

Schlussbericht für das Projekt
“Modellvalidierung und Ignoranzdynamik”

(DLR-Förderkennzeichen 01LG0002)

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das abgeschlossene, vom BMBF geförderte Projekt “Modellvalidierung und Ignoranzdynamik” hatte zum Ziel, Muster von Ignoranzdynamik in Erdsystemmodellen herauszuarbeiten, d.h. die Propagation von Unsicherheiten in Messdaten und Modellstruktur unter Systemdynamik auf die den Anwender interessierenden Modell-Ausgabegrößen zu analysieren. Aus Gründen der Rechenzeit, die die Analyse globaler Zirkulationsmodelle im Rahmen eines dreijährigen Projekts unmöglich macht, waren paradigmatische Modelle reduzierter Komplexität als Untersuchungsgegenstand heranzuziehen. Ziel war es hierbei, wesentliche Muster aufzuspüren, deren Ursachen quasi-universellen Charakter aufweisen und insofern in ganzen Klassen anderer Modelle zu erwarten sind. Im Idealfall ließen diese Ergebnisse Rückschlüsse darauf zu, inwieweit die übergeordnete Strategie großer Teile der Erdsystemmodellierungs-Gemeinschaft, durch die Kopplung immer weiterer Untermodule das zu modellierende System immer besser imitieren zu können, Erfolg erwarten lässt. Letztlich sollte das Projekt einen Blick “von außen” auf den Forschungszweig der Erdsystem-Modellierung, sowie dessen Standards im Umgang mit Unsicherheit werfen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Dem Projekt standen zwei, auf drei Jahre befristete Doktorandenstellen zur Verfügung. Die Betreuung der beiden Arbeiten geschah während des gesamten Projektzeitraums durch den Antragsteller, Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber, sowie einen in der PIK-Abteilung “Integrated Systems Analysis” tätigen wissenschaftlichen Mitarbeiter, Hermann Held, einem promovierten Physiker. Letztgenannte Abteilung pflegt Expertise zur Analyse dynamischer Modelle wie z.B. Phasenraum-Analyse mittels nichtlinearer Methoden. Für das Projekt konnten Frau Brigitte Knopf, Diplom-Physikerin, sowie Herr Thomas Schneider von Deimling, Diplom-Geophysiker, gewonnen werden. Das PIK stellte einen Supercomputer zur Verfügung, der es erlaubte, Monte-Carlo-artige Rechnungen parallelisiert auszuführen. Hierbei trat auch die PIK-Abteilung “Data & Computation” unterstützend in Erscheinung. Ferner konnte das Projekt auf die Expertise einer weiteren PIK-Abteilung, “Climate System”, für die Analyse des PIK-internen Klimamodells CLIMBER2 intermediärer Komplexität zurückgreifen, sowie für die Bewertung von Klima-Messdaten. Schließlich gelang es, durch den Dialog mit einer vierten involvierten PIK-Abteilung “Social Systems”, den gesellschaftlichen Entscheidungskontext mit in die Auswahl der entscheidenden Modell-Ausgabegrößen mit einzubeziehen und so dem Projekt neben der

innerwissenschaftlichen auch eine direktere, anwendungsorientierte Bedeutung zu geben. Auf diese Weise war dem Projekt die Möglichkeit gegeben, von der PIK-spezifischen interdisziplinären Kompetenz-Kombination zu profitieren.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Um Muster in Ignoranzdynamiken zu finden, die Universalität in einer gewissen Klimamodell-Klasse beanspruchen können, war geplant, ein sogenanntes Trainingsmodell reduzierter Komplexität zu erstellen. Bereits an der elementarsten Version, einem gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modell, konnte ein Effekt von weitreichender Bedeutung studiert werden: Vorhersagbarkeit im voll gekoppelten Modell unterscheidet sich in zwei Aspekten – die unten dargestellt werden – fundamental von einer rechenextensiven “Sparversion”, einem durch Ozeandynamik angetriebenen Atmosphärenmodell. Auf der Ebene von globalen Zirkulationsmodellen finden aus Kostengründen derartige getriebene Ansätze häufig Verwendung, insbesondere bei Modellvergleich-Workshops, aber auch generell bei Modellen der Wettervorhersage, sowie bei dekadischer Klimaprognose.

An dem nun im Projekt analysierten reduzierten getriebenen Klimamodell wurden künstliche, d.h. im voll gekoppelten Falle nicht beobachtbare Vorhersagbarkeit und auch künstliche Bistabilität gefunden. Diese Befunde konnten im Projekt durch Methoden der nichtlinearen dynamischen Systemtheorie erklärt werden. Dazu war ein Rückgriff auf Bifurkationsanalyse, Intermittenz und Replika-Synchronisation erforderlich. Es wurde ausdrücklich gezeigt, dass die Standard-Analyse mittels lokaler linearer Stabilitätseigenschaften nicht zielführend ist, sondern erst der Rückgriff auf moderne Methoden der Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme eine korrekte Deutung erlaubt. Wie sich ferner zeigte, treten die zugrunde liegenden Muster – instabile periodische Bahnen – generisch in komplexen nichtlinearen System auf, was zur Folge hat, dass die beschriebenen Phänomene – künstliche Vorhersagbarkeit und Bistabilität – als Standard bei getriebenen Modellen zu erwarten sind. Es ist gelungen, während des Projektzeitraums in diesem zentralen Punkt eine vollständige Klärung herbeizuführen. Wegen der theoretischen Komplexität des Gegenstandes, die über das in der Klimaforschung verwendete Methodenarsenal deutlich hinausgeht und wegen des Mutterschutzes von Frau Knopf während des Projektzeitraums wurde der Entwicklung eines weitergehenden Trainingsmodells abgesehen. Wegen des erfreulichen Ausmaßes an Universalität in den entdeckten und erklärten Effekten wäre ein solches Trainingsmodell auch nur noch von untergeordneter Bedeutung gewesen.

Gegen Projektende schloss sich ein zweiter Mutterschutz von Frau Knopf an, so dass an eine Fertigstellung der Dissertation nicht zu denken war. Frau Knopf hat sich indessen unter Mithilfe von PIK-Vorgesetzten in die Lage versetzt, für weitere zwei Jahre ihre Arbeiten niederzuschreiben und zu vervollständigen. So warb sie ein DFG-Projekt (gemeinsam mit Kollegen) und ein Stipendium ein. Schließlich rundete sie ihre Arbeiten zur Modellunsicherheit mit Untersuchungen des Bifurkationsverhaltens verschiedener reduzierter Modelle des indischen Monsuns ab.

Während sich die oben genannte Ergebnisgruppe auf Klimavorhersage im Trajektorienmodus bezieht, gibt es andere wichtige Aussagen über Klimaentwicklung, die sich auf Momente von Ensemble-Entwicklungen beziehen: So stellt die zentrale Klimasystemgröße, die in die Politikberatung eingeht, die sogenannte *Klimasensitivität* dar. Sie gibt an, um welchen Betrag sich die globale Mitteltemperatur unter Verdopplung des CO₂-Gehalts (gegenüber dem vorindustriellen Wert) erhöhen würde. Divergierende Modellaussagen stellen die wesentliche Ursache für die Unsicherheit in der Frage dar, wie viel weitere Emissionen von Treibhausgasen sich

die Menschheit leisten kann. Da hier weniger qualitative Effekte, sondern vielmehr explizite Zahlenwerte benötigt wurden, mussten die Untersuchungen an einem Klimamodell wenigstens intermediärer Komplexität durchgeführt werden. Das PIK-interne Klimamodell CLIMBER2 stellt für diesen Zweck einen geeigneten Kompromiss zwischen Rechengeschwindigkeit und Realitätsnähe dar. Thomas Schneider von Deimling identifizierte in Zusammenarbeit mit der institutseigenen Klimaabteilung diejenigen modelleigenen unsicheren Parameter, die die naturwissenschaftlichen Rückkoppelschleifen der Klimasensitivität entscheidend beeinflussen. Während des Förderzeitraums konnten nach international etablierten Methodologien Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Klimasensitivität ermittelt werden, die durch sukzessives Bayesisches Lernen aus Daten des vorindustriellen sowie des eiszeitlichen Klimas verschmälert wurden. Der subjektivistische Bereich des IPCC konnte so objektiviert werden. Das Lernen aus Daten des vorindustriellen Klimas entspricht dem Projektantrag und wurde während des Förderzeitraums abgeschlossen. Das ehrgeizigere Ziel, eine weltweit seltene Qualität von CLIMBER2, mit denselben Parameter-Einstellungen auch das glaziale Klima emergieren lassen zu können, zu nutzen, um die Klimasensitivität weiter einzugrenzen, wird derzeit zum Abschluss gebracht. Die geleisteten Arbeiten bieten nach Aufarbeitung genügend Material für die Dissertation von Herrn Schneider von Deimling. Die Finanzierung wird derzeit durch PIK-interne, auf anderen Zuwendungsgebern beruhenden Projekte geleistet.

Schließlich unterstützte Herr Dr. Held die oben geschilderten Aktivitäten durch Mitarbeit im Detail und eine Koordinierung mit PIK-internen Projekten, die Synergien erlaubten. Dies betrifft vor allem die Themenkreise “Früherkennung von Bifurkationen unter Unsicherheit”, “Mögliche Impacts eines Abreißen der thermohalinen Zirkulation des Nordatlantiks”, sowie “Vermeidungsoptionen des Klimawandels unter Unsicherheit”.

Wesentliche Ergebnisse Die erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Werden im Bereich der Wettervorhersage und dekadischen Klimavorhersage intermittente Vorhersagbarkeit für ein entscheidungsrelevantes Zeitfenster beobachtet, sollte dies an voll gekoppelten Modellversionen verifiziert werden.
- Das gleiche gilt im Fall von Bistabilität, die in getriebenen Systemen gefunden wird.
- Beide Ergebnisse legen die Empfehlung nahe, im Zweifelsfall auf höhere Modellauflösung zugunsten von voller Kopplung der Module zu verzichten.
- Mit einem neuartigen Monte-Carlo-Ansatz gelang es, das Wissen von Paleo-Archiven zu nutzen, um die Unsicherheit in der gesellschaftspolitisch bedeutsamen Klimagröße “Klimasensitivität” um einen Faktor 2 bis 3 zu reduzieren. Diese Ergebnisse von reduzierbarer Unsicherheit belegen auch, dass die gewählte Master-Strategie der Modulkopplung durchaus mit dem Wunsch von eingegrenzter Unsicherheit kompatibel bleiben kann, sofern das geeignete Datenmaterial in Bayesschem Lernen nutzbar gemacht wird.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Vorgefundener wissenschaftlicher Stand bei Projektbeginn

Das Phänomen künstlicher Vorhersagbarkeit bei getriebenen Systemen war in der Literatur als empirischer Befund vorgefunden worden, die Deutung mittels lokaler linearer Analyse musste

jedoch verworfen und durch eine mittels marginal instabiler invarianter Maße ersetzt werden. Nach Wissen der Projektmitglieder ist das Phänomen künstlicher Bistabilität bei getriebenen Systemen noch nie zuvor berichtet worden.

Zu Projektbeginn gab es bereits erste Ansätze systematischer Unsicherheitsanalysen komplexerer Klimamodelle mittels interpolierender Emulatoren oder aber Untersuchungen der Einflüsse einzelner Parameter. Eine systematische Studie zur simultanen Variation von Modellparametern inklusive Bayesschen Lernens war hingegen noch nicht veröffentlicht worden; in diesem Sinne stellte das Projekt ein Novum dar.

1.4.2 Rückgriff auf bekannte Methodologien

Frau Knopf konnte auf die frei zur Verfügung stehende Software AUTO zur automatisierten Bifurkationsanalyse zurückgreifen – allerdings konvergierten die Anwendungen im Fall des 8-dimensionalen Replica-Ansatzes nicht von vorne herein und bedurften einer sehr zeitaufwändigen Adaptation der Suchparameter. Außerdem konnte Frau Knopf von der Theorie der Bifurkationen, Intermittenz und Synchronisation ausgehen.

Herr Schneider von Deimling fand das PIK-interne Klimamodell vor, dessen Konstruktion und Etablierung Jahre in Anspruch genommen hatte. Er konnte ferner auf Sampling-Techniken, die auf Weiterentwicklungen der Monte-Carlo-Methode wie Latin-Hypercube-Sampling und Importance-Sampling zurückgreifen. Ferner wurde die Methode Bayesschen Lernens eingesetzt.

1.4.3 Benutzte Fachliteratur

Die gesamten, im Literaturverzeichnis angegebenen Referenzen wurden verwendet. Schwerpunkte bildeten Literatur über

- Bifurkationsanalyse (Argyris et al.),
- Synchronisation (Pikovsky et al.),
- Ensemble-Rechnungen der Berner und der MIT-Gruppe
- Paleo-Temperatur-Rekonstruktionen
- Sampling-Methoden

1.4.4 Benutzte Informationsdienste

keine

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Universität Potsdam: automatisierte Bifurkationsanalyse (Dr. Sven Titz, SFB555)
- Tyndall Centre, Außenstelle Durham (UK): Bayessches Lernen (Dr. Jonathan Rougier)
- MPI für Biogeochemie Jena: Stärke des glazialen Staubantriebs (Dr. Ina Tegen, Dr. Martin Werner)

- Universität Bremen: Paleo-Temperatur-Rekonstruktion (Dr. Christian Schäfer-Neth)
- TU Berlin: automatisches Differenzieren (Dr. Thomas Slawig)

2 Eingehende Darstellung

2.1 Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses

Im folgenden werden die wesentlichen Aspekte der oben beschriebenen Projektteile inhaltlich und technisch ausführlicher dargestellt. Da diese Darstellung bei der TIB Hannover einzureichen ist und von ihr “ins Netz gestellt” wird, bitten wir um Verständnis dafür, dass Abbildungen mit den größtenteils gerade erst im Veröffentlichungsprozess befindlichen Ergebnissen hier nicht gezeigt werden können und rein verbal dargestellt werden. Die strengen urheberrechtlichen Vorschriften erstklassiger Journale wie *Nature* oder *Science* zwangen uns zu dieser Vorsicht.

2.1.1 Dynamische Untersuchungen

Unsicherheitsanalyse der Modellkopplung Im konzeptionellen Teil des Projektes wurden intensive Untersuchungen zur Kopplung zwischen Teilsystemen angestellt. Dies war dadurch motiviert, dass die für eine integrierte Betrachtungsweise des Klimasystems notwendige Verknüpfung verschiedener Fachdisziplinen im Rahmen der Modellierung ihren Niederschlag findet, indem verschiedene Modelle gekoppelt werden, die jeweils mit Unsicherheit behaftet sind. Aus diesem Grund wurde den spezifischen Unsicherheiten, bzw. den Folgen der Unsicherheiten, die durch die Kopplung entstehen, hier besonderes Augenmerk gewidmet.

Die Untersuchung der Kopplung von Systemen stößt schon seit längerer Zeit in der Wissenschaft auf Interesse. Haken [15] hat dazu die Theorie der Selbstorganisation (Synergetik) entwickelt, in der es um das Zusammenwirken von einzelnen Teilsystemen geht. Um von einem einfachen System zu komplizierteren zu gelangen, wurden insbesondere gekoppelte *identische* Systeme untersucht [11], vor allem gekoppelte chaotische Systeme [26, 27, 28] oder gekoppelte Abbildungen (maps) [19, 30]. Dabei spielen Synchronisation [29], die auch in chaotischen Systemen gefunden wird, und On-off-Intermittenz [16], ein Hin- und Herspringen z.B. zwischen chaotischen und regulären Zuständen, eine große Rolle.

Es hat sich gezeigt, dass der Grad der Synchronisation und auch das Bifurkationsverhalten, d.h. die Abhängigkeit des Systemzustandes von einzelnen Parametern, entscheidend von der Kopplungsstärke abhängen [4, 39]. Verschiedene Kriterien für das Auftreten von Synchronisation in Abhängigkeit der Kopplungsstärke wurden entwickelt, allerdings kann keines dieser Kriterien den exakten Parameterbereich für vollständige Synchronisation vorhersagen [4].

Auch für den inversen Ansatz, den Rückschluss von Phänomenen wie Synchronisation auf die Art bzw. die Richtung der Kopplung (uni- oder bidirektionale Kopplung) wurden Methoden entwickelt [32], die sich im Experiment mit kleineren Einschränkungen als erfolgreich gezeigt haben [3].

Die Phänomene wie Synchronisation oder On-off-Intermittenz werden nicht nur in niedrigdimensionalen Systemen gefunden, sondern auch in räumlich aufgelösten Systemen. Ein Beispiel aus dem Bereich des Klimasystems ist ein gekoppeltes großskaliges atmosphärisches Zirkulationsmuster, bei dem Synchronisation sowohl im numerischen Modell als auch in den Daten beobachtet werden kann [8]. Untersuchungen an einem gekoppelten konzeptionellen Ozean-Atmosphären-Modell zeigen, dass die Stärke der Kopplungsparameter das Verhalten des Systems entscheidend beeinflusst: zum einen gibt es einen Zustand mit dominierender Atmosphäre und passivem Ozean, andererseits gibt es einen mit aktivem Ozean [34].

Ein spezieller Aspekt der Kopplung besteht darin, dass bei komplexen Modellen nicht das gesamte System erfasst werden kann, sondern ein Teil in vereinfachter Form, z.B. durch das Vorschreiben von Daten, berücksichtigt wird. Das Vorschreiben von Daten ist ein oft praktizierter Vorgang in der Klimaforschung, um Computer-Ressourcen einzusparen. Die bei der Modellierung des Klima- und noch mehr des gesamten Erdsystems übliche Strategie, einzelne Teilmodule (z. B. Atmosphäre, Ozean, Vegetation) getrennt voneinander zu entwickeln und anschließend zu einem Gesamtmodell zu koppeln (siehe z.B. das “Climate System Model project (CSM)” [5]), wird in diesem Fall etwas verändert: einige der Komponenten werden durch Beobachtungsdaten ersetzt, so dass künstlich ein externer Antrieb implementiert wird (sogenanntes *forcing*). Dies wird z.B. im “Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)” [13] durchgeführt, wo einem atmosphärischen “general circulation model” (GCM) realistische Ozean-Oberflächentemperaturen und Meereis als Nebenbedingungen vorgeschrieben werden. Obwohl noch nicht systematisch untersucht wurde, inwiefern die mit dem getriebenen Modell erzielten Ergebnisse mit der voll gekoppelten Version eines Ozean-Atmosphären-Modells übereinstimmen, werden die Ergebnisse zu Vorhersagezwecken genutzt. Vergleiche der beiden Vorgehensweisen haben allerdings gezeigt, dass z.B. die Temperaturen in Polnähe und der tropische Niederschlag nur unzureichend wiedergegeben werden [6].

Alle diese Arbeiten lassen darauf schließen, dass die Kopplung in (Klima-)Modellen und das Ersetzen eines Teilmodells durch Daten eine Schlüsselstellung in gegenwärtigen Modellierungsbemühungen einnimmt. Daher entschieden wir, dem Thema der Kopplung in unserem Projekt einen besonderen Stellenwert bei der Untersuchung von Unsicherheiten einzuräumen.

Um zu analysieren, welche generellen Effekte bei der Kopplung von Modellen im Zusammenhang mit Vorhersagbarkeit und in Bezug auf Stabilitätseigenschaften auftreten können, wurde ein konzeptionelles Modell aufgegriffen, für das ein Vergleich zwischen der voll gekoppelten Modellversion und einer Version durchgeführt worden war, in der ein Teilmodul durch Daten ersetzt ist. Das Modell wurde schon in [36] untersucht; jedoch erwiesen sich die dort erzielten Ergebnisse für unsere Zwecke als unzureichend oder sogar fehlerhaft (s.u.). Wir fokussierten unsere Bemühungen darauf, mögliche Bedingungen zu finden, die die Übereinstimmung von voll gekoppeltem und getriebenem Modell verhindern.

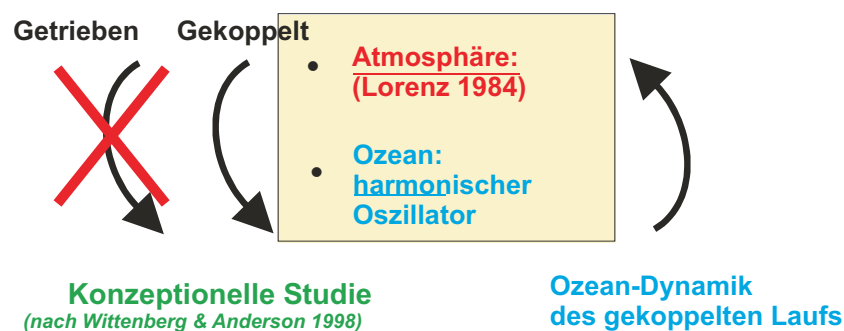


Abbildung 1: Voll gekoppeltes Modell und getriebenes Modell (“Forcing”). Die getriebene Version ist bei komplexeren Modellen deutlich kostengünstiger. Hier wird untersucht, ob es generische Effekte von systemstischen Abweichungen der beiden Kopplungsschemata gibt.

Das gekoppelte Modell besteht zum einen aus einem Atmosphärenmodell, das an das 3-dimensionale, teilweise chaotische Lorenzsystem [24] angelehnt ist. Zum anderen repräsentiert ein einfacher harmonischer Oszillator den Ozean. Die Kopplung erfolgt zunächst linear über

zwei Atmosphären- und die beiden Ozeankomponenten. (Es konnte jedoch im weiteren Verlauf gezeigt werden, dass diese Linearität für die von uns gefundenen Effekte keinesfalls eine notwendige Bedingung darstellt; die Effekte sind auch in diesem Sinne universell.) Um nun ein sogenanntes *forcing* durch das Vorschreiben der Meeresoberflächentemperaturen zu simulieren, wird eine Kopie des Atmosphärenmodells implementiert. Die Kopie erhält jedoch als Eingangsgröße für die Ozeankomponenten die Werte aus dem voll gekoppelten Lauf (siehe Abb. 1), so dass man auf diese Weise ein 8-dimensionales System erhält. Dieses zweite Atmosphärenmodell, das mit geringfügig anderen Anfangsbedingungen startet, stellt somit das getriebene System dar, während das voll gekoppelte Modell die “Daten” für das forcing bereitstellt. Diese Modellanordnung ist in der Literatur unter *Replica-System* bekannt [29].

Zur Beantwortung der Fragestellung, welche grundsätzlichen Unterschiede zwischen Kopplung und forcing bestehen, wurde zunächst eine Bifurkationsanalyse der beiden Systeme durchgeführt. Die Untersuchungsmethode beinhaltet die Identifikation von invarianten Maßen, wie stabilen oder instabilen periodischen Orbits, mit Hilfe des Programms AUTO [7], eines Programmpaketes zur Bifurkationsanalyse. Die Bifurkationsanalyse erlaubt die Identifikation und Darstellung der verschiedenen möglichen Zustände eines Systems in Abhängigkeit eines Systemparameters. Phasenraumregionen mit sprunghaft veränderter Dynamik können auf diese Weise erkannt werden. Dies ist für nichtlineare Systeme von fundamentaler Bedeutung, denn hier stößt ein naives Standard-Verständnis von Aktion und Reaktion an seine Grenzen (kleine Parameterveränderungen können große Systemveränderungen mit sich bringen). Auswirkungen von Parameterunsicherheiten und teilweise auch Modellunsicherheiten können mit dieser Methode untersucht werden.

Das auffälligste Ergebnis der Untersuchung ist, dass die beiden Systeme qualitativ unterschiedliche Bifurkationsdiagramme aufweisen. In Abhängigkeit von der Kopplungsstärke α , mit der der Ozean an die Atmosphäre gekoppelt ist, lassen sich vier verschiedene Gebiete (G_1, \dots, G_4) im Phasenraum identifizieren. Im ersten Bereich (für $\alpha \in G_1$) stimmen die Stabilitätseigenschaften der beiden untersuchten Atmosphärenkomponenten überein. Im Bereich $\alpha \in G_2$ findet man im getriebenen System einen zweiten, künstlichen stabilen periodischen Orbit. Im Bereich $\alpha \in G_3$ zeigt das replica-System einen völlig anderen stabilen Zustand und im Bereich $\alpha \in G_4$, finden sich nur noch instabile periodische Bahnen, wobei auffällt, dass auch hier das Bifurkationsdiagramm des getriebenen Systems reicher an Struktur ist und mehr instabile Bahnen beinhaltet.

Die aufgezeigten Phasenraumeigenschaften erlauben es nun, die Ursachen für auffällige Zeitreiheneigenschaften – wie etwa locking – herauszuarbeiten. Betrachtet man während eines Simulationslaufes die Norm der Differenzen der Atmosphärenkomponenten von voll gekoppeltem und getriebenem Lauf $\delta \mathbf{x} = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ und definiert ein sogenanntes *locking*, wenn $\delta \mathbf{x}$ kleiner als ein kritischer Schwellwert ist (siehe Abb. 2), dann erhält man mit der relativen mittleren locking-Zeit $\langle \tau \rangle$ eine Aussage über die Zeitreiheneigenschaften. Dabei zeigt sich, dass es eine Übereinstimmung zwischen getriebenem und gekoppeltem System nur geben kann, wenn beide Systeme den gleichen stabilen Zustand einnehmen. In dem Fall, in dem es für das getriebene System zwei mögliche Zustände gibt, ist es von den Anfangsbedingungen abhängig, ob sich die beiden Systeme in Übereinstimmung befinden.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist das zeitweise auftretende locking im Bereich G_4 , das dadurch entsteht, dass in das Attraktorgebiet zusätzlich ein instabiler periodischer Orbit eingebettet ist, der zeitweise von beiden Trajektorien gleichzeitig angenommen wird. Dies lässt sich in Abb. 2 als Zeitreiheneigenschaft beobachten, wo es einen ständigen Wechsel von fast völliger

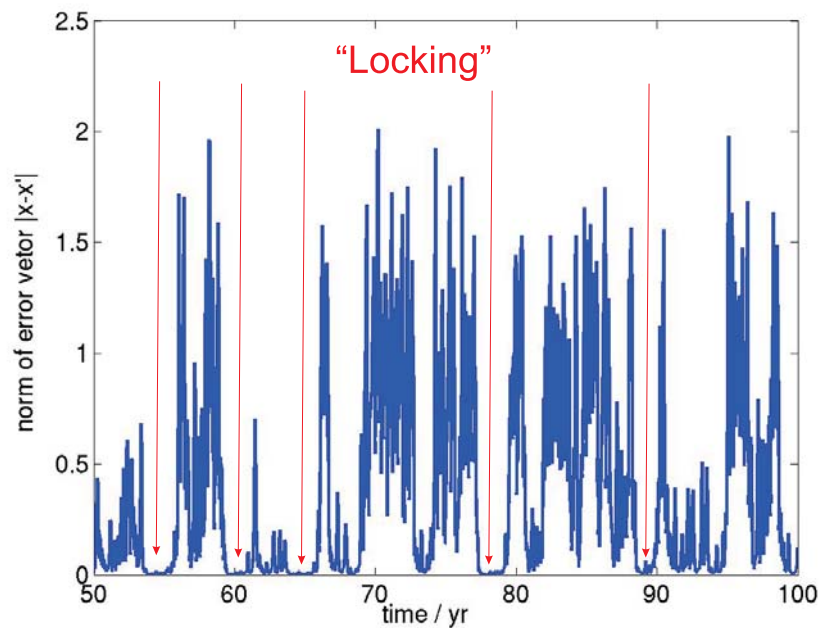


Abbildung 2: Norm des Fehlervektors $\delta\mathbf{x} = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ zwischen voll gekoppeltem und getriebenem Lauf.

Übereinstimmung (d.h. $\delta\mathbf{x} = 0$) und großen Abweichungen zwischen beiden Trajektorien gibt.

Die Zeitreihe zeigt in diesem Fall also künstlich hohe Vorhersagbarkeit, was mit einem artifiziellen Kollabieren von Unsicherheit einhergeht. Die entscheidende Rolle der instabilen periodischen Bahnen bei diesem Phänomen lässt sich erfassen wie nachweisen, wenn man den instabilen Orbit zusammen mit der gestörten Trajektorie in ihren Locking-Phasen abbildet: es zeigt sich, dass sie sich in gerade jenen Phasen eng an den instabilen Orbit anschmiegt, um schließlich entlang seiner instabilen Mannigfaltigkeit in den höherdimensionalen Zustandsraum zurückkatapultiert zu werden. Es sei noch angemerkt, dass eine Standardinterpretation des locking mittels lokaler linearer Stabilitätsanalyse sich als nicht zielführend erwiesen hat: Abb. 3 zeigt, dass zwischen den lokalen Eigenwerten sowohl der originalen Jacobimatrix als auch ihrer symmetrisierten Variante, die das momentane Fehlerwachstum bestimmt, keinelei Korrelation mit locking zu verzeichnen ist.

Analog zu *On-off-Intermittency*, wo es einen ständigen Wechsel zwischen laminaren Phasen, in denen das System fast konstant ist und sich auf einer invarianten Mannigfaltigkeit befindet, und turbulenten Phasen gibt, wo große Ausbrüche von diesen laminaren Phasen vorkommen, haben wir für den Wechsel zwischen locking und nicht-locking den Begriff *On-off-Synchronization* geprägt. Man findet in diesem Fall das gleiche Potenzgesetz für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Locking-Phasen, wie es für die Verteilung der laminaren Phasen bei *On-off-Intermittency* gilt. In den folgenden beiden Abschnitten seien nun die wesentlichen Ergebnisse dieses Paragraphen zusammengefasst:

Mit diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich Phasenraum- und Zeitreiheigenschaften identifizieren lassen, die eine Übereinstimmung von gekoppeltem Modell und seinem getriebenem Pendant grundsätzlich ausschließen. Einerseits stimmen zwar, wie es oft auch unterstellt wird, in den meisten Fällen gekoppeltes und getriebenes Modell überein, vor

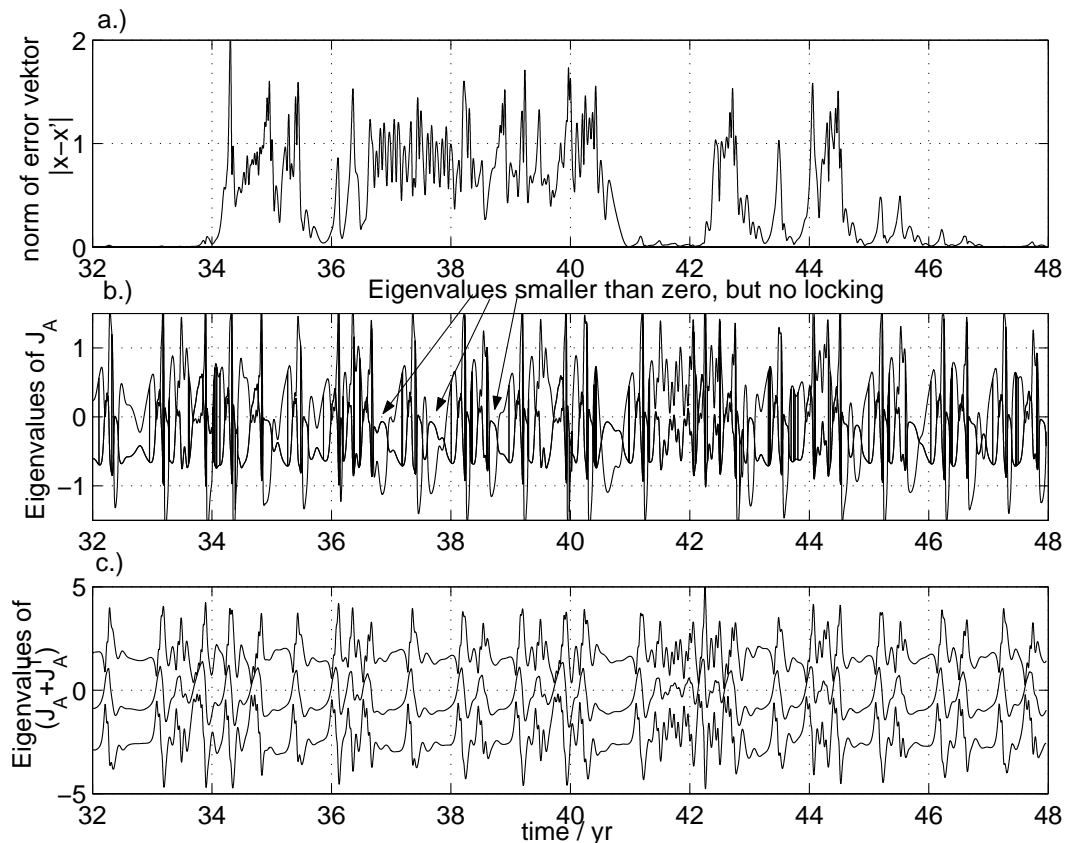


Abbildung 3: Zeitreihen von Zustandsvariablen, die intermittentes locking zeigen, und von Eigenwerten der (symmetrisierten) Jacobimatrix. Diese Eigenwerte bzw. ihr Vorzeichen erklärt das locking nicht, das Standard-Erklärungsmuster versagte somit. Wir mussten auf eine Erklärung mittels invarianter Maße zurückgreifen.

allem in Hinsicht von mittlerer Vorhersagbarkeit oder dem Auftreten von dominanten periodischen Bahnen. Andererseits lassen sich aber auch große Parameterbereiche identifizieren, in denen – im Gegensatz zum gekoppelten System mit nur einem stabilen Orbit – das getriebene System zusätzlich einen weiteren stabilen periodischen Orbit aufweist. Dieser sorgt für künstliche Bistabilität, was den gängigen Vorstellungen der Erdsystemmodellierung widerspricht.

Auch in den Zeitreiheneigenschaften finden sich systematische Unterschiede der beiden Modellierungsansätze: hier zeigt das getriebene System künstlich hohe Vorhersagbarkeit, die sich darin begründet, dass wir es hier mit einem master-slave System (voll gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell und getriebenes Atmosphärenmodell) zu tun haben. Befinden sich beide Trajektorien in der Nähe des selben periodischen Orbits, so wird die getriebene Trajektorie auf den Orbit der master-Trajektorie gezogen. Da dieser aber instabil ist, hält die Übereinstimmung nur für kurze Zeit an.

Unsicherheitsanalyse eines Monsunmodells Die oben aufgeführten Ergebnisse zielen auf die Untersuchung von Unsicherheit in der Modellkopplung und sind somit als Teil der gesamten Modellunsicherheit zu sehen. Ein weiteres Modell, an dem Unsicherheiten direkt untersucht wurden, ist ein Modell des Indischen Monsuns. Zum einen wurden hier Parameterunsicherhei-

ten von anthropogen beeinflussten Parametern analysiert, zum anderen waren auch Modellunsicherheiten Gegenstand der Untersuchung. Ein Teil der erzielten Ergebnisse ist im Rahmen des Projektes “Ignoranzdynamik” entstanden.

Das untersuchte Monsunmodell beschreibt die grundlegenden physikalischen Prozesse und Rückkopplungen [40]. Es besteht aus einem eindimensionalen Boxmodell für die tropische Atmosphäre und beinhaltet den hydrologischen Kreislauf, großskalige Zirkulationsmuster und die Oberflächenhydrologie. Die Variablen des Modells sind die Oberflächentemperatur und die spezifische Feuchte, sowie die Bodenfeuchte in zwei Schichten. In einem “Reduced-form-Modell” desselben, in dem die Randbedingungen festgehalten sind, mehrere Parametrisierungen vereinfacht wurden und das System auf Sommer-Bedingungen eingefroren wurde, konnte mit Hilfe der Bifurkationsanalyse eine Sattel-Knoten-Bifurkation in Abhängigkeit der planetaren Albedo, die das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender Sonneneinstrahlung beschreibt, gefunden werden [18]. Die Bifurkation geht einher mit einem Wechsel zu einem nur sehr schwachen hydrologischen Kreislauf, was de facto zu einem Ausbleiben des Monsuns führt. Mit Hilfe der Bifurkationsanalyse lassen sich hier Parameterunsicherheiten bezüglich der Lage des Bifurkationspunktes untersuchen und es lässt sich feststellen, wie weit der heutige Zustand von der Bifurkation entfernt ist. Des weiteren konnte auf diese Weise ein bistabiler Zustand gefunden werden, der bei Änderung der planetaren Albedo zu einer Hystereseerscheinung im Auftreten des Monsuns führt.

Neben Parameterunsicherheiten wurden auch Modellunsicherheiten des Monsunmodells untersucht. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Fragestellung, ob sich die Sattel-Knoten-Bifurkation auch in dem komplexeren Modell finden lässt. Es wurde eine Hierarchie von Modellen untersucht, die alle von dem komplexen Modell abgeleitet wurden und an deren Ende durch immer weitere Vereinfachungen und Vernachlässigungen von physikalischen Prozessen das “Reduced-form-Modell” steht. Die Vereinfachungen beinhalten z.B. das Festschreiben der Bewölkung, die Vernachlässigung der Hadley-Zirkulation und des Jahresgangs. Es zeigt sich, dass das Phänomen des Wechsels von einem starken zu einem nur schwachen hydrologischen Zyklus d.h. von einem feuchten zu einem trockenen Sommer, bei Änderung der planetaren Albedo ein robustes Resultat zu sein scheint. Die Bifurkation selber kann zwar nicht in der gesamten Modellhierarchie gefunden werden, die Tendenz zu einem Regimewechsel des Sommermonsuns ist aber bei allen Modellstufen deutlich zu sehen. Die Untersuchungen sind hier allerdings noch nicht ganz abgeschlossen.

2.1.2 Arbeiten zur Klimasensitivität

Im zweiten Teilprojekt wurde der Einfluss von Parameterunsicherheiten auf Modellergebnisse untersucht bei simultaner Variation der Parameter über ihren gesamten, nach Modellkonstruktion zulässigen Bereich. Letzterer betrug bei einem der Parameter etliche Größenordnungen. Bezüglich der Modell-Ausgabe-Seite lag der Fokus auf der Analyse des Unsicherheitsbereichs der sogenannten *Klimasensitivität*, welche als charakteristische Modellkenngröße verwendet wird, um die Stärke der gesamten Rückkopplungsmechanismen eines Klimamodells zu beschreiben¹. Modelle mit unterschiedlicher Klimasensitivität zeigen bei Berechnung eines identischen Emissionsszenarios deutliche Unterschiede bezüglich der prognostizierten Erwärmung. Der Unsicherheitsbereich der Klimasensitivität konnte über die letzten 20 Jahre nicht

¹Die Klimasensitivität wird definiert als die Gleichgewichtsänderung der globalen Oberflächentemperatur, welche auf eine Verdoppelung des atmosphärischen CO₂-Gehalts folgt.

eingeschränkt werden und wurde beziffert mit 1.5-4.5°C (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC [20]), welcher aus Modellrealisierungen verschiedener allgemeiner Zirkulationsmodelle (GCMs) abgeleitet wurde. Um diesen Bereich zu untersuchen und probabilistisch zu interpretieren, wurden in den letzten Jahren Ensemblerechnungen mit intermediär-komplexen Klimamodellen [10, 22] sowie messdatenbasierte Schätzungen [14] durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studien weisen darauf hin, dass der allgemein akzeptierte Unsicherheitsbereich von 1.5-4.5°C mit hoher Wahrscheinlichkeit das Risiko größerer Erwärmungen deutlich unterschätzt und sehr große Klimasensitivitäten (z.B. größer als 6°C) durch Messdaten der Temperaturentwicklung des letzten Jahrhunderts nicht ausgeschlossen werden können.

Die in diesem Projekt gewonnen Ergebnisse legen hingegen eine Einschränkung des Unsicherheitsbereichs der Klimasensitivität auf den ursprünglichen IPCC-Bereich nahe und sollen im folgenden näher beschrieben werden.

Climber2 Ensemble Runs

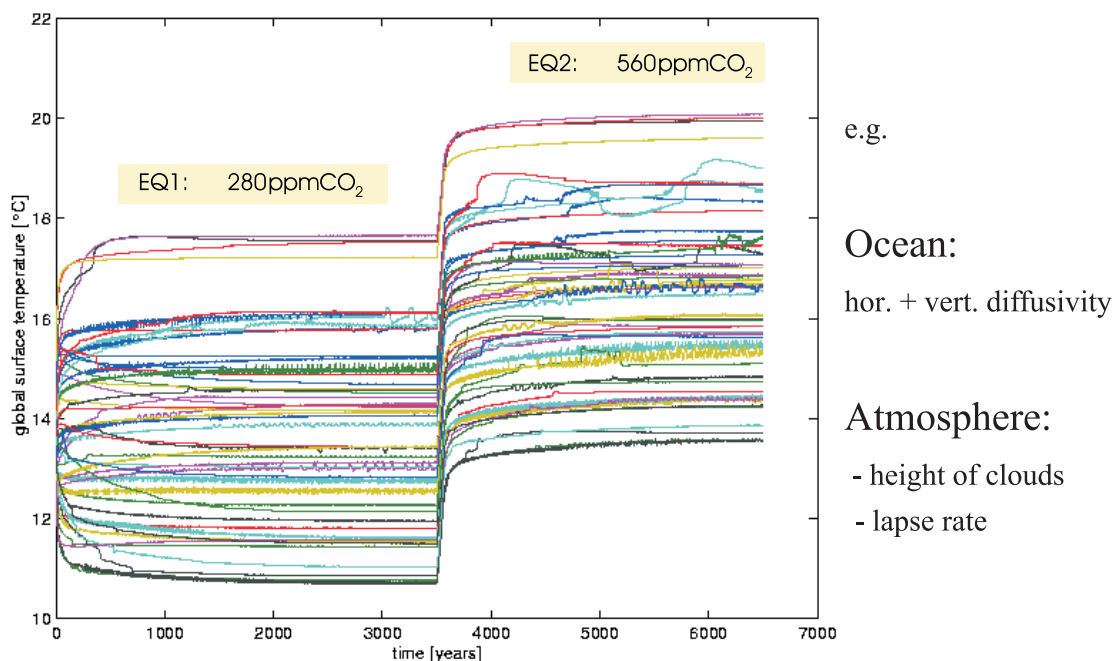


Abbildung 4: Zeitreihen globaler Mitteltemperaturen zufällig für diese Abb. ausgewählter Mitglieder des Ensembles. Wir ließen CLIMBER2 über tausende von Modelljahren ins Gleichgewicht laufen, um dann mit einem Konzentrationsanstieg von 1% CO₂ pro Jahr den CO₂-Gehalt der Atmosphäre von 280 ppm auf 560 ppm anwachsen und schließlich wieder ins Gleichgewicht rechnen zu lassen. Die Differenz der Gleichgewichtstemperaturen stellt die Klimasensitivität dar.

Das PIK-interne Klimamodell CLIMBER2, welches zur Klasse der intermediär-komplexen Modelle gezählt wird, eignet sich ideal zur systematischen Untersuchung von Parameterunsicherheiten durch seine Recheneffizienz (im Vergleich zu allgemeinen Zirkulationsmodellen (GCMs)). Hierdurch war es möglich, Ensemblesimulationen in der Größenordnung von einigen tausend Läufen zu realisieren und das voll gekoppelte Modell über einen langen Zeitraum

(einige tausend Jahre) ins Gleichgewicht zu rechnen (vgl. Abb. 4). Die Einstellung des Gleichgewichts wird von Klimaforschern verwendet, um die zur Initialisierung eines Anfangswertproblems benötigten, jedoch bislang fehlenden Messinformationen wettzumachen. Rechentech- nisch haben Klimaforscher daher mit dem Problem zu kämpfen, dass Tausende von Modelljah- ren generiert werden müssen, selbst wenn lediglich Prognosen für die kommenden Jahrhunderte von Interesse sind.

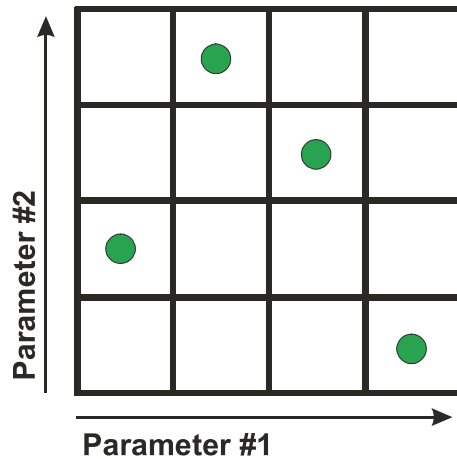


Abbildung 5: Schema des Latin-Hypercube-Verfahrens am Beispiel eines zwei-dimensionalen Parameterraums. Es muss pro Zeile und pro Spalte genau einen Eintrag geben. Dadurch gibt es pro Zeile eine sehr hohe, quasi deterministisch dichte Abrasterung, was bei schwach nichtlinearen Transferfunktion zu einer deutlich schnelleren Konvergenz als das Standard-Monte-Carlo-Verfahren führt.

Die Standardversion von CLIMBER2 zeigt eine Klimasensitivität (CS) von 2.7°C und kann nicht durch direkten Zugriff voreingestellt werden (wie z.B. bei anderen Modellen [10, 22]). Wir werten es als ein Qualitätsmerkmal von CLIMBER2, dass die CS keinen Tuning-Parameter darstellt, sondern eine dynamische Fundierung aufweist. Insofern werten wir unsere erzielten Ergebnisse aussagekräftiger als die der oben erwähnten Gruppen. Da die CS jedoch nicht einstellbar ist, war zunächst zu klären, welche unsicheren Modellparameter einen entscheidenden Einfluss auf diejenigen klimadynamischen Rückkoppelschleifen besitzen, die wiederum die CS determinieren. Dieses sind die Wasserdampf-, Wolken-, Albedo- und Temperaturprofil-Rückkoppelschleifen. So wurde, gemeinsam mit den Konstrukteuren des Modells, eine Liste von elf wichtigsten Parameter und der maximalen Intervalle erstellt, die diese Parameter per Modellkonstruktion überhaupt sinnvoll einnehmen können. Es schloss sich eine Monte-Carlo-Studie der CS über diesem 11-dimensionalen Parameterraum an. Genauer gesagt, wurde eine Variante des Monte-Carlo-Verfahrens, das Latin-Hypercube-Verfahren, gewählt (siehe Abb. 5). Es führt bei nicht zu nichtlinearen Transferfunktionen zu zügigerer Konvergenz des Ensembles in den gewünschten Erwartungswerten von Mittelwert, Varianz oder Quantilen [31].

Nach Bayesschem Lernen aus sieben sehr konservativen Nebenbedingungen, die sich aus der Kenntnis der vorindustriellen Klimatologie ergaben, resultierte ein CS-Intervall von 2.2 bis 3.7°C im Sinne eines 5...95%-Quantils. Dieses Ergebnis liegt deutlich innerhalb des IPCC-Intervalls und steht in krassem Widerspruch zu den Ergebnissen in [10, 22], die obere Grenzen zwischen 8 und 9°C fanden. Künftige Untersuchungen haben zu klären, inwieweit die Ursache dafür in

1. Modellschwächen von [10, 22],
2. Modellschwächen von CLIMBER2 durch unzulässige Zementierungen wichtiger dynamischer Eigenschaften in Form zu elementarer Parametrisierungen,
3. der Sampling-Strategie oder
4. unterschiedlichen Datensätzen, die zum Bayesschen Lernen herangezogen wurden,

liegt. Punkt 4 lässt sich sogleich ausschließen, weil wir in einem 5000-Schuss-Experiment eine maximale CS von 4°C erzielten, *vor* Bayesschem Lernen. Punkt 3 ließ sich ebenfalls innerhalb des Projekts abklären. Er berührt einen außerordentlich subtilen wie heiklen Aspekt der Bayesschen Methode, über den Statistiker schon seit Jahrhunderten kontrovers diskutieren [2]: ob es erlaubt sei, nicht vorhandenes Vorwissen über unbekannte Parameter in Form von (relativ flachen) Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu modellieren. Wir haben $\text{beta}(7/4, 7/4)$ -verteilte Eingangsverteilungen angenommen, die in der Tat ein flaches Maximum aufweisen und quasi-parabolisch zu den Intervall-Rändern hin auf Null abfallen. Die streng Bayessche Vorschrift, flache Eingangsverteilungen zu wählen, erschien in unserem Fall des sicheren Ausschlusses von Parameterwerten jenseits der Intervallgrenzen als inkonsistent: warum sollte eine Eingangsverteilung unstetig sein? Mit unserer Wahl einer beta-Verteilung wählten wir hingegen eine Adaption der Bayesschen Vorschrift, die unseren Gegebenheiten am ehesten entsprach. Des weiteren bezogen wir die gewählte Verteilung nicht auf die Parameter, sondern deren Logarithmen, weil wir die Parameter z.T. über Größenordnungen variieren ließen. Kontakte zu Dr. Jonathan Rougier, einem führenden Bayesianer des Tyndall Centres (UK), bestärkten uns in der Wahl unserer subjektiven Eingangsverteilung.

Die Hauptkritik an der Bayesschen Schule, wie sie z.B. eindrucksvoll durch das Ellsbergsche Experiment [9] empirisch validiert und in das neue Theoriekonzept der unscharfen Wahrscheinlichkeiten [35] umgemünzt wurde, besteht darin, dass das marginale subjektive Vorwissen sich eher nicht durch subjektive Wahrscheinlichkeiten modellieren ließe, sondern dass unschärfere Maße erforderlich seien. Grob gesprochen sagen die Kritiker, dass das Maß an Verrechenbarkeit zwischen Parameter-Einstellungen, das die Bayessche Methode impliziert, mit dem tatsächlich vorhandenen Vorwissen von Experten nicht vereinbar sei und typischer Weise zu engen Intervallgrenzen führe. Herr Dr. Held betreute zeitgleich Teile der Dissertation von Herrn Dipl.-Phys. Elmar Kriegler, ebenfalls PIK, die sich mit diesen neueren Theorieansätzen befasst. Dadurch wurde im vorliegenden Projekt das Bewusstsein dafür gefördert, dass die abgeleiteten Bayesschen Intervalle für CS eben gerade auch Resultat des Bayesschen Ansatzes sein könnten. Allerdings wurde entschieden, dass derartig subtile und neuartige Ansätze und Aspekte der Klima-Community derzeit nicht simultan mit dem gewählten Ensemble-Ansatz vermittelbar seien, der ja seinerseits bereits ein Novum darstellte, wie überhaupt die Formalisierung von Unsicherheit in Modell-Parametern.

Um dennoch auszuschließen, dass engere CS-Intervalle ein reines Artefakt des Bayesschen Ansatzes sind, wurden folgende Extremfälle untersucht:

1. Eine entscheidende Annahme, dass die unsicheren Parameter in der Bayesschen Eingangsverteilung unkorreliert seien (was zu notorisch kleinen Intervallen in CS-Intervallen Anlass gibt), wurde fallengelassen. Um konservative Intervalle zu veröffentlichen, wurde

diejenige lineare Korrelation zwischen den Parametern gewählt, die unter den Nebenbedingungen der vorindustriellen Klimatologie das CS-Intervall maximiert (im folgenden als “korreliertes Ensemble” bezeichnet). Diese Vorgehensweise ist samplingtheoretisch deutlich konservativer als die in [10, 22] gewählte Vorgehensweise unkorrelierter Eingangsverteilungen. Sie wurde unabhängig vom Theoriegebäude der unscharfen Wahrscheinlichkeiten von T.S. in Gesprächen mit der Klimaabteilung entwickelt und stellt so eine angenehme Bestätigung derjenigen dar, die eine Weiterentwicklung des Bayesschen Ansatzes fordern.

2. Parallel dazu verfolgten wir eine reine Intervall-Methode. Die Grundidee bestand darin, aus den Modellergebnissen einen einfachen Zusammenhang entweder (a) zwischen Modell-Ausgabe-Größen untereinander oder (b) für die Abbildung der Parameter auf die Modell-Ausgabegrößen zu formulieren und mit Hilfe dieser Zusatz-Hypothesen weitgehend auf das Wahrscheinlichkeitskonzept zu verzichten. Intervallansätze sind notorisch zu konservativ; ließen sich jedoch auf diesem Wege Aussagen treffen, so wäre eine Gültigkeit deutlich jenseits unseres gewählten Modells CLIMBER2 hinaus zu erwarten.

Für das korrelierte Ensemble ergab sich ein CS-Intervall von $1.3\text{-}5.5^\circ\text{C}$ vor Bayesschem Lernen. Dieses Intervall enthält das zugehörige IPCC-Intervall für CS und erlaubte so zu prüfen, ob sich der engere Bereich, den der IPCC veröffentlichte, durch Einschränkung mittels objektiver Daten reproduzieren oder gar verschmälern ließe.

Dazu wurde das Ziel verfolgt, durch systematischen Vergleich von Modellsimulationen und Messdaten diejenigen Modellversionen auszuschließen, welche die Konsistenzkriterien der Daten nicht erfüllen, um somit (möglicherweise) den Klimasensitivitätsbereich einzuschränken. Ein Vergleich von Modellsimulationen und Messdaten aus der vorindustriellen Zeit² hat gezeigt, dass es möglich ist, CLIMBER2-Modellversionen zu generieren, welche sehr unterschiedliche Klimasensitivitäten zeigen, jedoch zugleich sämtliche Datenbedingungen der vorindustriellen Zeit erfüllen. Auch die Hinzunahme von Dateninformationen, welche eine Breitengradabhängigkeit zeigen, konnte den Bereich der Klimasensitivität nicht weiter verringern.

Zur Einschränkung der Unsicherheit des Klimasensitivitätsbereichs wurde nun ein neuartiger Ansatz verfolgt, wie er nur mit CLIMBER2 oder weltweit sehr wenigen anderen Modellen durchführbar ist. Die ausgeprägte Temperaturabkühlung zwischen vorindustriellem Klima und dem Klima zur Zeit des letzten glazialen Maximums (LGM, vor ca. 21000 Jahren) wurde als neue Kenngröße zur Einschränkung des Modellverhaltens betrachtet (siehe Abb. 6). Dieser Ansatz erscheint vielversprechend, weil die entscheidenden Agenten des Strahlungsantriebs (nordhemispherische Eisschilde, verminderte atmosphärische CO_2 -Konzentration, erhöhte atmosphärische Staubmengen, geringfügig veränderte solare Einstrahlung), welche den deutlichen Temperaturabfall initiiert haben, mit zufriedenstellender Genauigkeit bekannt sind. Gleichzeitig sind rekonstruierte Daten der Temperaturabkühlung von unterschiedlichen Regionen der Erde verfügbar.

Durch das zeitlich lange Vorherrschen der Eiszeitbedingungen hatte das Klimasystem genügend Zeit, sich den gegebenen Bedingungen anzupassen, was sich in der deutlichen Temperaturantwort von ca. $6\text{-}8^\circ\text{C}$ globaler Abkühlung widerspiegelt. Hingegen fällt das Klimasignal der

²Dateninformationen wurden für die globalen Mittelwerte folgender Größen betrachtet: Oberflächentemperatur, Seeeisfläche, Niederschlag, Ozeantemperatur, Stärke der meridionalen atlantischen Ozeanzirkulation sowie des meridionalen Wärmetransports.

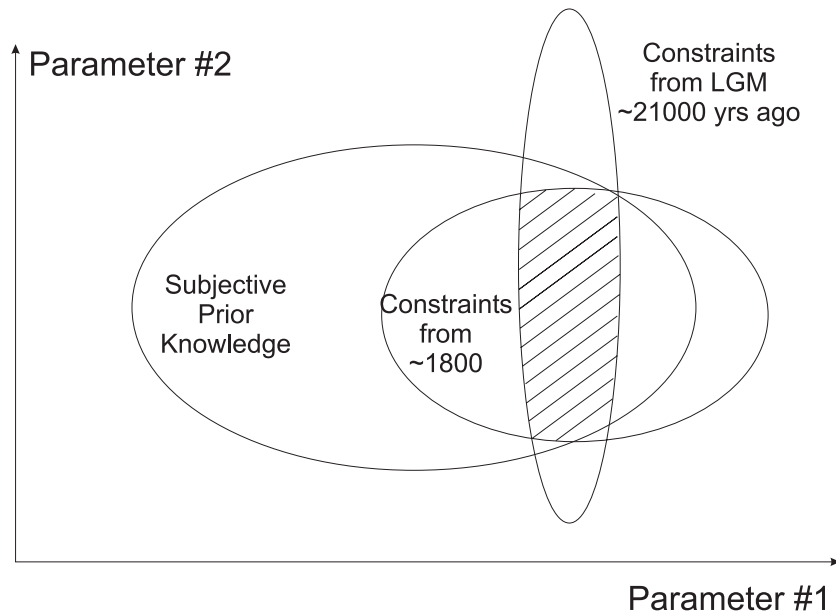


Abbildung 6: Sukzessives Lernen aus Beobachtungsdaten im Raum der unsicheren Parameter: größte Fläche für den subjektiven Eingangsbereich, dann Schnittmengenbildung mit den Vorgaben des vorindustriellen Klimas (um das Jahr 1800), schließlich weitere Schnittmengenbildung mit den Vorgaben des letzten glazialen Maximums vor ca. 21000 Jahren. Den letzten Schritt können nur wenige Forschungsgruppen mit ihren Modellen gehen; nach unserem Wissen wurde dieser Schritt erstmalig durch unser Projekt vollzogen.

anthropogenen Erwärmung, welches durch die zeitliche Verzögerung der ozeanischen Wärmeaufnahme mit ca. 0.7°C Erwärmung über die letzten 150 Jahre (bisher) vergleichsweise gering aus [17]. Das Modell CLIMBER2 wurde in der Vergangenheit schon mehrfach für Simulationen der Eiszeit verwendet [12] und zeichnet sich dadurch aus, dass für die Simulation dieses deutlich unterschiedlichen Klimazustandes kein zusätzliches Modell-Tuning nötig ist, sondern die gleichen Parametersätze wie zur Simulation des vorindustriellen Klimas verwendet werden. Ensemblerechnungen wurden somit für die Eiszeitbedingungen mit den gleichen Parameterkonstellationen durchgeführt, mit welchen die unterschiedlichen Klimasensitivitäten erzeugt wurden.

Als entscheidendes Ergebnis dieser Rechnungen stellte sich heraus, dass eine quasi-lineare Beziehung zwischen berechneter Klimasensitivität und glazialer Abkühlung existiert, d.h. je größer die Erwärmung auf verdoppelte CO_2 -Konzentrationen, desto deutlicher die simulierte Abkühlung in der Eiszeit. Die Quasi-Linearität der Modellantworten zeichnet sich – unabhängig von den berücksichtigten Parameterunsicherheiten – sowohl in den niederen als auch in den hohen Breiten ab. Diese Charakteristik ermöglicht eine Einschränkung des Klimasensitivitätsbereiches, wenn man Konsistenz mit Paläodaten fordert und diese in einem nicht zu großen Temperaturintervall liegen. Ein globaler Datenvergleich bietet sich nicht an, da die Paläodatenabdeckung über weite Bereiche des Globus unzureichend ist.

Für einen Datenvergleich eignen sich Regionen, welche eine ausreichende Datenabdeckung aufweisen, welche nicht von lokalen Klimasignalen dominiert werden (die in CLIMBER2 nicht abgebildet werden) und für welche CO_2 ein entscheidender Strahlungsantrieb für die Abkühlung war. Zusätzliche Ensemblerechnungen, für die das Modell ausschließlich durch die ver-

änderten glazialen CO₂-Konzentrationen angetrieben wurde (d.h. für die die übrigen glazialen Strahlungsantriebe ausgeblendet wurden), haben aufgezeigt, in welchen Regionen die simulierte glaziale Abkühlung ein deutliches CO₂-geprägtes Signal enthält. Wie zu erwarten weisen die Gebiete hoher nördlicher Breite den geringsten CO₂-bedingten Anteil an der Gesamtabkühlung auf (minimale Werte von ca. 10%), maximale Werte von ca. 50% werden in der Südhemisphäre erreicht. Zwei Regionen erscheinen somit für einen Modell-Datenvergleich prädestiniert: die tropischen Bereiche, insbesondere die Ozeanregionen, für welche zahlreiche Temperaturrekonstruktionen aus einer Vielzahl an Sedimentbohrkernen verfügbar sind, sowie der Bereich der Antarktis.

Die Forderung der Konsistenz zwischen simulierten und rekonstruierten glazialen Abkühlungen hat dazu geführt, dass Modellversionen mit sehr großen Klimasensitivitäten nicht in Einklang mit den Informationen der Paläodaten zu bringen sind. Hierbei hat sich gezeigt, dass ein Vergleich mit tropischen Ozeandaten (SST) etwas geringere Klimasensitivitäten nahelegt als ein Vergleich mit Daten aus der Antarktis (und auch den tropischen Landregionen). Möglicherweise macht sich hier eine systematische Unterschätzung der simulierten Abkühlung in hohen Breiten bemerkbar – ein Problem, welches auch bei GCMs beobachtet werden kann [23]. Berücksichtigt man jedoch eine wesentliche Unsicherheit in der Vergleichbarkeit von Paläodaten mit CLIMBER2-Ausgabewerten, die sich durch die räumliche Variabilität ergibt, und nimmt man an, dass die Varianz mit dem Inversen der Fläche skaliert (dies entspricht dem empirischen Befund, dass es korrelierte Flächenelemente gibt und der Daten-Modellvergleich um so besser möglich ist, je mehr derartiger unabhängiger Flächenelemente sich wegmitteln können), so könnte dieser Effekt die beobachtete Diskrepanz zwischen SST- und Antarktis-basierten Ergebnissen erklären.

Für die Festlegung der tropischen SST-Abkühlung (bemittelt über 30°N bis 30°S) gingen wir von $2.7 \pm 0.7^\circ\text{C}$ aus, wobei die Unsicherheit aus eben jener Variabilität ergibt. Nimmt man noch die Möglichkeit einer konkurrierenden Paläo-Schule hinzu, ergeben sich um 0.5°C kleinere Werte. Die quasi-lineare Abhängigkeit von LGM-Abkühlung und CS erlaubt nun, per Intervallmethode $\text{CS} \in [1.1^\circ\text{C} \ 4.2^\circ\text{C}]$ abzuleiten, wobei bereits Inter- oder Extrapolationsfehler (letzteres am unteren Rand des Intervalls) berücksichtigt sind. Am unteren Rand unterschätzt die lineare Näherung die tatsächlichen CS-Werte, eine echte Minimierungsroutine würde daher ein engeres Intervall in CLIMBER2 finden. Hier ging es jedoch darum zu zeigen, welche Rückschlüsse diese konservativste aller Methoden erlauben würde. (Der oben erwähnte lineare Emulator, der Modellparameter mit allen Modell-Ausgabegrößen verbindet, liefert sehr ähnliche Ergebnisse.)

Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist es besonders erwähnenswert, dass ein Ansatz, welcher das Verhalten des Klimasystems in der letzten Eiszeit zu Grunde legt, den Klimasensitivitätsbereich des IPCC auf unabhängige Weise ungefähr bestätigt, am oberen Rand sogar als konservativ einschätzt.

Die Bayessche Methode liefert erwartungsgemäß ein engeres Intervall (um 0.5 bis 0.8°C), danach wird der IPCC-Bereich uneingeschränkt bestätigt.

Weitere technische Aspekte Das Modell CLIMBER2 wurde in die am PIK entwickelte Softwareumgebung SIMENV eingebettet, um Ensemblesimulationen auf einem IBM-Hochleistungsrechner effizient zu realisieren. Hierbei wurde das Klimamodell derart erweitert, dass ein direkter Zugriff auf die entscheidenden Modell-Feedback-Parameter über eine Eingabedatei möglich ist und somit Modellversionen mit sehr unterschiedlichen Klimasensitivitäten realisiert werden können. Um den Bereich von 1.5 - 4.5°C des IPCC zunächst (vor dem Bayesschen Lernen)

übertreffen zu können, wurde im Weiteren ein bestimmtes Sampling-Verfahren entwickelt (angelehnt an die Idee des sogenannten Importance-Sampling), welches durch gezieltes Korrelieren der Modellparameter die Extrembereiche der Klimasensitivität maximiert, ohne dass sich gleichzeitig der vorindustrielle Klimazustand zu weit von realistischen Werten entfernt.

Ferner ist für einen Daten-Modellvergleich eine möglichst realitätsnahe Beschreibung der glazialen Randbedingungen entscheidend. Hierzu wurde das Modell CLIMBER2 erweitert, um den Einfluss der erhöhten glazialen Staubkonzentrationen berücksichtigen zu können. Es wurden von einem GCM berechnete Anomalien in der kurzwelligen Strahlungsbilanz [33] auf das Gitter von CLIMBER2 angepasst und direkt in das Strahlungsschema implementiert. Der Einfluss von Staub auf die Abkühlung während des LGM wurde in den meisten bisherigen Simulationen vernachlässigt. Die Modellrechnungen mit der modifizierten CLIMBER2-Version haben gezeigt, dass solch eine Vernachlässigung zu einer Unterschätzung der simulierten globalen Abkühlung von ca. $0.5\text{-}1.3^\circ\text{C}$ führen kann. Des Weiteren wurde untersucht, inwieweit sich Unsicherheiten der Größe des Einflusses von Staub auf die abgeleiteten Klimasensitivitätsbereiche auswirken. Ein um 50% veringertes Strahlungsantrieb durch glazialen Staub führte zu einer systematischen Verschiebung der Klimasensitivitätswerte um ca. 0.5°C . Diese Aspekte sind im Sinne einer konservativen Intervallmethode bereits in den oben genannten Intervallgrenzen berücksichtigt (wir gaben stets denjenigen Fall an, der die extremste CS-Grenze lieferte; am unteren Rand war dies der maximale, am oberen der halbe Strahlungsantrieb von Staub).

2.2 Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

2.2.1 Dynamische Untersuchungen

Unsicherheitsanalyse der Modellkopplung Da das Erklärungsmuster des untersuchten Phänomens sich nicht spezifisch auf das untersuchte System bezieht, sondern universelle theoretische Muster der Nichtlinearität des Systems benutzt, sind wir der Auffassung, dass künstliche Vorhersagbarkeit (*On-off-Synchronization*) und künstliche Bistabilität generelle Charakteristika von getriebenen Systemen sind. Die vorgestellte Arbeit legt den Schluss nahe, dass beim Vorschreiben von Daten in einem Modell auch Zustände simuliert werden, die es in der Realität nicht gibt. Für die Modellierer bedeutet das Ergebnis, dass ein großes Augenmerk auf die Kopplung selber gerichtet werden muss und dass immer auch alternative Kopplungsmechanismen getestet werden müssen, um auszuschließen, dass man sich in einem Phasenraumbereich befindet, wo getriebenes und voll gekoppeltes System nicht übereinstimmen oder wo instabile periodische Bahnen einen künstlichen Vorhersageeffekt erzeugen. Der Nutzen der Untersuchungen liegt somit in einer Warnung vor einem unbedarften Einsatz von Daten anstelle eines Teil-Modells.

Da es sich während der Bearbeitung des Projektes "Ignoranzdynamik" gezeigt hat, dass die Kopplung einen entscheidenden Aspekt der Modellierung darstellt, wurde hieran anknüpfend ein neues Projekt initiiert, das sich mit der Frage der Viabilität von Kopplungen beschäftigt. Dazu ist ein DFG-Antrag genehmigt worden ("Viabilität nichtlinearer dynamischer Systeme unter Unsicherheit"), der grundsätzliche Fragen zur Dynamik gekoppelter und nichtlinear Modelle unter Unsicherheit beinhaltet und somit gewährleistet, dass die Untersuchungen zur Modellkopplung weitergeführt werden.

Unsicherheitsanalyse eines Monsunmodells Hier sind zwei wichtige Aspekte zu nennen: zum einen ist das Auftreten einer Bifurkation des Monsuns in Abhängigkeit eines anthropo-

gen beeinflussbaren Parameters ein völlig neuer Befund, der für die betrachtete Region große Auswirkungen haben kann. Da die planetare Albedo von Landnutzungsänderungen und von Änderungen in der Konzentration von lichtstreuenden Aerosolen abhängt, könnten die Ergebnisse der Untersuchung Einfluss auf politische Entscheidungsprozesse haben.

Zum anderen lässt sich schließen, dass der Mechanismus, der zum Auftreten der Bifurkation führt, robust gegenüber der untersuchten Modellunsicherheit ist. Um eine Absicherung des Ergebnisses zu erhalten, muss das Auftreten der Sattel-Knoten-Bifurkation noch mit Klimamodellen mittlerer Komplexität (EMICs) und mit "general circulation models" (GCMs) getestet werden.

2.2.2 Arbeiten zur Klimasensitivität

Der Wert der Klimasensitivität ist von entscheidender Bedeutung im *Integrated Assessment* und fließt dort als direkter Modellinputparameter in vereinfachte Klimamodelle ein. Hierbei werden oft Werte bis zu 9°C diskutiert (e.g. [38]). Eine derart großer Unsicherheitsbereich der Klimasensitivität erschwert die Wahl geeigneter Handlungsoptionen und damit verbundener Emissionspfade, um die Einhaltung bestimmter Klimaschutzziele zu gewährleisten (z.B. das sogenannte Klimafenster des WBGU im Jahre 1997, der einen maximalen Anstieg der globalen Mitteltemperatur von 2°C und eine maximale Anstiegsrate von 0.2°C pro Dekade empfiehlt, damit Klimaschäden größeren und irreversiblen Ausmaßes vermieden würden). Erste Rechnungen zeigen, dass bei $CS < 1.0^{\circ}\text{C}$ das Klimafenster mit einem Stabilisierungsszenario von 550 ppm CO_2 einzuhalten wäre, hingegen bei $CS = 9^{\circ}\text{C}$ das Fenster bei *jeder* Klimaschutzpolitik verfehlt würde. Der von uns gefundene Bereich für die CS bedeutete, dass das Klimafenster bei einer aggressiveren Klimaschutzpolitik durchaus einzuhalten wäre.

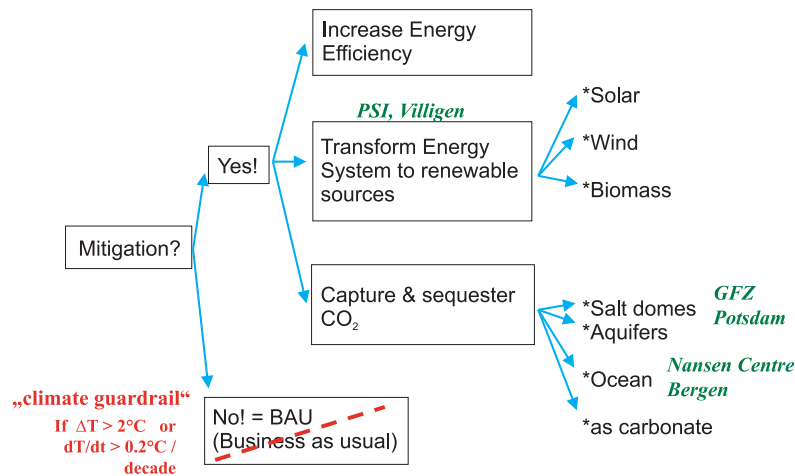


Abbildung 7: Schema eines interdisziplinären neuen PIK-Projekts SPARK im Rahmen des Programms der VolkswagenStiftung "Fächerübergreifende Umweltforschung". Von dem hier abgeschlossenen BMBF-Projekt wird das VW-Projekt übernehmen, wie sich eine Temperaturleitplanke (Abb. links unten) in eine Emissionsleitplanke mittels der unsicheren Klimasensitivität übersetzt.

PIK-intern werden die zur Klimasensitivität generierten Ergebnisse sehr konkret in ein von der VolkswagenStiftung gefördertes Projekt (mit dem PIK-internen Acronym SPARK) einfließen (siehe Abb. 7). Es ist im Programm "Nachwuchsförderung in der fächerübergreifenden

Umweltforschung“ angesiedelt und widmet sich der Frage, wie das Energiesystem umzurüsten sei – bei gegebenem Klimafenster und Unsicherheiten in der Antwort des Klimasystems auf Treibhausgasemissionen; hierbei geht CS als entscheidender unsicherer Parameter ein.

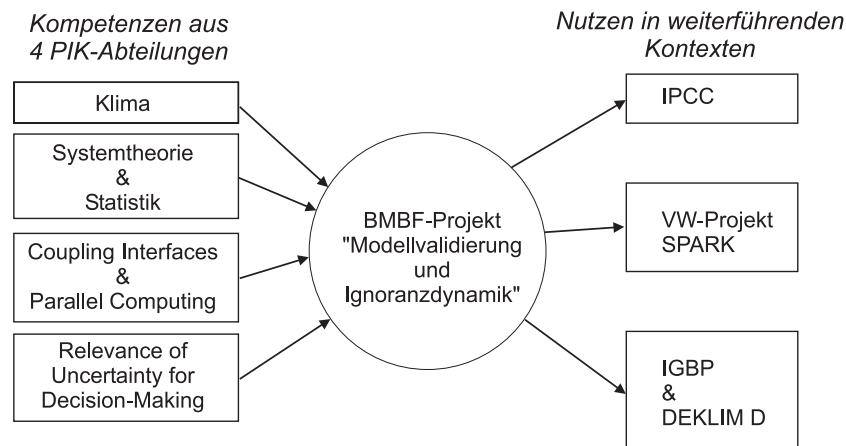


Abbildung 8: Kompetenzfluss für das abgeschlossene BMBF-Projekt zur Modellvalidierung und Ignoranzdynamik. Die linke Spalte beschreibt, welche Kompetenzen die vier involvierten der fünf PIK-Abteilungen einbrachten. Die rechte Spalte dokumentiert die tatsächlichen und möglichen Nutznießer des Projekts.

2.2.3 Zusammenfassende Bemerkungen

Abb. 8 stellt schematisch zusammen, inwieweit unser Projekt von PIK-internen Abteilungsstrukturen profitiert hat und welchen Nutzen größere oder weit in die Zukunft ragende Projekte aus unserem Projekt ziehen werden. In der “Nutzen-Spalte” wäre noch ein in 2005 auslaufendes Projekt INTEGRATION zu nennen, das sich den Konsequenzen einer Abschwächung der thermohalinen Zirkulation auf regionale Fischerei, Land- und Forstwirtschaft widmet. Dieses Projekt nutzt das erstellte Monte-Carlo-Archiv als Startwertebasis für Erwärmungsszenarien.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der CS-Teil des Projekts bereits jetzt einen spürbaren Nutzen für übergeordnete Programme hat. So wurden u.a. die Hauptergebnisse bereits auf einem CS-IPCC-Workshop vorgestellt und im entsprechenden, in *Science* diskutierten Workshopbericht [20] erwähnt. Der dynamisch basierte Teil unseres Projekts lässt jedoch auch einen ähnlichen Nutzen erwarten; dies um so mehr, als Frau Knopf seit einigen Wochen aus dem Mutterschutz zurückgekehrt ist und nun ihre erarbeitete Expertise wieder in gewohnter Weise dem Institut zur Verfügung stellt.

2.3 Eingehende Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

2.3.1 Dynamische Untersuchungen

Interessante Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Vergleichs zwischen voll gekoppelten und getriebenen Modellen sind in einer Arbeitsgruppe am “Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA)” entstanden. Dort arbeitet Prof. B. Kirtman zu Modellen zur Wettervorhersage. Er

versucht dabei, voll gekoppelte Atmosphären-Ozeanmodelle (AOGCMs) einzusetzen, während ansonsten in der Wettervorhersage meistens nur atmosphärische “general circulation models” (AGCMs) eingesetzt werden, bei denen die Oberflächentemperaturen des Ozeans und der Oberflächenwärmefluss vorgeschrieben werden. In vergleichenden Studien zwischen beiden Ansätzen konnte er zeigen, dass das gekoppelte Modell die Beziehung zwischen Monsun und ENSO sehr gut wiedergibt, dass aber das Modell, in dem der Indische Ozean von der Atmosphäre entkoppelt ist, die Wechselwirkung zwischen Monsun und ENSO nicht richtig simuliert werden kann [37]. Dieses Ergebnis unterstützt unsere These, dass getriebene Modelle nicht immer alle Aspekte des voll gekoppelten Modells abbilden können.

2.3.2 Arbeiten zur Klimasensitivität

Entscheidend zur aktuellen Diskussion über den Unsicherheitsbereich der Klimasensitivität haben in den letzten Jahren Studien von C. Forest [10] sowie R. Knutti [22] beigetragen. Hierbei wurden Ensemblerechnungen für die Simulation der Klimaerwärmung der letzten 150 Jahre durchgeführt, in welchen die Klimasensitivität sowie die Effektivität der ozeanischen Wärmeaufnahme variiert wurden – unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Unsicherheit des Strahlungsantriebes über das letzte Jahrhundert. Beide Studien behaupten, dass der IPCC-Bereich der Klimasensitivität ($1.5-4.5^{\circ}\text{C}$) das Risiko größerer Erwärmungen deutlich unterschätzt. Modellversionen mit sehr großer Klimasensitivität können in Kombination mit einem stark negativen Aerosol-Strahlungsantrieb Temperaturverläufe liefern, welche mit Messdaten der anthropogenen Erwärmung konsistent sind und somit nicht verworfen werden können. Weitere Studien [1, 14], welche ebenfalls das Augenmerk auf das Signal der anthropogenen Erwärmung zur Einschränkung der Klimasensitivität richten, weisen ebenso auf das Risiko nicht auszuschließender großer Klimasensitivitätswerte hin. Im Rahmen des CLIMATE-PREDICTION-Projektes, in welchem unterschiedliche Parameterkonstellationen eines GCMs durchgespielt werden, wurde aus einem kleinen Ensemble (53 Läufe) für Modellversionen ohne dynamischen Ozean die Klimasensitivität bestimmt [25]. Unter der sehr groben Annahme, dass sich einzelne Parametervariationen linear kombinieren lassen, um die gemeinsame Änderung der Modellantwort zu bestimmen, wurde das Ensemble künstlich auf (einige) Millionen Modellrealisierungen erweitert und anschließend hinsichtlich der Simulationsgüte des jetzigen Klimas gewichtet. Der resultierende 5-95%-Klimasensitivitätsbereich verschiebt die IPCC-Schätzung um ca. 1°C zu höheren Werten.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass erst unsere Einbeziehung des LGM-Paläodaten-Pools es erlaubt, eine niedrige obere Schranke für CS von ca. 4°C nahezulegen.

2.4 Eingehende Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

2.4.1 Veröffentlichungen in Fachjournalen

- Eine Veröffentlichung zur Untersuchungen der Unsicherheit bei der Modellkopplung bzw. dem Unterschied von gekoppelten und getriebenen Systemen ist gerade eingereicht worden [21]. Es wurde dasjenige Journal ausgewählt, in dem Frau Knopf das interessante Phänomen künstlicher Vorhersagbarkeit entdeckt hatte, in dem jedoch eine fehlerhafte Deutung publiziert worden war: das geophysikalische Journal (*Nonlinear Processes in*

Geophysics). Dort hoben wir den Nutzen bzw. die Anwendung für die Geomodellierung deutlich hervor. Die Veröffentlichung wird z.Zt. begutachtet.

- Die physikalische Herausarbeitung des Ergebnisses und die anschließende Veröffentlichung desselben ist für die nächste Zeit geplant. Von einer Veröffentlichung bei *Chaos* wurde wieder Abstand genommen, da wir zu der Erkenntnis gekommen sind, dass die Ergebnisse zunächst der Community in der Geophysik vorgestellt werden sollen, die selber mit getriebenen Systemen arbeitet. Dem haben wir mit der Einreichung bei *Nonlinear Processes in Geophysics* (s.o.) entsprochen.
- Des weiteren ist vorgesehen, eine Übertragung in die GCM-Community zu erarbeiten und diese ebenfalls zu veröffentlichen.
- Die Ergebnisse zur Untersuchung des Monsunmodells werden demnächst zur Veröffentlichung eingereicht in *Geophysical Research Letters* [18].
- Eine weitere Veröffentlichung ist zur Untersuchung der Modellhierarchie geplant.
- Die Ergebnisse zur Einschränkung der CS-Unsicherheit werden im Januar 2005 bei *Science* eingereicht.
- Es war unsere Politik, unsere CS-Ergebnisse mit erster Priorität in obigen Journalen höchsten Impact-Faktors zu publizieren und alle relevanten Abbildungen zunächst dafür aufzusparen. Dadurch ist es zu einem Rückstau für andere, längst mögliche, längere Publikationen gekommen. So ist eine weitere naturwissenschaftliche Publikation dazu geplant, in welchem Sinne sämtliche CS-relevante Rückkoppelschleifen in unserer Monte-Carlo-Studie durchgestimmt wurden und unsere Ergebnisse daher modellübergreifend sind.
- Des weiteren soll in einer statistischen Publikation untersucht werden, bis zu welchem Maße alle bisher veröffentlichten Ensemble-Ergebnisse zur CS ein Artefakt der jeweils gewählten statistischen Methode darstellen.
- Nachdem die Einzelprojektteile jeweils ihre ersten Veröffentlichungen zur Akzeptanz gebracht haben werden, sollte eine übergreifende Veröffentlichung der Ergebnisse – auf weniger technische Weise dargestellt – in Journalen der IGBP-Community einem breiteren Leserkreis bekannt machen.
- Unterstützend hierzu wird die *akzeptierte* Publikation *Kriegler und Held, Int. J. of Approximate Reasoning* wirken, die im Grenzbereich dieses BMBF-Projekts und eines weiteren, von der VolkswagenStiftung geförderten Projekts angesiedelt war: sie behandelt moderne Erweiterungen der Bayesschen Methode, die dem tatsächlich vorhandenen subjektiven Vorwissen besser gerecht werden sollen.
- Schließlich konnte eine weitere, ebenfalls im Grenzbereich des Projekts angesiedelte Aktivität eine Synergie bezüglich des erzeugten Monte-Carlo-Ensembles nutzen: Die *erschienene* Veröffentlichung *Held und Kleinen, Geophys. Res. Lett., Dez. 2004* stellt eine Methode vor, wie Paläodaten künftig effektiver für Bayessches Lernen im Parameterraum genutzt werden könnten.

2.4.2 Tagungspräsentationen

Weiterhin sind die Ergebnisse auf verschiedenen Tagungen präsentiert worden:

Zeitraum	Dienstreise	teilnehmende Person/en
03/2001	8. International Meeting on Statistical Climatology, Lüneburg	TS, HH
07/2001	Global Change Open Science Conference, Amsterdam	TS, BK, HH
09/2001	Modeling and Identification of Continuous Nonlinear Dynamical Systems, Freiburg	BK, HH
02/2002	Kooperationsgespräch mit Axel Timmermann, Kiel	BK
04/2002	XXVII. Jahrestagung der European Geophysical Society, Nizza	TS, BK, HH
09/2002	NCCR Summerschool Grindelwald	TS
12/2002	AGU Fall Meeting, San Francisco	TS
04/2003	EGS-AGU-EUG Joint Assembly; Jahrestagung der European Geophysical Society, Nizza	TS, BK, HH
09/2003	International conference on Earth System Modeling, Hamburg	TS, BK
10/2003	EURESCO conference on Achieving Climate Predictability using Paleoclimate Data	TS
04/2004	EGU 1st General Assembly, Jahrestagung der European Geophysical Union, Nizza	TS, BK, HH

Abgesehen von der ersten Dienstreise nach Lüneburg wurden auf sämtlichen Reisen Ergebnisse präsentiert.

3 Unterschrift des Antragstellers

Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber

Potsdam, den 21.12.2004

Literatur

- [1] N. Andronova and M. Schlesinger. Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 106, 2001.
- [2] J. O. Berger. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. Springer, New York, 1985.
- [3] B. Bezruchko, V. Ponomarenko, M. Rosenblum, and A. Pikovsky. Characterizing direction of coupling from experimental observations. *Chaos*, 13(1):179–184, 2003.
- [4] J. N. Blakely, D.J. Gauthier, G. Johnson, T.L. Carroll, and L.M. Pecora. Experimental investigation of high-quality synchronization of coupled oscillators. *Chaos*, 10(3):738–744, 2000.
- [5] B. A. Boville and P. R. Gent. The NCAR climate system model, version one. *Journal of Climate*, 11:1115–1130, 1998.
- [6] C. K. Covey, K. M. AchutaRao, P.J. Gleckler, T.J. Phillips, K.E. Taylor, and M.F. Wehner. Coupled ocean-atmosphere climate simulations compared with simulations using prescribed sea surface temperature: Effect of a perfect ocean". *Global and Planetary Change*, 41:1–14, 2003.
- [7] E. Doedel, A. Champneys, T. Fairgrieve, Y. Kuznetsov, B. Sandstede, and X. Wang. AUTO97 : Continuation and bifurcation software for ordinary differential equations.

- [8] G. Duane. Synchronized chaos in extended systems and meteorological teleconnections. *Physical Review E*, 56(6), 1997.
- [9] D. Ellsberg. Risk, ambiguity, and the savage axioms. *Quarterly Journal of Economics*, 75, 1961.
- [10] C. E. Forest, P. H. Stone, A. P. Sokolov, and M. Allen. Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations. *Science*, 295(5552):113–117, 2002.
- [11] H. Fujisaka and T. Yamada. Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems. *Progress in Theoretical Physics*, 69:32–47, 1983.
- [12] A. Ganopolski, S. Rahmstorf, V. Petoukhov, and M. Claussen. Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity. *Nature*, 391, 1998.
- [13] W. L. Gates, J. Boyle, C. Covey, C. Dease, C. Doutriaux, R. Drach, M. Fiorino, P. Gleckler, J. Hnilo, S. Marlais, T. Phillips, G. Potter, B. Santer, K. Sperber, K. Taylor, and D. Williams. An overview of the results of the atmospheric model intercomparison project (AMIP I). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73:1962–1970, 1992.
- [14] J. M. Gregory, R. J. Stouffer, S. C. Raper, P. A. Stott, and N. A. Rayner. An observationally based estimate of the climate sensitivity. *Journal of Climate*, 15(22):3117–3121, 2002.
- [15] H. Haken. *Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik - Die Lehre vom Zusammenwirken*. DVA, 1981.
- [16] J. Heagy, N. Platt, and S. Hammel. Characterization of on-off intermittency. *Physical Review E*, 49:1140–1150, 1994.
- [17] J. T. Houghton. *The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 2001.
- [18] V. Petoukhov, K. Zickfeld, B. Knopf and H.J. Schellnhuber. Is the indian summer monsoon stable against global change? Vorgesehen zur Einreichung bei Geophysical Research Letters, 2004.
- [19] K. Kaneko. Overview of coupled map lattices. *Chaos*, 3(2):279–282, 1992.
- [20] R. A. Kerr. Three degrees of consensus. *Science*, 305, 2004.
- [21] B. Knopf, H. Held, and H. J. Schellnhuber. Forced versus coupled dynamics in earth system modelling and prediction. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004. eingereicht bei Nonlinear Processes in Geophysics.
- [22] R. Knutti, T. F. Stocker, F. Joos, and G. K. Plattner. Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles. *Nature*, 416, 2002.
- [23] G. Krinner and C. Genthon. GCM simulations of the Last Glacial Maximum surface climate of Greenland and Antarctica. *Climate Dynamics*, 14, 1998.

- [24] E. N. Lorenz. Irregularity: A fundamental property of the atmosphere. *Tellus*, 36A:98–110, 1984.
- [25] J. Murphy, D. M. Sexton, D. N. Barnett, G. S. Jones M.J. Webb, M. Collins, and D. Stainforth. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, 430(3):768–772, 2004.
- [26] L. M. Pecora and T. L. Carroll. Synchronization in chaotic systems. *Physical Review Letters*, 64:821–824, 1990.
- [27] L. M. Pecora, T. L. Carroll, G. A. Johnson, D. Mar, and J. F. Heagy. Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications. *Chaos*, 7(4):520–543, 1997.
- [28] A. Pikovsky and P. Grassberger. Symmetry breaking bifurcation for coupled chaotic attractors. *Journal of Physics A*, pages 4587–4597, 1991.
- [29] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths. *Synchronization, a Universal Concept in Nonlinear Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [30] A. Pikovsky and V. G. Shekhov. Universal behaviour of two coupled circle maps. *Journal of Physics A*, 24, 1991.
- [31] C. P. Robert and G. Casella. *Monte Carlo Statistical Methods*. Springer, New York, 1999.
- [32] M.G. Rosenblum and A.S. Pikovsky. Detecting direction of coupling in interacting oscillators. *Physical Review E*, 64, 2001.
- [33] P. Stier, J. Feichter, S. Kinne, S. Kloster, and E. Vignati. The aerosol-climate model ecam5-ham. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 4, 2004.
- [34] L. van Veen, T. Opsteegh, and F. Verhulst. Active and passive ocean regimes in a low-order climate model. *Tellus*, 53A, 2001.
- [35] P. Walley. *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*. Chapman and Hall, London, 1991.
- [36] A. T. Wittenberg and J. L. Anderson. Dynamical implications of prescribing part of a coupled system: Results from a low order model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 5:167–179, 1998.
- [37] R. Wu and B. P. Kirtman. Impact of Indian Ocean on the Indian Summer Monsoon-ENSO relationship. *Journal of Climate*, 17:3037–3054, 2004.
- [38] G. Yohe, N. Andronova, and M. Schlesinger. CLIMATE: To Hedge or Not Against an Uncertain Climate Future? *Science*, 306(5695):416–417, 2004.
- [39] Zhigang Zheng, Gang Hu, and Bambi Hu. Phase slips and phase synchronization of coupled oscillators. *Physical Review Letters*, 81(24):5318–5321, 1998.
- [40] K. Zickfeld. *Modelling large-scale singular climate events for Integrated Assessment*. PhD thesis, Universtät Potsdam, 2004.