

JAHRESZWISCHENBERICHT

"Quantifizierung von Ungenauigkeiten regionaler Klima- und Klimaänderungssimulationen" (QUIRCS)

Zuwendungsempfänger: Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Umweltmeteorologie
Projektleiter: Klaus Keuler, Mitarbeiter: Alexander Block

Kennzeichen: 01 LD 0026

Vorhaben: QUIRCS

Laufzeit: 01.10.2001 – 31.09.2005

Berichtszeitraum: 01.01.2003 – 31.12.2003

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Arbeitsetappen

- a) Die Simulationen des Klimas von Mitteleuropa für den Zeitraum 1979-1993 mit den Modellen der Projektpartner BTU, IMK, MPI wurden mit verschiedenen Referenzdaten, das sind Beobachtungen der CRU¹, ERA-Daten² sowie hoch aufgelöste klimatologische Felder und Häufigkeiten des DWD, verglichen.
- b) Die Liste der klassischen Klimaelemente (Luftdruck, Lufttemperatur, Tagesmaximum und Tagesminimum der Lufttemperatur, Tagesamplitude, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, Niederschlag, Bewölkung und Sonnenscheindauer) wurde einerseits auf die verfügbaren Referenzdaten reduziert und andererseits erweitert mit solchen physikalischen Größen, die aus praktischen Gründen nicht zum Beobachtungsprogramm von Wetterstationen gehören, aber in Atmosphärenmodellen verfügbar sind und das Klima physikalisch bestimmen. Dazu zählen Globalstrahlung, Gegenstrahlung, turbulenter Wärmestrom, Bodenwärmestrom, Verdunstung. Hinzu kommen abgeleitete Häufigkeiten wie zum Beispiel die Zahlen der Sommertage, Frosttage, Tage mit Niederschlag pro Jahr an einem Ort.³
- c) Für die Auswertungen der Simulationen und die Vergleiche mit den Referenzdaten wurde ein Programmpaket (evaluation-tool) entwickelt, womit die statistischen Maße⁴ für 15 Jahre (oder einen Teil dieses Zeitraumes) der Klimaelemente einer jeden Simulation und die Abstands-

¹ Die Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über Deutschland (DWD-area) und von der Climate Research Unit (CRU) der University of East Anglia über den Landflächen Mitteleuropas (CRU-area) sind Referenzdaten. Sie sind unabhängig von Atmosphärenmodellen.

² Die ERA-Daten sind Re-Analysen des ECMWF und ergänzen die Referenzdaten. Sie wurden als Anfangs- und Randwerte für die numerische Wettervorhersage erzeugt und werden auch als Antriebsdaten für Simulationen mit regionalen Klimamodellen verwendet. Sie sind keine Beobachtungsdaten, sondern eine sich im Abstand von 12 Stunden wiederholende Kurzfristsimulation des Zustandes der Atmosphäre und enthalten neben den beobachtbaren auch die sonst nicht verfügbaren abgeleiteten Wetterelemente des Atmosphärenmodells über Land- und Meeresflächen.

³ Vergl. die Liste aller Klimaelemente in Anlage 1 zum Zwischenbericht 2002 von BTU Cottbus zu diesem Projekt.

⁴ Zu den statistischen Maßen gehören Jahres- und Monatsmittelwerte der horizontalen Verteilung eines Klimaelementes, der Jahresgang des Gebietsmittels für verschiedene Gebietsmasken, Histogramme der Differenzen zwischen mehreren Simulationen. Zwei Simulationen werden mit der mittleren absoluten oder relativen Differenz sowie mit Häufigkeiten der Differenzen verglichen.

maße des Vergleichs von zwei Simulationen bzw. einer Simulation mit entsprechenden Referenzdaten berechnet werden.

- d) Zur Visualisierung der Ergebnisse wird ein Programmpaket basierend auf der Software IDL fortlaufend weiterentwickelt, mit dem sich sowohl die horizontale Verteilung eines zeitlichen Mittels (z.B. klimatologisches Jahresmittel) eines Klimaelementes als auch die Differenz dieses Klimaelementes zwischen zwei Simulationen bzw. einer Simulation und einem Referenzdatensatz über Mitteleuropa oder einem beliebigen Teilgebiet (z.B. Deutschland) darstellen lassen. Zusätzlich können Histogramme der Häufigkeitsverteilungen der Differenzen zwischen zwei Datensätzen und die Jahregänge (aus den 12 Monatsmitteln) von Flächenmitteln der Klimaelemente erzeugt werden.
- e) Das Klima wird herkömmlich vor allem mit den messbaren Klimaelementen Lufttemperatur T_{2m} , Niederschlag RR und auf Meeresebene reduzierter Luftdruck P_{NN} beschrieben. In den Klimamodellen werden auch die o. g. abgeleiteten, oft nicht direkt messbaren Größen simuliert. Die Flächenplots von Jahresmitteln und Monatsmitteln dieser abgeleiteten Klimaelemente erlauben einen Überblick über die Güte jener Prozesse, die zu dem in T_{2m} , RR und P_{NN} beschriebenen Klima Mitteleuropas führen.
- f) Die quantitativen Ungenauigkeiten dieser anderen Klimaelemente sind interessant, wenn es darum geht, die regionalen Klimamodelle zu verbessern, numerische Instabilitäten und Wechselwirkungen zwischen skaligen und subskaligen Prozessen zu berücksichtigen, sich zwischen expliziter Modellierung und Parametrisierung nicht-adiabatischer Prozesse der Atmosphäre zu entscheiden, oder das regionale Klima und seine Änderungen in Ursache und Wirkung zu beschreiben. Hierfür sind Flächenplots der abgeleiteten Klimaelemente (insbesondere für Gebiete der europäischen Randmeere) bei den Entwicklern der Modelle und bei Klimatologen sicher sehr willkommen.
- g) Die quantitativen Ungenauigkeiten der Felder T_{2m} und RR zu bewerten und damit Szenarien von Klimaänderungen sichern zu können verlangt, die Komponenten der Wärmebilanz der Erdoberfläche und deren Verdunstung zu kennen. Die Simulationsmodelle erzeugen Felder der Strahlungsbilanz, des turbulenten Wärmestroms, der Verdunstung der bewachsenen Erdoberfläche und des Bodenwärmestroms. Diese Daten sollen ebenfalls ausgewertet, und innerhalb der verschiedenen Simulationen und mit verfügbaren Referenzdatensätzen verglichen werden.
- h) Erste Daten der Strahlungsflüsse aus Satellitenbeobachtungen (ISCCP-Daten) wurden vom Projektpartner TU Dresden bereits zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurde begonnen, die Wärmebilanzen der Simulationen mit denen des "Atlas of the surface heat balance of the continents" (D. Henning, 1989) zu vergleichen. Die Daten des Atlas wurden mit Hilfe von klassischen empirischen Modellen (Albrecht, Penman, und Budyko) aus Beobachtungen abgeleitet.

Ergebnisse

Für den betrachteten 15-jährigen Zeitraum liegen alle Referenzdaten sowie die Ergebnisse der drei Klimasimulationen für eine Reihe von Klimaelementen – z.B. Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlag, Wind, turbulenter Wärmefluss, etc. - in Form gerasterter Monatsmittelwerte mit einer horizontalen Auflösung $1/6$ Grad vor. Von den umfangreichen quantitativen Auswertungen sollen im Folgenden exemplarisch einige interessante Ergebnisse dargestellt und erläutert werden.

Luftdruck

Der mittlere Jahrgang des auf Meeresebene reduzierten Luftdrucks über Deutschland (Anlage 1) zeigt Differenzen zwischen den Daten von DWD, BTU, IMK, MPI die im Jahreslauf annähernd gleich bleiben. Auch die Jahregänge von sechs ca. 1° mal 1° großen Teilgebieten um die Orte Schleswig, Lindenberg, Essen, Meiningen, Stuttgart und München herum (hier nicht dargestellt) zeigen ähnliche Abweichungen in der Massebilanz, die auf Unterschiede in der

Randwertversorgung und in der Reduktion des Bodendruckes von der Modell-Orographie auf Meeresniveau zurückzuführen sind. Insgesamt bewegen sich die Abweichungen zwischen den verschiedenen Datensätzen im Bereich von ca. 2 hPa

Lufttemperatur

Die Abweichungen der Jahresmitteltemperatur zwischen Modell- und Referenzdaten schwanken im Bereich ± 1.5 K. Die horizontale Verteilung der Differenz (siehe Anlage 2a) zeigt Zusammenhänge mit der Orographie und über die geographische Breite auch mit der Globalstrahlung. Aus den Häufigkeitsverteilungen der Gitterpunktdifferenzen ist zu ersehen (Anlage 2b), dass die BTU-Simulation in der Jahresmitteltemperatur für 85 % des Gebietes Deutschlands um weniger als 0.5 K von den entsprechenden DWD-Daten abweicht, diese also nahezu optimal wiedergibt. Über alle Landpunkte des Referenzgebietes hinweg sind die Abweichungen jedoch deutlich größer. So variieren die 85 % Perzentile der absoluten Differenzen zwischen den Simulationen und den CRU-Beobachtungen über dem ganzen CRU-Gebiet (siehe Anlage 2c) zwischen 0.9 K (BTU-CRU) und 1.5 K (IMK-CRU). Doch auch die beiden Referenzdatensätze zeigen Abweichungen voneinander, die in der gleichen Größenordnung liegen, wie ihre Unterschiede zu den Modellsimulationen. So sind für rund 20 % der von beiden Datensätzen überdeckten Fläche Deutschlands die Unterschiede in den Mitteltemperaturen größer als 0.5 K

Niederschlag

Die Jahressumme der IMK-Simulation hat von den DWD-Beobachtungen über 85 % der Teilregion Deutschland eine relative Abweichung von weniger als 19 %. Das gleiche Perzentil weist auch die relative Differenz zwischen den zwei Referenzdaten (CRU und DWD) auf. Als Folge der Abweichungen zwischen den beiden Referenzdatensätzen sind die Perzentile der relativen Abweichungen der Modellsimulation bezogen auf die CRU-Daten etwas höher, nämlich bei 25 % für IMK und bei 28 % bei BTU und MPI (85 % Perzentil für Teilregion Deutschland). Dies verdeutlicht, dass bei der Beurteilung der quantitativen Unsicherheiten der Simulationen auch die vorhandenen Unsicherheiten/Unterschiede in den verwendeten Referenzdaten berücksichtigt werden müssen.

Die Jahressumme der Monatssummen der 3 Simulationen und der CRU-Beobachtungen zeigen die größten Abweichungen im Sommer. Die horizontale Verteilung der Differenz der Jahressummen von Simulation minus Beobachtung (Anlage 3) belegt die Abhängigkeit der Ergebnisse vom ausgewählten Referenzdatensatz und weist auf noch vorhandene Defizite der Simulationen insbesondere bei der Wiedergabe orographisch bedingter Niederschläge hin.

Bodennaher turbulenter Wärmefluss

Analysiert wird neben den turbulenten Flüsse fühlbarer Wärme SEN und latenter Wärme LAT insbesondere der mit ihrer Summe $TUR = SEN + LAT$ verbundene Netto-Wärmetransport vom Boden in die Atmosphäre. Zur Bestimmung der Unsicherheiten dieser Komponenten werden die turbulenten Flüsse der drei Simulationen und die entsprechenden ERA-Daten miteinander verglichen. Aufgrund ihres direkten und indirekten Einflusses auf die atmosphärischen Prozesse sind größere Abweichungen in den turbulenten Wärmeflüssen bei der Analyse und Interpretation anderer Klimatelemente zu berücksichtigen.

- a) Die Summe TUR folgt über Land über alle geographischen Breiten im Jahresgang der Globalstrahlung. Bezogen auf das Gebietsmittel Deutschland (siehe Anlage 4) ist TUR in den ERA-Daten maximal mit 118 W/m^2 im Juni und Juli und minimal nahe 0 W/m^2 im Dez./Jan. Die IMK-Simulation weicht von den Referenzdaten von April bis September um $15 \dots 20 \text{ W/m}^2$ nach unten ab. Hingegen weisen MPI und BTU im Sommer um $10 \dots 20 \text{ W/m}^2$ höhere Werte und im Winter leicht geringere Werte als die ERA-Daten auf, was zu einer erheblich größeren Amplitude im Jahresgang des turbulenten Wärmeflusses in diesen Simulationen führt.

- b) Über den Randmeeren Mitteleuropas ist TUR maximal im November (Adria, Nordsee, Ostsee, Biskaya $> 100 \text{ W/m}^2$, Mittelmeer $> 140 \text{ W/m}^2$) und minimal im Mai (Adria und Nordsee $< 20 \text{ W/m}^2$, Ostsee $< 5 \text{ W/m}^2$, Biskaya $< 50 \text{ W/m}^2$, nördliches Mittelmeer $< 30 \text{ W/m}^2$).
- c) Die Jahrgänge der turbulenten Wärme Flüsse unterscheiden sich erheblich zwischen den drei Simulationen über kleineren Meeres- oder Land-Regionen. Die nähere Analyse zeigt, dass es größere Unterschiede zwischen den Modellen sowohl bei den am Erdboden ankommenden Strahlungskomponenten, als auch bei deren Umsetzung in sensible und latente Anteile des turbulenten Wärmestroms gibt. Besonders auffallend sind die großen Differenzen zwischen den Simulationen und den Referenzdaten über den Randmeeren (vergl. Anlage 5) obwohl hier in allen Simulationen die gleichen Meeresoberflächentemperaturen vorgegeben werden und damit die Untergrundbedingungen nahezu gleichwertig sein müssten. Eine detaillierter Untersuchung dieses Phänomens erscheint lohnenswert für eine substantielle Verbesserung der Simulationsmodelle. Die Abweichungen von SEN und LAT entlang der Küstenlinie illustrieren das Problem der unterschiedlichen horizontalen Auflösung der Modellsimulationen und der ERA-Daten

Windgeschwindigkeit V_{10m}

- a) Der Wert für die in 10 m Höhe über dem Erdboden geltende Windgeschwindigkeit V_{10m} ist in den drei Simulationen im Jahrgang des Gebietsmittels Deutschland systematisch um etwa 1 m/s größer als in den Beobachtungen des DWD (Anlage 6). Das Phänomen lässt sich allein mit der Aufbereitung der Beobachtungsdaten nicht erklären. In den Simulationen wird V_{10m} aus den in den Modellen vorhandenen Variablen nach der Theorie der turbulenten Grenzschicht im Wege einer Modell-Output-Diagnose abgeleitet. Das darin angenommene vertikale Windprofil hängt von der thermischen Schichtung der Bodenschicht ab, die ihrerseits von modell-skaligen Parametern abhängt. Ausserdem repräsentiert jeder Modellwert immer das räumliche Mittel über eine gesamte Gitterbox (hier von rund $18 \times 18 \text{ km}^2$). Der an einer Wetterstation beobachtete Wind gilt hingegen streng genommen nur für einen Punkt in einer mikroskalig strukturierten Umgebung. Weitere Untersuchungen zu diesem Problem müssten an so verschiedenen Dingen wie Grenzschichttheorie, Skalenproblemen, Vorschriften für die Standorte von Windmasten, Diagnose des Modell-Output und adäquater Parametrisierung der Eigenschaften der Erdoberfläche anknüpfen.
- b) Andere Fehler, die sich aus der Berechnung des Tagesmittels an Klimastationen aus nur 3 Werten ($[V_7+V_{14}+V_{21}]/3$) oder aus der Verteilung der Windstärke innerhalb der Klassengrenzen einer Beaufort-Windstärke ergeben, haben sich nach eingehender Untersuchung als vernachlässigbar erwiesen.
- c) In den Windfeldern der Simulationen von BTU und MPI, von IFU nur im Winter, sind die Mittelgebirge nicht, aber die großen Städte deutlich zu erkennen. In den Simulationen ist die Rauigkeitshöhe z_0 in Abhängigkeit von Orographie und Bebauung vorgegeben. Diese Vorgabe sollte überprüft werden, denn die DWD-Beobachtungen enthalten Windgeschwindigkeiten, die in den Hochlagen der Mittelgebirge größer sind als in den benachbarten tiefer gelegenen Regionen, aber sie enthalten keinen Hinweis auf die Lage der Großstädte.

2. Aktueller Stand und weiteres Vorgehen

- (a) Von den drei Simulationen (BTU, IFU, MPI) mit regionalen Klimamodellen für Mitteleuropa werden der Jahresgang des Flächenmittels der Klimaelemente und die horizontale Verteilung des Jahresmittels und der Monatsmittel berechnet, dargestellt, mit den Referenzdaten auf verschiedenen räumlichen Skalen verglichen und kommentiert. Dabei wird auch auf Besonderheiten von Teilregionen eingegangen.
- (b) Die Unterschiede der horizontalen Verteilungen und der Jahresgänge zwischen Simulationen und Referenzdaten werden anhand einer Reihe von Abstandsmaßen quantifiziert, dargestellt und kommentiert.
- (c) Die Abweichungen zwischen zwei Simulationen werden auf statistische Signifikanz geprüft und die Häufigkeit bestimmter Abweichungen in Form von Histogrammen dargestellt und kommentiert.
- (d) Von einigen abgeleiteten Klimaelementen werden zusätzliche statistische Maße berechnet und dargestellt.
- (e) Diese Arbeiten sind methodisch entwickelt, zum großen Teil fertig und werden in 2004 vervollständigt. Die Ergebnisse werden jetzt für die Modellentwickler und für jene dargestellt, die an der Verwendung der Simulationen des regionalen Klimas Interesse haben.
- (f) Nach Möglichkeit wird zu den Simulationsmodellen noch das CLM hinzugenommen. Hierbei handelt es sich um eine Klimaversion des Lokal-Modells des DWD, das hier für die operationelle Wettervorhersage eingesetzt wird und dessen Eignung für kontinuierliche Langzeitsimulationen geprüft werden soll. Damit entstehen weitere Möglichkeiten des Vergleichs mit den anderen Simulationen.

3. Aussichten für das Erreichen der Ziele

Der Projektverlauf liegt im Zeitplan, alle wesentlichen "Meilensteine" wurden bisher erreicht. Es hat sich herausgestellt, dass nicht für alle ursprünglich ausgewählten Klimaparameter ein Vergleich zwischen Simulation und Beobachtung sinnvoll ist (z.B. Anzahl von Sturmtagen).

Bei einigen Klimaelementen (Taupunkttemperatur, Bewölkung, Strahlung) ist der Umfang von verfügbaren Daten aus Beobachtungen incl. ERA-Referenzdaten nicht so groß wie bei Lufttemperatur oder Niederschlag, so dass die Ungenauigkeit der Simulationen ggf. nur mittelbar bewertet werden kann.

Verzögerungen hat es bei der Bereitstellung der Antriebsdaten für die geplanten Klimaänderungsläufe gegeben. Die vorhandenen globalen Simulationen erwiesen sich als nicht geeignet. Vom Partner MPI wurden daher zunächst zusätzliche Sensitivitätstests mit dem Globalmodell ECHAM4 durchgeführt, wodurch eine geeignete Konfiguration für die großskaligen Klimasimulationen gefunden werden konnte. Die für die regionalen Szenariensimulationen erforderlichen Antriebsläufe sind inzwischen abgeschlossen worden, so dass die Regionalsimulationen bereits anlaufen konnten. Die hoch aufgelösten Klimaänderungsszenarien für Deutschland können daher wie geplant im Rahmen dieses Projektes erstellt werden.

4. Ergebnisse Dritter

Neue Ergebnisse Dritter, die für die Durchführung des Projektes relevant wären, bzw. eine Anpassung der Projektplanung erfordern würden, sind nicht bekannt.

5. Änderungen an der Zielsetzung

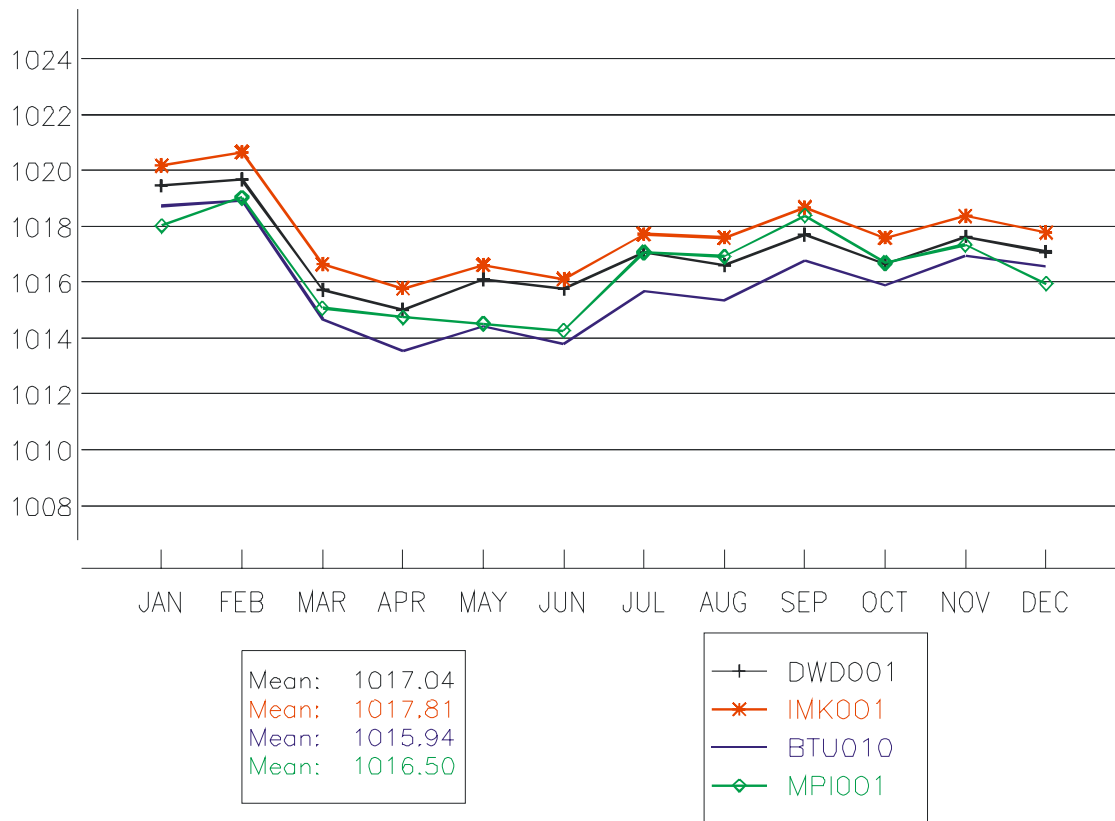
Eine Änderung der Zielsetzung des Gesamtprojektes ist nicht erforderlich.

6. Fortschreibung des Verwertungsplanes

Klimaelemente, die über Landflächen nach dem konventionellen Beobachtungsprogramm nicht und über dem Meer überhaupt nicht beobachtet werden, stehen jetzt mit den Simulationen flächendeckend für Mitteleuropa und seinen Randmeeren mit horizontaler Auflösung von $(1/6)^\circ$ für weitere klimatologische Studien zur Verfügung. Sowohl konventionelle Klimadaten als auch die Simulationen haben ihre eigenen Unsicherheiten. Der Dialog zwischen Klimatologen und Modellentwicklern sollte möglichst bald dahin kommen, die Unsicherheiten der Daten zu erklären und zu verringern und mit Hilfe der Ergebnisse dieses Projektes die in den Atmosphärenmodellen verwendeten physikalischen Ansätze zu verbessern.

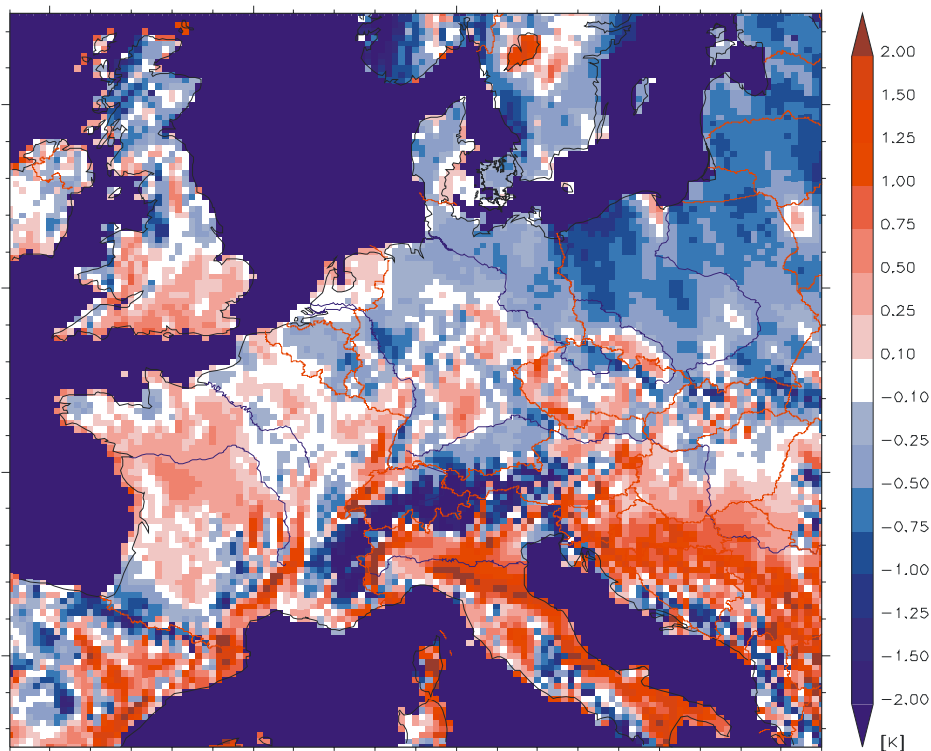
Anlage 1

Luftdruck, mittlerer Jahresgang für 1979-93, drei Simulationen und Beobachtungen DWD, räumliches Mittel für Deutschland, 1044 Gitterpunkte des 1/6 Grad Gitters.



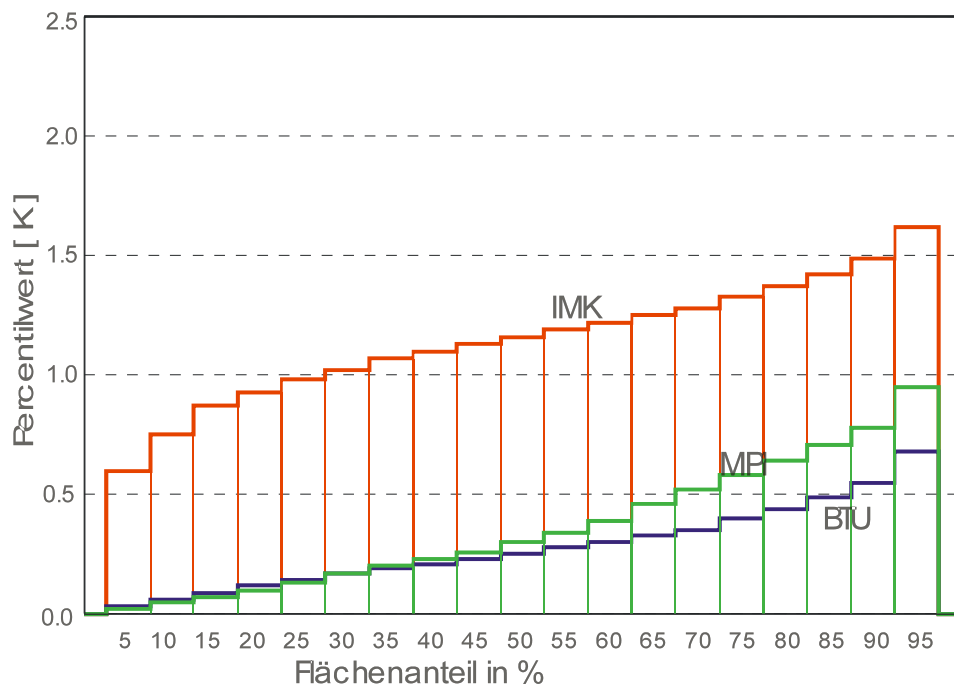
Anlage 2a

Lufttemperatur, 15-jähriges Mittel 1979-93, Differenz der Simulation BTU und der Beobachtung von CRU



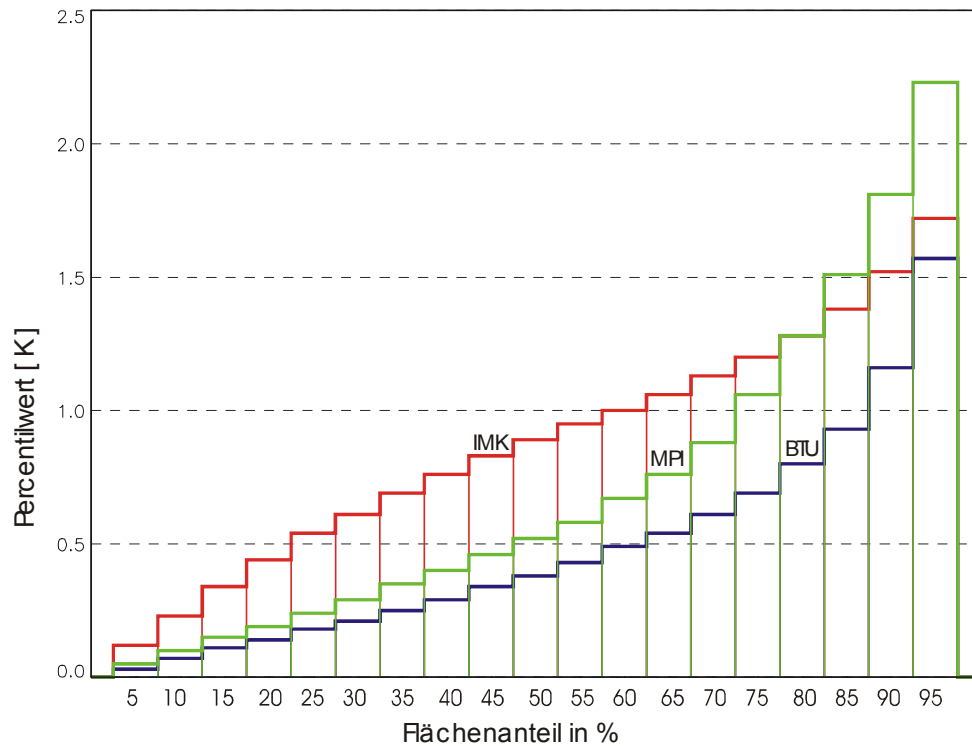
Anlage 2b

Lufttemperatur, Percentile der absoluten Differenz der drei Simulationen zu DWD-Beobachtungen, 1044 Gitterpunkte über Deutschland.



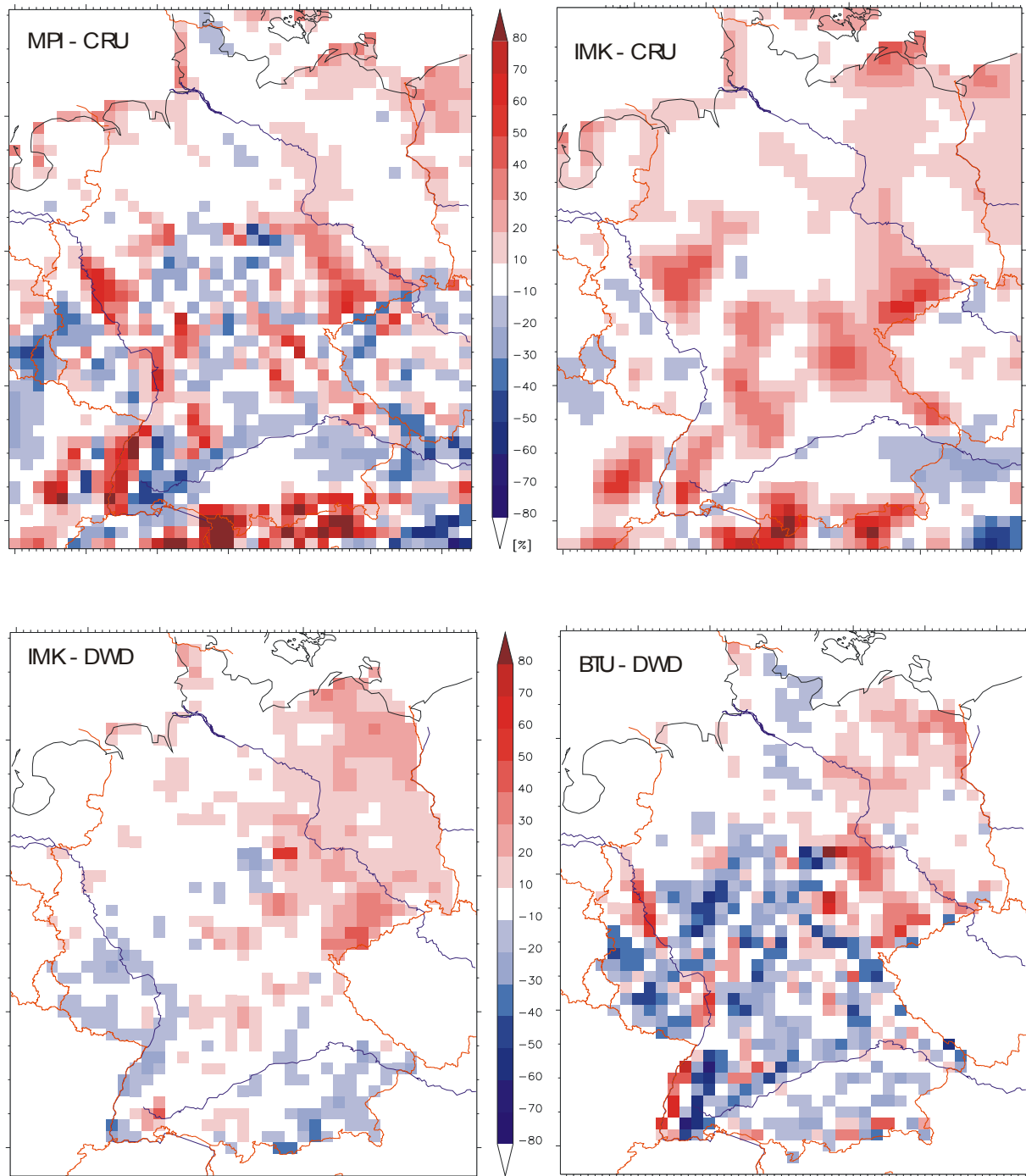
Anlage 2c

Lufttemperatur, Percentile der absoluten Differenz der drei Simulationen zu CRU-Beobachtungen, 9612 Gitterpunkte des CRU-Gebietes



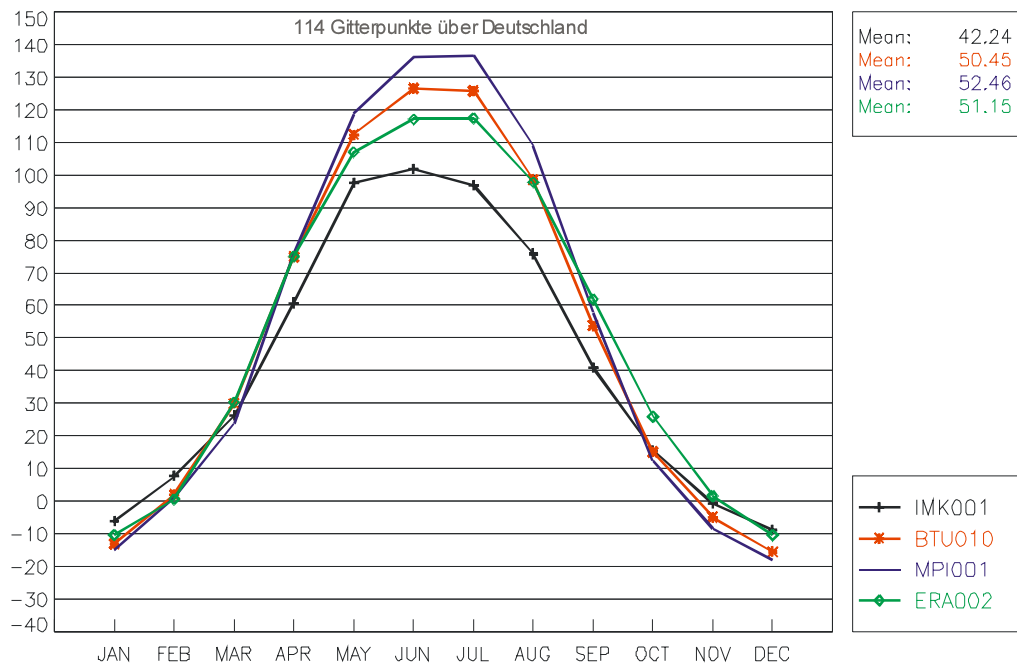
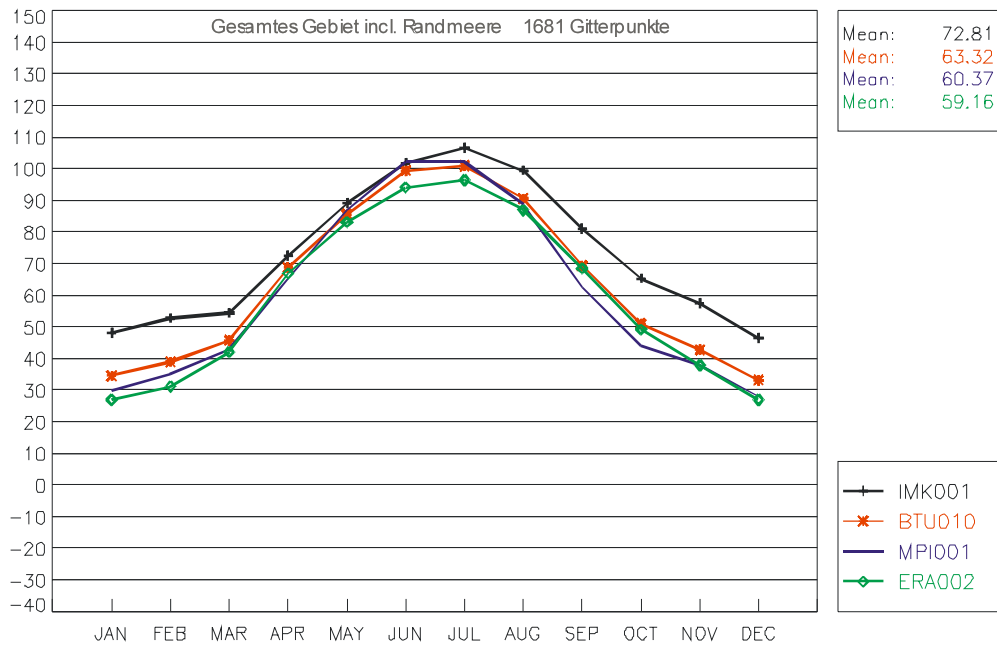
Anlage 3

Niederschlag, Jahressumme, relative Differenz zwischen Simulationen und Beobachtungen CRU bzw. DWD.



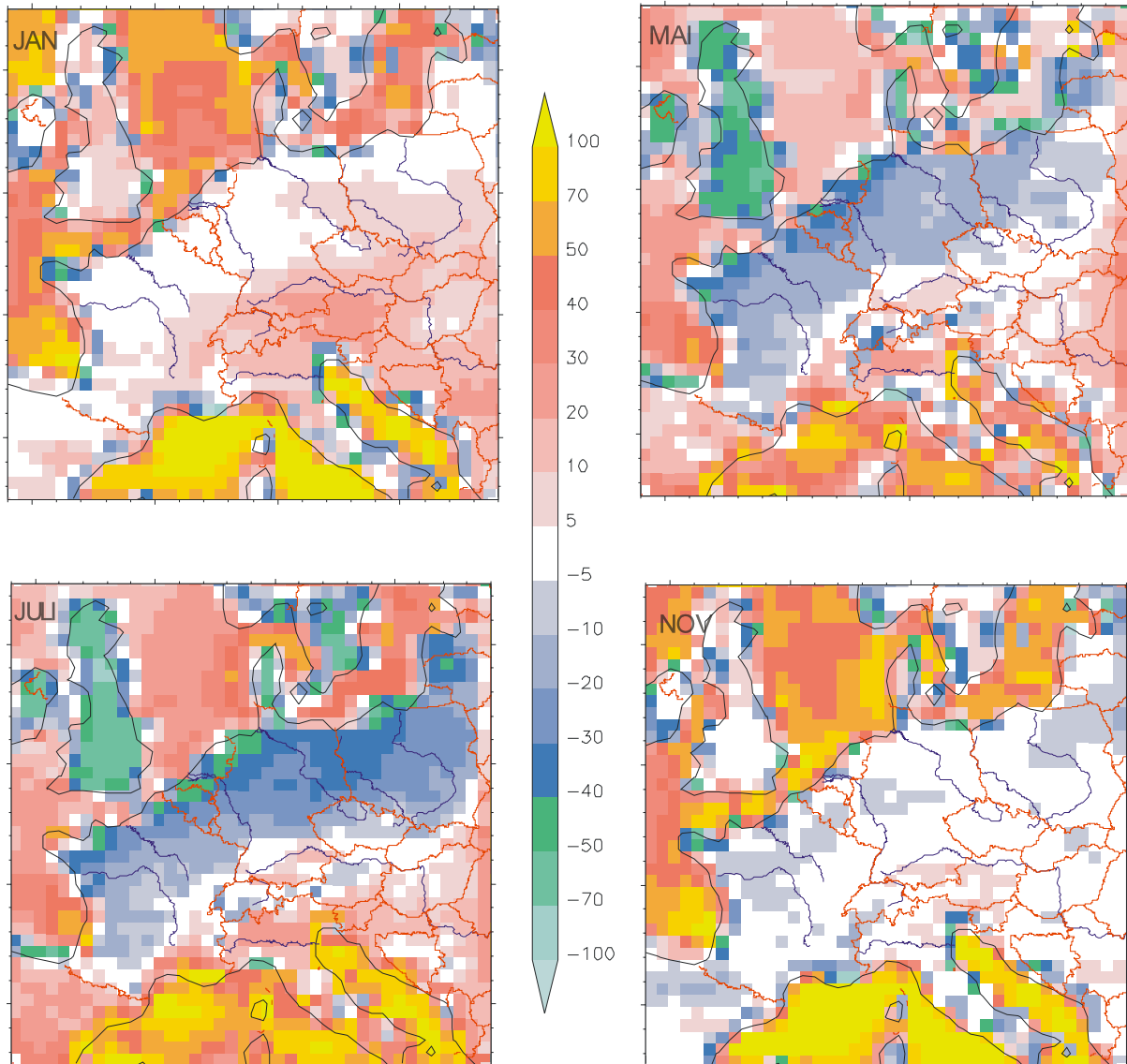
Anlage 4

Turbulenter Wärmestrom $TUR = SEN + LAT$, mittlerer Jahresgang aus Monatsmitteln, 1979-93, drei Simulationen und Referenzdaten von ERA, oben: das gesamte Gebiet 41×41 Punkte incl. Randmeere (1/2 Grad horizontale Auflösung), unten: nur Deutschland, 114 Landpunkte



Anlage 5

Turbulenter Wärmestrom $TUR = SEN + LAT$, in W/m^2 , absolute Differenz zwischen Simulation IMK und Referenzdaten ERA, 15jähriges Monatsmittel (1979-93) im Januar und Juli (Minimum und Maximum über dem Land) sowie im Mai und November (Minimum und Maximum über den Randmeeren)



Anlage 6

Windgeschwindigkeit (v_{10m}), mittlerer Jahresgang für 1979-93, drei Simulationen und unterschiedlich aufbereitete Datensätze des DWD, räumliches Mittel für Deutschland, 1044 Gitterpunkte des 1/6 Grad Gitters. Die DWD-Datensätze haben unterschiedliche räumliche Verteilungen, zeigen jedoch alle ein sehr ähnliches Flächenmittel für Deutschland.

