht die Überprüfung und Weiterentwicklung von Modellbestandteilen.

Was bedeutet das allgemein für die Epistemologie von Computersimulationen? Mögliche epistemische Probleme hängen aufgrund der diversen Alternativen von Computersimulationen von der jeweiligen Einbettung in konkrete Forschung ab. Ich würde deswegen nicht von der Epistemologie der Computersimulationen als ein spezielles Gebiet sprechen, das sich eindeutig von der allgemeinen Epistemologie wissenschaftlicher Theorien abgrenzen lässt. Es gibt allerdings einen neuartigen Übergang von mathematischem Modell zu konkreter Vorhersage und damit eine neue Abhängigkeit von bestehendem Entwicklungszustand durch Aufbau auf bisheriges Programm. Dieses Verhältnis kann zu dem beschriebenen neuartigen Holismus der Überprüfung führen. Dieser Holismus ist vom Einzelfall abhängig und nicht allgemeingültig beschreibbar.

Literatur

Arakawa, Akio: *The cumulus parameterization problem. Past, present, and future*. Journal of Climate, 17 (2004). S. 2493-2525.

Duhem, Pierre: *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. Leipzig 1908.

- Edwards, Paul: *A vast machine. Computer models, climate data, and the politics of global warming*. Cambridge 2010.
- Flato, Gregory; Marotzke, Jochem; Abiodun, Babatunde; Braconnot, Pascale; Chou, Sin Chan; Collins, William; Cox, Peter; Driouech, Fatima; Emori, Seita; Eyring, Veronika; Forest, Chris; Gleckler, Peter; Guilyardi, Eric; Jakob, Christian; Kattsov, Vladimir; Reason, Chris und Rummukainen, Markku: *Evaluation of climate models*. In: Stocker, Thomas; Qin, Dahe; Plattner, Gian-Kasper; Tignor, Melinda; Allen, Simon; Boschung, Judith; Nauels, Alexander; Xia, Yu; Bex, Vincent und Midgley, Pauline (Hrsg.): *Climate change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge 2013. S. 741-866.
- Kiehl, Jeffrey: *Atmospheric general circulation modeling*. In: Trenberth, Kevin (Hrsg.): *Climate system modeling*. Cambridge 1992. S. 319-370.
- Lenhard, Johannes und Winsberg, Eric: *Holism, entrenchment, and the future of climate model pluralism*. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41 (2010). S. 253-262.
- Lloyd, Elisabeth: *The role of »complex« empiricism in the debates about satellite data and climate models*. *Studies in History and Philosophy of Science*, 43 (2012). S. 390-401.
- Petersen, Arthur: *Simulating nature. A philosophical study of computer-simulation uncertainties and their role in climate science and policy advice*. Amsterdam 2006.
- Popper, Karl: *Logik der Forschung*. Tübingen 2005.
- Randall, David; Krueger, Steven; Bretherton, Christopher; Curry, Judith; Duynkerke, Peter; Moncrieff, Mitchell; Ryan, Brian; Starr, David; Miller, Martin; Rossow, William; Tselioudis, George und Wielicki, Bruce: *Confronting models with data. The GEWEX cloud systems study*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84 (2003). S. 455-469.
- Randall, David und Wielicki, Bruce: *Measurements, models, and hypotheses in the atmospheric sciences*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (1997). S. 399-406.
- Stocker, Thomas; Qin, Dahe; Plattner, Gian-Kasper; Tignor, Melinda; Allen, Simon; Boschung, Judith; Nauels, Alexander; Xia, Yu; Bex, Vincent und

Midgley, Pauline (Hrsg.): *Climate change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge 2013.

Trenberth, Kevin (Hrsg.): *Climate system modeling*. Cambridge 1992.

Weisstein, Eric: *Parameterization*. In: MathWorld. A Wolfram web resource.
URL: <http://mathworld.wolfram.com/parameterization.html>, abgerufen am 5. Januar 2018.