

Anwendung der Schrittweisen Regression auf  
Temperatur-Zeitreihen zur Separierung anthropogener  
und natürlicher Einflüsse

Diplomarbeit  
von Sven Brinckmann

vorgelegt beim Fachbereich Geowissenschaften/ Geographie der  
Johann-Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt am Main

2005



# Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	1
1. Das Klimasystem und klimarelevante Einflüsse.....	3
1.1 Variationen der solaren Strahlung.....	3
1.2 Explosiver Vulkanismus.....	4
1.3 El Niño – Southern Oscillation.....	5
1.4 Nordatlantik-Oszillation.....	6
1.5 Anthropogene Treibhausgase.....	6
2. Methodik.....	9
2.1 Schrittweise Regression.....	9
2.2 Hauptkomponenten-Analyse.....	11
2.3 Berechnung raumzeitlicher Signalfelder.....	13
2.4 Erklärte Varianz.....	14
2.5 Signifikanz der Signale.....	16
2.6 Signifikanz der erklärten Varianzen.....	16
2.7 Residuen-Analyse.....	17
2.8 Zeitlich gleitende Analysen.....	17
3. Datengrundlage.....	18
3.1 Zielgrößen.....	18
3.2 Einflussgrößen.....	21
4. Analyse-Ergebnisse und Interpretation.....	27
4.1 Globale Gebietsmittel.....	27
4.1.1 Jahresmittel 1901-2003.....	28
4.1.2 Saisonale Mittel 1901-2003.....	43
4.1.3 Jahresmittel 1881-2003.....	47
4.2 Einzelzeitreihen Deutschland.....	51
4.2.1 Jahresmittel.....	51
4.2.2 Saisonale Mittel.....	60

5. Bewertung.....	75
Literaturverzeichnis.....	77
Anhang.....	79
A: Ergänzende und Signifikanz- und Residuenanalyse.....	79
B: Zeitreihen der globalen Gebietsmittel.....	80
C: Einzelzeitreihen Deutschland.....	98
D: Globale Gebietsmittel: Erklärte Varianz.....	103
E: Globales Mittel und Deutschland-Mittel.....	105

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Zeitreihen der bodennahen Lufttemperatur, zum einen ein Datenfeld globaler Gebietsmittel, zum anderen Daten einzelner deutscher Stationen, mit der Schrittweisen Regression – einer statistischen Modellierungsmethode, die versucht, zeitliche Variabilitäten einer Zielgröße (hier: Temperatur) bestimmten Einflüssen zuzuordnen – analysiert. Als mögliche Einflussgrößen wurden der Vulkanismus, solare Strahlungsschwankungen, das ENSO-Phänomen, die Nordatlantik-Oszillation sowie der Einfluss durch anthropogene Treibhausgase berücksichtigt. Die Untersuchungen wurden unter anderem zeitlich gleitend durchgeführt, wobei folgende Fragestellung im Mittelpunkt des Interesses stand: Lässt sich vor dem Hintergrund des deutlichen Konzentrationsanstiegs anthropogener Treibhausgase auch ein zunehmendes Gewicht dieses Einflusses in den Regressions-Modellen feststellen?

Die Analysen der globalen Gebietsmittel mit der Schrittweisen Regression liefern relativ hohe erklärte Varianzen (30% für das Gesamtdatenfeld 1881-2003) durch die anthropogenen Treibhausgase (GHG). Die zugehörigen Signale erreichen im Jahr 2003 (relativ zu 1881) Werte zwischen +0,1 K und +2,1 K (Mittelwert: +0,68 K), wobei die höchsten Werte in den kontinental geprägten Gebieten der mittleren bis hohen nördlichen Breiten vorliegen (im Wintermittel dort Werte bis +3,5 K). Auch der solare Einfluss (SOL) kann mit Signalwerten im Jahr 1981 (relativ zu 1883) von -0,3 K bis +1,0 K (Mittelwert: +0,16 K) offenbar einen Teil des globalen Temperatur-Anstiegs erklären. Die ermittelten erklärten Varianzen (EV) liegen mit 22% für das Gesamtdatenfeld 1881-2003 aber insgesamt niedriger als beim Treibhausgas-Einfluss. Interne Wechselwirkungen wie das ENSO-Phänomen und die Nordatlantik-Oszillation (NAO) nehmen regional beachtlichen Einfluss auf die Temperaturen, insbesondere die NAO mit Signalwerten bis 1,0 K im Wintermittel (im Gebiet Europa). Global wirksam, aber zeitlich eingeschränkt ist der Einfluss durch den explosiven Vulkanismus. Nach Ausbruch des Pinatubo im Jahre 1991 liegen die Signalwerte für die Jahre 1992 und 1993 verbreitet zwischen -0,1 und -0,7 K.

Bei den zeitlich gleitenden Berechnungen standen insbesondere die konkurrierenden Einflüsse SOL und GHG im Blickpunkt. Der zeitliche Verlauf der EV bei Berücksichtigung von jeweils einem der Einflüsse lässt sich wie folgt interpretieren: Ein erster Anstieg des globalen Temperatur-Mittels in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kann von beiden Einflüssen erklärt werden. Daran schließt sich eine Abkehr von diesem Temperatur-Trend an, die im globalen Mittel bis Ende der Siebziger Jahre zu beobachten ist und wahrscheinlich dem überlagernden Einfluss durch anthropogen verursachtes troposphärisches Sulfat-Aerosol [3] zuzuschreiben ist. Mit Berücksichtigung dieses Zeitraumes sinken entsprechend die EV beider Einflüsse ab. Seit etwa 1980 wird im globalen Mittel ein zweiter Anstieg der Temperaturen beobachtet, der sich aufgrund einer fehlenden Trendkomponente in der solaren Einflussgröße seit dem Maximum von 1981 allein durch den anthropogenen Treibhausgas-Einfluss erfassen lässt. Entsprechend steigen die EV durch GHG in den jüngeren Zeitintervallen wieder deutlich an, während SOL immer weniger Varianz erklären kann.

Im zweiten Teil wurden ausgesuchte Einzelzeitreihen Deutschlands untersucht. Diese weisen im Vergleich zu den globalen Gebietsmitteln einen höheren stochastischen, also zufälligen Varianzanteil auf. Entsprechend können die anthropogenen Treibhausgase hier insgesamt weniger Varianz in den Temperaturdaten erklären – insbesondere gilt dies für die 80-jährig zeitlich gleitenden Analysen. Die zugehörigen Temperatur-Signale erreichen jedoch hohe Werte bis +1,3 K im Jahresmittel. Im saisonalen Vergleich liefert das Wintermittel mit bis zu +1,8 K die höheren Werte (gegenüber +1,4 K im Sommer, alle Signalwerte für Hohenpeißenberg 1891-2003). Als sehr bedeutsamer Einfluss vor allem in den Wintermonaten bestätigt sich die NAO: EV bis 46% und Signale bis über 3 K werden für die nördlichen und östlichen Stationen berechnet, bei den südlichen und westlichen Stationen fallen die Werte etwas niedriger aus.

Die Ergebnisse der zeitlich gleitenden Analysen der Jahresmittel lassen sich ähnlich interpretieren wie die entsprechenden Berechnungen zu den globalen Gebietsmitteln. Für die Zeitreihe Hohenpeißenberg 1829-2003 zeigt sich ein erster paralleler Anstieg der EV durch GHG und SOL bei Berücksichtigung des Zeitraumes bis in die frühen Fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts hinein. Eine anschließend

auch in den deutschen Zeitreihen zu beobachtende Abkehr vom positiven Temperatur-Trend führt zur Abnahme des Gewichtes beider Einflüsse in den Regressionsmodellen. Ein neuerlicher Temperaturanstieg seit Ende der Achtziger Jahre wird auch hier hauptsächlich durch den Einfluss anthropogener Treibhausgase erfasst, was sich in einer Zunahme der zugehörigen EV dokumentiert.

## Einleitung

Mit dem Anstieg der Weltbevölkerung, der immer weiter fortschreitenden Industrialisierung, der Zunahme an Wohlstand und Luxusgütern geht ein Anwachsen des anthropogenen Einflusses auf die gesamte Geosphäre einher. Umweltprobleme vielfältiger Art sind Folge dieser Störung natürlicher Gleichgewichte durch den Menschen. Ein sehr dringliches und viel diskutiertes Problem ist der globale Klimawandel, der als Folge anthropogener Einflussnahme, besonders durch Emission von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen gesehen wird [6].

Qualitativ ist der Einfluss dieser anthropogenen Treibhausgase auf das Klima unbestritten [16]. Dennoch bleibt folgende Kernfrage bestehen: Ist der rasche Anstieg der globalen Mitteltemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts hauptsächlich Folge des anthropogenen Wirkens oder bewegen wir uns im Rahmen natürlicher Klimavariabilität? Die Klimageschichte aus der Zeit vor der Industrialisierung gibt darauf erste Antworten. Vor dem Hintergrund der rekonstruierten Mitteltemperaturen der letzten 1000 Jahre (vgl. [6]) ist der instrumentell erfasste Anstieg der vergangenen rund 100 Jahre außergewöhnlich. Allerdings bestehen Probleme bei der Genauigkeit der rekonstruierten Daten, da diese hauptsächlich aus so genannten Proxy-Daten, also indirekten Klimainformationen (vgl. [2]) abgeleitet worden sind, so dass durchaus ein weniger glatter Verlauf der Temperaturen vor dem 20. Jahrhundert denkbar ist.

Mit Hilfe der so genannten physikalischen Klimamodellierung (vgl. [16]) wird der Versuch unternommen, Vorhersagen für den zukünftigen Verlauf des Klimas zu treffen. In solchen Modellen kann der Einfluss zusätzlich eingebrachter Treibhausgase auf das Klima berechnet werden, jedoch sind die Ergebnisse stark abhängig von der Qualität des Modells. Neben den vielen notwendigen Vereinfachungen innerhalb der Modellkonstruktion führen nicht berücksichtigte oder unzureichend verstandene klimarelevante Prozesse (z. B. beim Einfluss der Wolken oder bei der Modellierung des Kohlenstoff-Kreislaufs [21]) zu Ungenauigkeiten.

Als Ergänzung zu den beschriebenen Modellierungen werden auch statistische Methoden herangezogen. Ist der physikalische Zusammenhang ausreichend

verstanden, können bestimmte Einflussgrößen mit klimatologischen Zielgrößen (z.B. der Temperatur) verglichen und strukturelle Zusammenhänge abgeschätzt werden. Eine solche Methode, die so genannte Schrittweise Regression, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit angewendet, um Zeitreihen der Temperatur zu analysieren. Dabei werden, ausgehend von linearen Zusammenhängen, Regressionsbeziehungen zwischen den Temperaturdaten und mehreren potentiellen Einflussgrößen gesucht, um mögliche Einflüsse qualitativ zu erfassen und quantitativ abzuschätzen.

## 1. Das Klimasystem und klimarelevante Einflüsse

Wichtigster Antrieb für alle Prozesse innerhalb des Klimasystems ist die Strahlungsenergie der Sonne. Ein kleiner Teil dieser Strahlung wird bereits in der **Atmosphäre**, ein großer Anteil im Bereich der Ozeane und Seen (**Hydrosphäre**) sowie am Erdboden absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Die geographisch ungleiche Verteilung dieses Wärmeangebots – mit einem Maximum am Äquator und einem Minimum an den Polen – setzt dynamische Prozesse (atmosphärische und ozeanische Zirkulationsmuster) in Gang, die einen Temperatúrausgleich anstreben [16]. Auch die **Biosphäre** bezieht nahezu sämtliche Energie aus der Sonnenstrahlung und nimmt ihrerseits Einfluss auf den Strahlungshaushalt und die damit in Verbindung stehenden dynamischen Vorgänge [16]. Als weitere Teilsysteme des Klimasystems sind noch **Kryosphäre** (Eishülle), **Pedosphäre** (Boden) und **Lithosphäre** (Gesteinshülle) zu nennen. Alle genannten Systeme stehen in verschiedensten Wechselwirkungen miteinander, deren einzelne Prozesse vielfach erst unzureichend verstanden sind. Im Folgenden sollen diejenigen bekannten und auf der Zeitskala von etwa 100 Jahren relevanten Einflüsse auf das Klimasystem erläutert werden, die später bei den Untersuchungen der Temperatur-Zeitreihen Berücksichtigung finden werden. Man unterscheidet dabei zwischen Einflüssen interner Wechselwirkungen und externen Einflüssen, wobei letztere unter anderem dadurch charakterisiert sind, dass sie den globalen Strahlungshaushalt modifizieren.

### 1.1 Variationen der solaren Strahlung

Die Energie, die von der Sonne in Form elektromagnetischer Wellen ausgesendet wird, treibt, wie schon erwähnt, nahezu sämtliche Vorgänge innerhalb des Klimasystems an und ist damit gleichzeitig ein wichtiger Klimafaktor. Der solare Strahlungsfluss am fiktiven oberen Rand der Atmosphäre schwankt in der Größenordnung von weniger als 1‰ (auf der Zeitskala von 100 Jahren) um den Mittelwert der Solarkonstanten. Die Schwankungen stehen im Zusammenhang mit Variabilitäten in den so genannten Sonnenflecken-Relativzahlen (SRZ), deren wichtigster Zyklus etwa 11-14 Jahre beträgt [18].

Am Rande sei erwähnt, dass es bei Betrachtung größerer Zeitskalen zu indirekten Änderungen des solaren Strahlungsflusses zur Erde kommt, da die so genannten Orbital-Parameter der Erde bestimmten Zyklen unterworfen sind (vgl. [21]). Man geht davon aus, dass die resultierenden Änderungen in der räumlichen und jahreszeitlichen Verteilung der Sonnenstrahlung den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten im Quartär initiiert haben. Durch positive Rückkopplungs-Mechanismen könnten sich dadurch trotz der im zeitlichen und globalen räumlichen Mittel kaum geänderten solaren Strahlungsflussdichte deutliche Änderungen des Klimas der Erde eingestellt haben.

## 1.2 Explosiver Vulkanismus

Der explosive Vulkanismus zählt zusammen mit den solaren Strahlungsschwankungen zu den wichtigen externen Klimafaktoren. In Folge starker, explosiver Vulkan-Eruptionen können unter anderem große Mengen Schwefeldioxids in die Stratosphäre gelangen. Das daraus entstehende Sulfataerosol breitet sich der stratosphärischen Zirkulation folgend rasch in zonaler Richtung aus, im Verlaufe einiger Monate auch meridional, so dass dann große Bereiche der Stratosphäre von einem vulkanischen Aerosol-Schleier durchsetzt sind. Die stratosphärische Verweildauer des Sulfats kann mehrere Jahre betragen. Während dieser Zeit führt verstärkte Extinktion der solaren Strahlung im Bereich des Sulfat-Schleiers zu einer stratosphärischen Temperaturerhöhung, während die mittleren Temperaturen in der Troposphäre etwas sinken [4]. Aus den Mengen des eingebrachten Sulfats lässt sich der **Strahlungsantrieb** für die Troposphäre abschätzen.

Das Konzept des Strahlungsantriebes soll verschiedene Einflüsse in ihrer Wirkung auf den Strahlungshaushalt quantifizierbar und damit vergleichbar machen. Im Falle des stratosphärischen Sulfataerosols wird zum einen die Nettoeinstrahlung an der Erdoberfläche etwas verringert, zum anderen aber auch die Abstrahlung von der Erdoberfläche behindert. In der Summe führen beide Effekte zu einem etwas geringeren Energieangebot in der Troposphäre. Man spricht in diesem Fall von negativem Strahlungsantrieb, der sich in Energie pro Zeit und Fläche ( $W/m^2$ )

ausdrücken lässt. Eine quantitative Abschätzung des Strahlungsantriebes verschiedener Einflüsse ist in Kapitel 1.5 dargestellt.

### 1.3 ENSO – El Niño - Southern Oscillation

„El Niño – Southern Oscillation“ (abgekürzt ENSO) umschreibt eine im Bereich des tropischen Pazifiks auftretende atmosphärisch-ozeanische Wechselwirkung. Etwa alle drei bis acht Jahre beobachtet man im tropischen Ostpazifik positive Temperatur-Anomalien des oberflächennahen Ozeanwassers, die auf atmosphärische Strömungs-Anomalien innerhalb der Walkerzirkulation zurückgehen (vgl. [1]). In Folge dessen kommt es zu positiven Abweichungen der bodennahen Lufttemperaturen sowie des Niederschlages im Bereich des tropischen Ostpazifiks, während der tropische Westpazifik negative Temperatur- und Niederschlags-Anomalien zeigt. Ein solches Warmwasser-Ereignis im tropischen Ostpazifik wird „El Niño“, die gegenteilige Anomalie, also ein Kaltwasser-Ereignis, „La Niña“ genannt. Es zeigt sich, dass eine enge Korrelation zwischen den Temperatur-Anomalien des oberflächennahen Ozeans und dem Southern-Oscillation-Index (SOI), der die atmosphärischen Strömungs-Anomalien im Bereich des tropischen Pazifiks durch Bestimmung des Luftdruckunterschiedes zwischen den Stationen Tahiti und Darwin (Australien) charakterisiert, besteht. Dabei zeigen negative Werte im SOI ein „El Niño“-Ereignis an. Der SOI kann also als repräsentative Einflussgröße für das zusammengefasst als ENSO bezeichnete Phänomen verwendet werden. Man hat festgestellt, dass ENSO über atmosphärische Kopplungs-Mechanismen auch Einfluss auf die Temperaturen im Bereich des westlichen indischen Ozeans und in Teilen der Außertropen nimmt.

Im Unterschied zu den bisher genannten externen Einflüssen der solaren Strahlungsschwankungen und des explosiven Vulkanismus handelt es sich bei ENSO um einen Einfluss interner Art, da eine Wechselwirkung innerhalb des Klimasystems beschrieben wird.

#### 1.4 NAO – Nordatlantik-Oszillation

Eine zweite bedeutsame Wechselwirkung im System Atmosphäre-Ozean wird Nordatlantik-Oszillation (abgekürzt NAO) genannt. Die NAO umschreibt Abweichungen von den mittleren atmosphärischen Strömungsbedingungen über dem Nordatlantik und ist charakterisiert durch den Luftdruckunterschied zwischen Islandtief und Azorenhoch. Eine große Druckdifferenz führt in Europa zu überwiegend zonalen Strömungsmustern, was die Advektion feuchter und im Winter relativ milder Luftmassen begünstigt. Ist die Luftdruckkonstellation auf dem Atlantik von eher geringem Druckunterschied gekennzeichnet, steigt die Wahrscheinlichkeit von meridionalen Strömungsbedingungen im Bereich des europäischen Kontinentes an, weshalb dann besonders die Wintermonate häufig von gegenteiligen Niederschlags- und Temperatur-Anomalien geprägt sind (vgl. [23]).

#### 1.5 Anthropogene Treibhausgase

Wasserdampf ( $H_2O$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ) sind die bestimmenden natürlichen Treibhausgase auf der Erde. Durch Absorption im langwelligen, terrestrischen Spektrum schwächen sie die Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche, so dass die Mitteltemperatur auf der Erde mit gut  $15^\circ C$  deutlich über der Gleichgewichtstemperatur der Erde ohne den Einfluss von Treibhausgasen ( $-18^\circ C$ ) auf den Strahlungshaushalt liegt [16].

Kohlenstoff ist der zentrale Baustein allen Lebens auf der Erde. Pflanzen bauen mit Hilfe der solaren Strahlung aus Kohlendioxid und Wasser organische Kohlenstoffverbindungen auf und geben den entstehenden Sauerstoff an die Umwelt ab. In der Flora wird also Kohlenstoff ständig gebunden. Neben den organischen Kohlenstoffverbindungen und dem atmosphärischen  $CO_2$  gehören das in den Meeren gelöste Kohlendioxid und die biogen gebildeten Kalke der Meere zu den wichtigen Reservoirs im globalen Kohlenstoffkreislauf (vgl. z.B. [12]). Durch Sedimentation des Kalkes im Ozean und Einlagerung nicht verrotteter organischer Substanzen im Boden können mächtige Speicher entstehen, in denen Kohlenstoff für lange Zeit gebunden bleibt.

Die Fauna greift in den beschriebenen Kreislauf zum einen in ganz natürlicher Weise ein, indem sie den organischen Kohlenstoff aus den Pflanzen als Baustoff für den eigenen Körper nutzt und durch Rückwandlung in Kohlendioxid Energie gewinnt. Zum anderen jedoch wirkt der Mensch als Teil der Fauna in jüngster Zeit sehr drastisch auf den Kohlenstoffkreislauf ein: Eben jene Energiespeicher in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas, die sich über Jahrtausende aus den organischen Resten von Pflanzen unter dem Erdboden gebildet haben, werden seit Beginn der Industrialisierung in immer schnellerem Tempo verbraucht und dabei  $\text{CO}_2$  freigesetzt (vgl. [15]). Zusätzlich werden durch das Abholzen vor allem der tropischen Regenwälder Senken des Kohlendioxids abgebaut. Zusammengenommen hat dies zu einem Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 280 ppm (vorindustriell) auf rund 375 ppm im Jahre 2003 geführt (vgl. Abb.1).

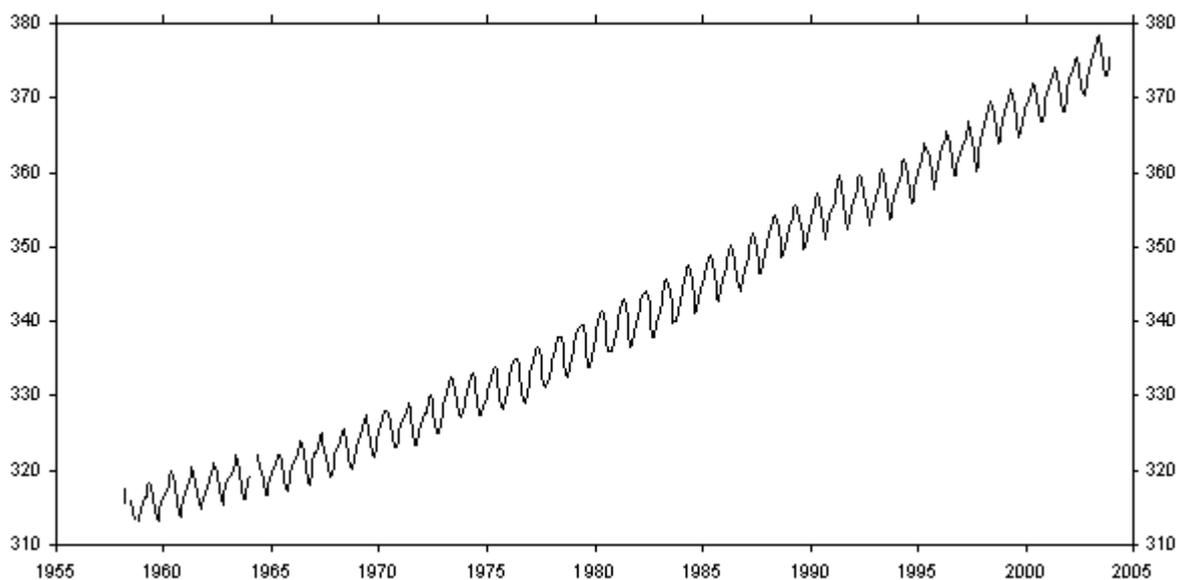


Abb. 1: monatliche  $\text{CO}_2$ -Messdaten der Station Mauna Loa (Hawaii) zwischen März 1958 und Dezember 2003 (Quelle: [11]). Die jahreszeitlichen Schwankungen werden durch den Vegetationszyklus in den mittleren und hohen nördlichen Breiten aufgeprägt.

Neben dem  $\text{CO}_2$  existieren weitere Treibhausgase mit anthropogenen Quellen. In der Reihenfolge ihrer Bedeutung sind dies Methan ( $\text{CH}_4$ ), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW's), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und troposphärisches Ozon ( $\text{O}_3$ ). Auch wenn die mit Abstand höchste Emissionsrate beim Kohlendioxid vorliegt, tragen auch die anderen Substanzen einen nicht unerheblichen Teil zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Aufgrund ihres teilweise deutlich höheren sogenannten Treibhauspotentials (engl.:

Global Warming Potential) sind diese Spurengase trotz ihrer vergleichsweise geringen atmosphärischen Konzentration bei der Betrachtung der anthropogenen Treibhauswirkung von Relevanz. Für eine quantitative Erfassung des anthropogenen Einflusses werden die Wirkungen der einzelnen Substanzen in einer einzigen Größe zusammengefasst, der sogenannten CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Konzentration. Dies ist die Summe aus tatsächlicher CO<sub>2</sub>-Konzentration und einer fiktiven Konzentration an CO<sub>2</sub>, die exakt dieselbe Treibhauswirkung aller weiteren Treibhausgase erzielen würde. Zieht man von der derzeitigen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Konzentration den vorindustriellen Wert ab, so erhält man eine den aktuellen anthropogenen Anteil am Treibhauseffekt quantifizierende Größe (vgl. [6]).

Tabelle 1 zeigt Schätzwerte des Strahlungsantriebes verschiedener anthropogen veränderter Klimaeinflüsse sowie des solaren Einflusses für das Jahr 2000, relativ zum vorindustriellen Wert von 1750. In den ersten vier Zeilen sind die in der CO<sub>2</sub>-Äquivalentkonzentration berücksichtigten Treibhausgase aufgeführt.

Tab. 1: Globales Mittel des Strahlungsantriebes (geschätzt) durch verschiedene anthropogen modifizierte Einflüsse (Ausnahme: Solar) für das Jahr 2000 relativ zu 1750 (Quelle: [6]). Je nach wissenschaftlichem Verständnis unterliegen die Schätzwerte teilweise großer Unsicherheit

Einfluss	Strahlungsantrieb [W/m <sup>2</sup> ]	wiss. Verständnis
<b>Gase</b>		
CO <sub>2</sub>	+1,46	hoch
CH <sub>4</sub>	+0,48	hoch
FCKW's	+0,34	hoch
N <sub>2</sub> O	+0,15	hoch
trop. O <sub>3</sub>	+0,35	mittel
Strat. O <sub>3</sub>	-0,15	mittel
<b>Aerosole</b>		
Sulfat	-0,4	niedrig
Ruß	+0,2	sehr niedrig
organ. Kohlenstoff	-0,1	sehr niedrig
Biomassenverbrennung	-0,2	sehr niedrig
Mineralstaub	-0,6 bis +0,4	sehr niedrig
Indirekter Effekt durch Aerosoleinfluss auf Wolken	0 bis -2,0	sehr niedrig
Landnutzung	-0,2	sehr niedrig
Solar	+0,3	sehr niedrig

## 2. Methodik

### 2.1. Schrittweise Regression

In der vorliegenden Arbeit werden Zeitreihen der bodennahen Lufttemperatur unterschiedlicher räumlicher Skalen auf die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Einfluss-Prozesse hin untersucht. Die nachfolgend beschriebene Methode der schrittweisen, multiplen, linearen Regression analysiert, wie gut die beobachteten Schwankungen in den Zeitreihen der Temperatur durch strukturell ähnliche zeitliche Verläufe der Einflussgrößen erklärt werden können. Das Regressionsmodell zerlegt die Zielgröße  $Z(t)$  (hier: Temperatur) in die den verschiedenen Einflüssen zugeordneten Komponenten  $z_i(t)$  zuzüglich einer Restkomponente ( $\text{Res}(t)$ : Residuum), die den unerklärten Anteil beschreibt.

$$Z(t) = \sum_i z_i(t) + \text{Res}(t) \quad (2.1)$$

Prinzipiell ist jede Art von funktionalem Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen (Regressoren) und den Zielgrößen denkbar. Der hier gewählte lineare Ansatz zeigt im Vergleich mit anderen Methoden bei Anwendung auf die Zeitreihe der globalen Mitteltemperatur gute Ergebnisse [19], weshalb diese Vorgehensweise auch bei der Analyse der für die Diplomarbeit ausgewählten Temperaturreihen beibehalten wird. Für die einzelnen Einflüsse  $R_i$  sind demnach lineare Regressionskoeffizienten  $a_i$  zu suchen, so dass gilt:

$$\sum_i z_i(t) = a_0 + \sum_i a_i R_i(t) \quad (2.2)$$

Bei der Auswahl der Regressoren muss darauf geachtet werden, dass bestimmte zufällige Varianzen in der untersuchten Temperaturreihe nicht fälschlicherweise einer Einflussgröße zugeordnet werden. Diese Überanpassung tritt bei statistischen Modellierungen häufig dann auf, wenn sehr viele Regressoren in Betracht gezogen werden. Die Schrittweise Regression versucht, diesen Fehler möglichst klein zu

halten, indem die Regressoren vor und nach der Selektion strengen Kriterien unterzogen werden. Im Zuge der so genannten Vorwärtsregression werden zu Beginn nacheinander die Zeitreihen der potenziellen Einflussgrößen mit der Zeitreihe der Zielgröße verglichen und die linearen Regressionskoeffizienten bestimmt. Bei Überschreiten des Signifikanz-Schwellenwertes von 95% durch den signifikantesten aller Regressoren findet dieser Aufnahme in das Modell. In einem zweiten Schritt wird getestet, ob in Anwesenheit der selektierten Einflussgröße ein zweiter Einfluss ausreichend signifikant ist. Erneut wird der signifikanteste aller gefundenen Regressoren in das Modell aufgenommen, wodurch sich die Dimension des Modells (Anzahl der Regressoren) auf zwei erhöht. Anschließend wird im Zuge der so genannten Rückwärtsregression geprüft, ob durch Hinzunahme des neuen Regressors der erste unsignifikant wird. Im Falle fehlender Signifikanz kommt es zur Deselektion der betreffenden Einflussgröße. In einem fortwährenden Wechselspiel aus Vorwärtsregression und Rückwärtsregression wird die Methode so lange fortgeführt, bis sich die Dimension des Modells nicht mehr ändert, bis also durch Hinzunahme neuer Regressoren keine signifikante Verbesserung des bestehenden Modells erzielt werden kann [19].

Entscheidend für die Selektion und Deselektion von Regressoren ist folgender Signifikanz-Test:

$$|t| = \sqrt{\frac{v r_{i,\text{part}}^2}{1 - r_{i,\text{part}}^2}} \quad \text{mit } v = j - n - 1 \quad (2.3)$$

$v$ : Anzahl der Freiheitsgrade

$j$ : Zeitreihenlänge

$n$ : Anzahl der Regressoren, Modelldimension

$r_{i,\text{part}}^2$ : partielles Bestimmtheitsmaß von  $R_i$

Ausschlaggebende Größe ist das partielle Bestimmtheitsmaß  $r_{i,\text{part}}^2$ , als Quadrat des Korrelationskoeffizienten des Residuums einer Regression der Zielgröße  $Z$  auf alle  $R_j$  ( $j \neq i$ ; bisher ausgewählte Regressoren) und des Residuums einer Regression von  $R_i$  (zu prüfender Regressor) auf alle  $R_j$  ( $j \neq i$ ). Dabei gibt das letztgenannte

Residuum den linear unabhängigen Varianzanteil von  $R_i$  an, während das erstgenannte Residuum die durch alle anderen Regressoren nicht erklärte Varianz beschreibt. Eine Korrelation beider Größen führt also zu einer Aussage darüber, wie groß der von allen anderen Regressoren unabhängige Beitrag von  $R_i$  zur bisher unerklärten Varianz der Zielgröße  $Z$  ist.

## 2.2 Hauptkomponenten-Analyse

Die in der vorliegenden Arbeit zu analysierenden globalen Gebietsmittel der Temperatur (nähere Beschreibung in Kapitel 3.1.1) sind Einzelzeitreihen, die jeweils ein bestimmtes räumlich begrenztes Gebiet repräsentieren. Man spricht von einem Datenfeld, da die Zielgröße (hier: Temperatur) von mehr als einer Variablen, nämlich von der Zeit und vom Ort abhängt ( $Z(x,t)$ ). Eine isolierte Analyse dieser Zeitreihen mit Hilfe der Schrittweisen Regression würde aber die räumlichen Zusammenhänge der Einzelzeitreihen, die sich nicht an die willkürlich gewählten Gebietsgrenzen hält, unberücksichtigt lassen. So sind die verschiedenen Zeitreihen zu einem gewissen Teil kovariant, zeigen also ähnliche Zeitstrukturen. Aus diesem Grund wird das Datenfeld einer Vorbehandlung unterzogen, der so genannten Hauptkomponenten-Analyse, die auch unter dem Begriff EOF-Transformation (EOF: Empirische Orthogonale Funktionen) bekannt ist.

Ein zweidimensionales Datenfeld  $Z(x_i, t_j)$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ ), abhängig vom Ort  $x_i$  und der Zeit  $t_j$  sei gegeben. Die Kovarianz zwischen den Zeitreihen  $Z(x_1, t)$  und  $Z(x_2, t)$  sei mit  $s_{12}$  usw. bezeichnet. Dann bilden die Werte der Kovarianz die Elemente der so genannten Kovarianzmatrix  $K$  :

$$K = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdot & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \cdot & s_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdot & s_{mm} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Durch eine Drehung der Basis lässt sich die Matrix in eine Form überführen, in der die Nichtdiagonalelemente verschwinden. Man erhält damit ein der Variabilität von  $Z(x_i, t_j)$  angepasstes Koordinatensystem, in welchem die zugehörigen transformierten Zeitreihen keinerlei Kovarianz aufweisen. Um dies zu erreichen, muss die so genannte Eigenwertgleichung  $K \cdot \bar{e} = \lambda \bar{e}$  gelöst werden, wobei  $\bar{e}$  Eigenvektor von  $K$  und  $\lambda$  der zu  $\bar{e}$  gehörende Eigenwert genannt wird. Es existiert genau dann eine nichttriviale Lösung ( $\bar{e} \neq \bar{0}$ ) der Eigenwertgleichung, wenn die Determinante der so genannten charakteristischen Matrix  $C = (K - \lambda E)$ , mit  $E$ : Einheitsmatrix, verschwindet:

$$P(\lambda) = \det(K - \lambda E) = 0 \quad (2.5)$$

Die Nullstellen des so genannten charakteristischen Polynoms  $P(\lambda)$  führen zu den Eigenwerten von  $K$ , die aufgrund der Symmetrie von  $K$  ( $s_{ij} = s_{ji}$ ) ausschließlich reell sind. Zu den Eigenwerten  $\lambda_k$ , ( $k = 1, 2, \dots, m$ ), lassen sich die zugehörigen Eigenvektoren  $\bar{e}_k(x_i)$ , ( $k = 1, 2, \dots, m$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ) bestimmen, die die Basis des gedrehten Systems bilden. Bezüglich dieser Basis nimmt die Kovarianzmatrix  $K$  folgende Diagonalgestalt an:

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \lambda_m \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Durch die Projektion des Datenfeldes  $Z(x_i, t_j)$  auf die neue Basis  $\bar{e}_k(x_i)$  erhält man  $k$  Komponenten-Zeitreihen, die linear unabhängig voneinander sind, also keinerlei Kovarianz mehr aufweisen. Dabei beinhaltet die erste Zeitreihe die größtmögliche Varianz des Datenfeldes (die Varianz der Zeitreihe entspricht jeweils der Größe des zugehörigen Eigenwertes), die folgende die maximale Teilvarianz des verbliebenen Restes usw., so dass das Gewicht der Komponenten-Zeitreihen im Gesamtdatenfeld mit größer werdendem  $k$  immer kleiner wird.

Bezeichnet man die zu  $\bar{e}_k$  gehörende Komponenten-Zeitreihe mit  $\tilde{Z}_k(t)$ , so gelten folgende Transformationsgleichungen zwischen dem Ausgangsdatenfeld und den Komponenten-Zeitreihen:

$$\tilde{Z}_k(t_j) = \sum_{i=1}^m e_k(x_i) \cdot Z(x_i, t_j) \quad (2.7)$$

$$Z(x_i, t_j) = \sum_{k=1}^m e_k(x_i) \cdot \tilde{Z}_k(t_j) \quad (2.8)$$

Die Komponenten-Zeitreihen werden auch zeitliche Hauptstrukturen oder **Principal Component time series** (kurz: **PC**) genannt, die Eigenvektoren auch als **Empirische Orthogonale Funktionen**, abgekürzt **EOF**, bezeichnet.

$$PC_k(t_j) = \sum_{i=1}^m EOF_k(x_i) \cdot Z(x_i, t_j) \quad (2.9)$$

$$Z(x_i, t_j) = \sum_{k=1}^m EOF_k(x_i) \cdot PC_k(t_j) \quad (2.10)$$

Damit ist die Vorbehandlung des Datenfeldes abgeschlossen, die erhaltenen zeitlichen Hauptstrukturen können als Zielgrößen innerhalb der Schrittweisen Regression analysiert werden.

### 2.3 Berechnung raumzeitlicher Signalfelder

Im Folgenden findet die Schrittweise Regression Anwendung, mit den zeitlichen Hauptstrukturen  $PC_k(t)$  als Zielgrößen und einem Pool potentieller Einflussgrößen  $R_i(t)$ , der in Kapitel 3.2 genauer beschrieben wird. Es ergibt sich dann folgende Zerlegung der Hauptstrukturen in einen erklärten und einen unerklärten Anteil, wobei  $l$  die Anzahl der ausgewählten Regressoren angibt:

$$PC_k(t) = a_{0k} + \sum_{i=1}^l a_{ik} \cdot R_{ik}(t) + Res_k(t) \quad (2.11)$$

Durch Rücktransformation der zerlegten Hauptstrukturen erhält man schließlich die gewünschte Aufspaltung des ursprünglichen Datenfeldes in einen bestimmten Regressoren zuordenbaren Anteil  $S(x,t)$  (Signalfeld) und eine unerklärte Restkomponente, das Residualfeld  $Res(x,t)$ . Gemäß den Gleichungen 2.10 und 2.11 gilt:

$$\begin{aligned}
 Z(x,t) &= \sum_{k=1}^m EOF_k(x) \cdot \left( \sum_{i=1}^l a_{ik} \cdot R_{ik}(t) + a_{0k} + Res_k(t) \right) \\
 Z(x,t) &= \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^m EOF_k(x) \cdot a_{ik} \cdot R_{ik}(t) + \sum_{k=1}^m EOF_k(x) \cdot a_{0k} + \sum_{k=1}^m EOF_k(x) \cdot Res_k(t) \quad (2.12) \\
 Z(x,t) &= \sum_{i=1}^l S_i(x,t) + S_0(x) + Res(x,t) \\
 Z(x,t) &= S(x,t) + Res(x,t)
 \end{aligned}$$

Die den Regressoren  $R_i(t)$  zugeordneten Signale  $S_i(x,t)$  lassen sich beliebig zusammenfassen, z.B. in ein Signalfeld aller natürlichen Einflüsse, welches sich dann mit dem Signalfeld der anthropogenen Treibhausgase vergleichen lässt. Dabei ist zu beachten, dass die  $a_0$ -Signalkomponente ( $S_0(x)$ ) keinem bestimmten der ausgewählten Einflüsse zuordenbar ist. Da aber später nur relative Signale, also Differenzen zum Signal eines Referenzjahrs betrachtet werden – man spricht in diesem Zusammenhang von einer Normierung des Signalfeldes –, spielt diese  $a_0$ -Komponente letztlich keine Rolle.

## 2.4 Erklärte Varianz

Innerhalb der Schrittweisen Regression wird der Korrelationskoeffizient  $r$  zwischen gefundenem Regressionsmodell und der Zielgröße  $Z(t)$  berechnet, der die Güte des gefundenen Zusammenhanges angibt.  $r$  kann dabei Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei Werte nahe 0 einen schlechten oder fehlenden Zusammenhang anzeigen, während ein Zahlenwert betragsmäßig nahe 1 einen nahezu exakten linearen Zusammenhang kennzeichnet. Sein quadratischer Wert wird als Bestimmtheitsmaß bezeichnet und ist gleich der relativen erklärten Varianz, die entsprechend Werte zwischen 0 und 1 (0 bis 100%) annehmen kann, wobei

bevorzugt der prozentuale Wert benutzt wird. Ganz allgemein, unabhängig von Art (linear oder nicht linear) und Dimension (Anzahl der Regressoren) der Regressionsbeziehung, gilt dabei folgende Schätzgröße für das Bestimmtheitsmaß [17]:

$$B = r^2 = \frac{\sum_j Z'(t_j)^2}{\sum_j Z(t_j)^2} = \frac{\text{"erklärte Varianz"}}{\text{"gesamte Varianz"}} \quad (2.13)$$

$Z'(t_j)$ : modellierte Abweichung vom Mittelwert zum Zeitpunkt  $t_j$

$Z(t_j)$ : gemessene Abweichung vom Mittelwert zum Zeitpunkt  $t_j$

Bei der Untersuchung der Gebietsmittel werden Hauptkomponenten-Zeitreihen (PC) analysiert und die an diesen Zeitreihen erklärte Varianz bestimmt. Um zu einer Aussage über die am ursprünglichen Datenfeld erklärte Varianz zu kommen, muss das Gewicht der k-ten PC (entspricht dem normierten Eigenwert  $\lambda_k$ ) im Datenfeld mit der zugehörigen erklärten Varianz multipliziert werden und die entstehenden Produkte über alle k Komponenten aufsummiert werden.

$$EV_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^m \lambda'_k \cdot EV_k \quad (2.14)$$

mit normierten Eigenwerten, für die gilt:  $\sum_{k=1}^m \lambda'_k = 1$

Neben einer Aussage über das Gesamtdatenfeld ist es ebenso von Interesse, erklärte Varianzen für die einzelnen Gebiete zu kennen. Dazu wurden die für den Ort  $x$  berechneten Gesamtsignale  $S(x, t_j)$  mit den Ausgangsdaten  $Z(x, t_j)$  verglichen und nach Gleichung 2.13 die relative erklärte Varianz abgeschätzt:

$$EV(x) = \frac{\sum_j S(x, t_j)^2}{\sum_j Z(x, t_j)^2} \quad (2.15)$$

## 2.5 Signifikanz der Signale

Von besonderem Interesse ist die Frage, wie weit sich ein gefundenes Signal  $S(t)$  vom Rauschanteil abhebt. Der Rauschanteil kann dabei unterschiedlich definiert werden. Häufig wird der natürliche Varianzanteil  $S_{\text{nat}}(t)$  zuzüglich der unerklärten Schwankungen  $\text{Res}(t)$  als Rauschen aufgefasst. Alternativ kann man auch allein die unerklärte Varianz als Rauschanteil ansehen. Der Rauschkomponente kann eine Normalverteilung angepasst und die zugehörige Standardabweichung ausgegeben werden. Abhängig von der Standardabweichung lassen sich nun Wahrscheinlichkeiten dafür berechnen, dass sich ein zufällig ausgewählter Wert aus der normalverteilten Zufallsvariablen innerhalb bestimmter Grenzen, den Signifikanzniveaus, aufhält.

Bei den Auswertungen wurden Signifikanzgrenzen von 90, 95 und 99% berechnet, basierend auf dem normalverteilten Residuum der zugehörigen Regression. Die Grenzen geben somit die Wahrscheinlichkeit an, dass sich ein Signal vom unerklärten Rauschen abhebt. Bei Hinzunahme der natürlichen Variabilität zum Rauschanteil ergeben sich entsprechend höhere Signifikanzschwellen.

## 2.6 Signifikanz der erklärten Varianzen

Um qualitativ abschätzen zu können, wie signifikant die aus den Regressionsmodellen abgeleiteten erklärten Varianzen sind, wurde folgendes Experiment durchgeführt:

Mit Hilfe eines Zufallsgenerators wurden anstelle der physikalischen Einfluss-Zeitreihen (vgl. Kap. 3.2) Zeitreihen Gauß-verteilter Zufallszahlen innerhalb der Schrittweisen Regression als potentielle Einflussgrößen angeboten. Dieses so genannte Monte-Carlo-Experiment wurde exemplarisch für eines der betrachteten Datenfelder (vgl. 3.1.1) und eine der Einzelzeitreihen (vgl. 3.1.2) jeweils 500 mal durchgeführt und der Mittelwert und die Standardabweichung der berechneten erklärten Varianzen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Anhang A dokumentiert.

## 2.7 Residuen-Analyse

Das Residuum ist idealerweise ein Zufallsrauschen, soll also keinerlei erklärbare Struktur enthalten. Eine wichtige Eigenschaft für ein solches stochastisches Rauschen ist seine Normalverteilung. Mit Hilfe des so genannten Kolmogoroff-Smirnoff-Tests (siehe z.B. [14]) lässt sich entscheiden, ob sich die Verteilung einer Datenreihe signifikant von einer Normalverteilung unterscheidet. Dieser Test wurde exemplarisch für eines der Datenfelder (vgl. 3.1.1) und eine der Einzelzeitreihen (vgl. 3.1.2) durchgeführt. In Anhang A sind die entsprechenden Analyse-Ergebnisse dargelegt.

## 2.8 Zeitlich gleitende Analysen

Die Analyse der verschiedenen Temperatur-Zeitreihen wird zunächst für das gesamte zur Verfügung stehende Intervall (vgl. Kap. 3) durchgeführt. In einem zweiten Schritt werden immer nur ausgewählte Zeitfenster aus dem gesamten Zeitintervall berücksichtigt. Dabei verschiebt man nach jeder Analyse das Fenster um ein Jahr, so lange, bis der Gesamtzeitraum ausgeschöpft ist. Man erhofft sich durch eine solche zeitlich gleitende Betrachtung Informationen über mögliche zeitliche Trends in den erklärten Varianzen und den zugehörigen Signalen zu erhalten. Ändern sich also die Gewichte der einzelnen Einflüsse bei Verschiebung des Bezugszeitraums? Von besonderem Interesse ist dabei die Frage, ob sich ein zunehmender Einfluss durch die anthropogenen Treibhausgase feststellen lässt.

Bei der Wahl der Fensterbreite ist darauf zu achten, den berücksichtigten Zeitraum möglichst groß genug zu halten, da mit Abnahme der berücksichtigten Datenmenge die Ergebnisse stärker variieren und Einflussgrößen, die über langfristige Trends einwirken, insgesamt an Signifikanz verlieren. Für die in dieser Arbeit untersuchten Zeitreihen hat sich ein Zeitintervall von 80 Jahren als geeignet für die zeitlich gleitenden Berechnungen erwiesen.

### 3. Datengrundlage

#### 3.1 Zielgrößen

##### 3.1.1 Globale Gebietsmittel

Im ersten Abschnitt werden globale Gebietsmittel der bodennahen Lufttemperaturen analysiert. Ausgangsdaten sind die monatlichen Mittelwerte der oberflächennahen Lufttemperaturen, berechnet für  $5^\circ \times 5^\circ$ -Boxen [8], verteilt über die gesamte Erdoberfläche (Quelle:[22]). Diese Boxen wurden zu insgesamt 84 in etwa flächengleichen Gebieten zusammengefasst und die zugehörigen Flächenmittel der Temperatur aus dem Box-Datensatz berechnet. Abhängig vom Analyse-Zeitraum steht eine unterschiedliche Anzahl an Gebiets-Zeitreihen zur Verfügung. Für die betrachteten Zeiträume 1881-2003 und 1901-2003 sind 38 bzw. 51 der insgesamt 84 Gebiete durch Daten repräsentiert (vgl. Abb. 2). Für weiter zurückreichende Zeiträume nimmt das vorhandene Datenmaterial rasch ab, wodurch die Wahl des Zeitraums eingeschränkt ist.

Aus den Monatsmittelwerten wurden Jahresmittelwerte sowie jahreszeitliche Mittel für Sommer (Monate Juni bis August) und Winter (Dezember bis Februar) errechnet und daraus entsprechende Zeitreihen der Temperatur-Anomalien für die einzelnen Gebiete abgeleitet. Über den Zwischenschritt der EOF-Transformation erfolgt schließlich die Analyse der Zeitreihen mit der Schrittweisen Regression.

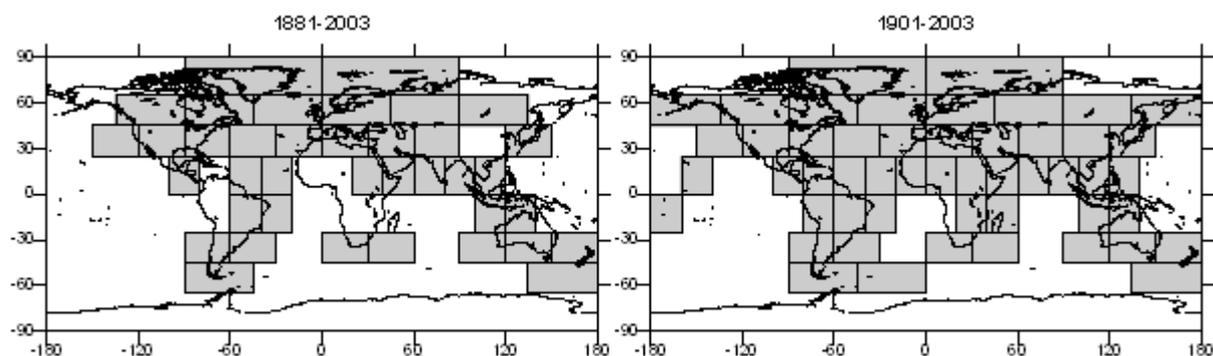


Abb. 2: Karte der verfügbaren Gebietsmittel für die Zeiträume 1881-2003 (38 Gebiete) und 1901-2003 (51 Gebiete).

Stellvertretend für die Einzelzeitreihen der globalen Gebietsmittel ist in Abb. 3 das globale Mittel der bodennahen Lufttemperaturen zwischen 1856 und 2003 dargestellt. Man erkennt einen ersten markanten Anstieg der Temperaturen zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Dieser positive Trend setzt zwischen der Mitte des Jahrhunderts und den Siebziger Jahren vorübergehend aus, bevor ein zweiter Anstieg der Temperaturen einsetzt, der seit etwa 25 Jahren andauert.

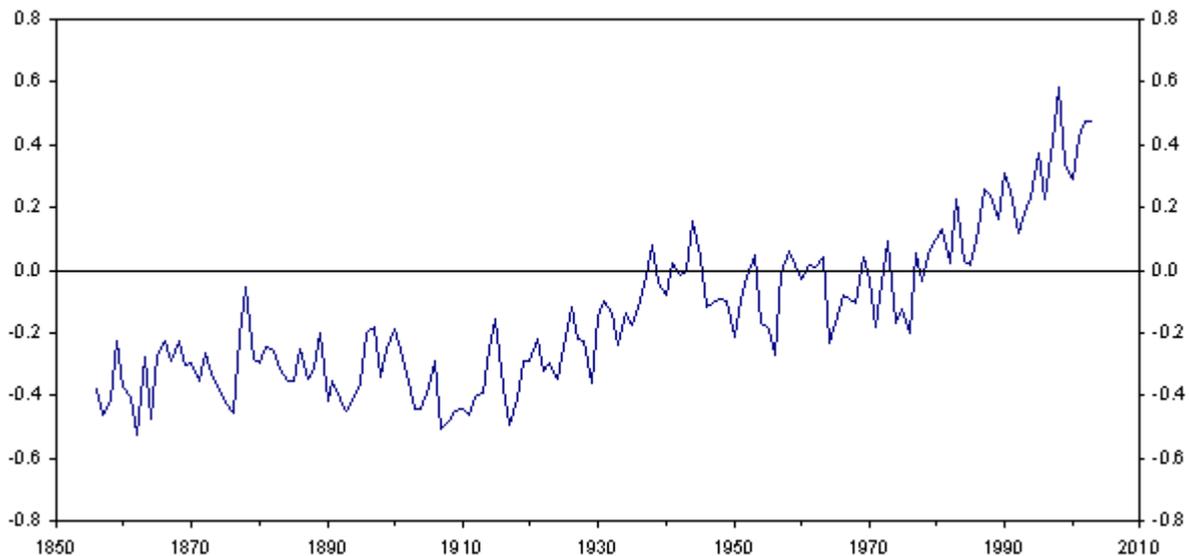


Abb. 3: Globales Jahresmittel der bodennahen Lufttemperaturen in K zwischen 1856 und 2003, nach Jones (Quelle:[22]).

### 3.1.2 Einzelzeitreihen Deutschland

Im zweiten Teil der Arbeit werden Einzelzeitreihen der bodennahen Lufttemperatur von geeigneten Stationen innerhalb Deutschlands untersucht (Datenquelle: DWD). Dazu wurden möglichst lückenlose, homogene und wenigstens 100 Jahre zurückreichende Zeitreihen mit Monatsmittelwerten der Temperatur ausgewählt. Zur Schließung einzelner Datenlücken wurden Regressionsbeziehungen zu benachbarten Stationen berechnet und damit fehlende Daten rekonstruiert. Im Einzelnen werden zwei Bergstationen (Hohenpeißenberg und Zugspitze) sowie acht Tieflandstationen (namentlich Bremen, Hamburg, Schwerin, Potsdam, Dresden, Jena, Frankfurt/Main und Geisenheim) mit der Methode der Schrittweisen Regression untersucht, zunächst für den Gesamtzeitraum 1891-2003 – mit Ausnahme der Station Zugspitze, deren Reihe erst 1901 beginnt – und danach

zeitlich gleitend. Die bereits ab 1781 verfügbare Zeitreihe des Hohenpeißenbergs (vgl. Abb. 5) wird zusätzlich für den Zeitraum 1829-2003 analysiert. Aus den Monatsmittelwerten wurden die saisonalen Mittel für Winter und Sommer, sowie Jahresmittelwerte berechnet. Die resultierenden Zeitreihen, berechnet als Anomalien, gehen schließlich als Zielgrößen in die Schrittweise Regression ein.

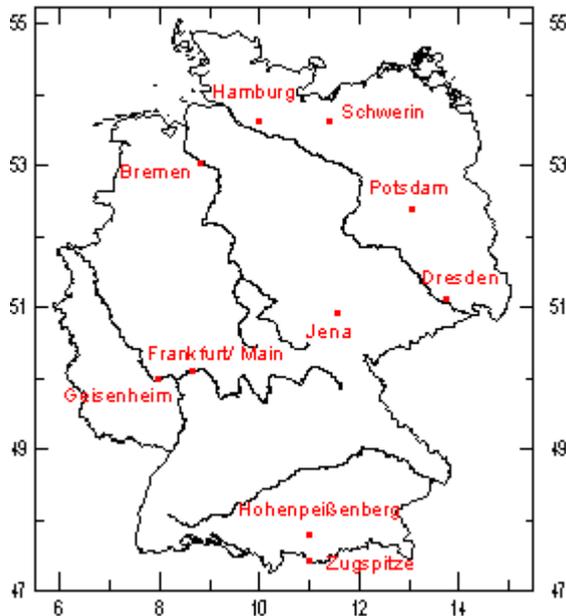


Abb. 4: Stationen innerhalb Deutschlands, deren Temperatur-Zeitreihen für eine Analyse mit der Schrittweisen Regression ausgewählt wurden.

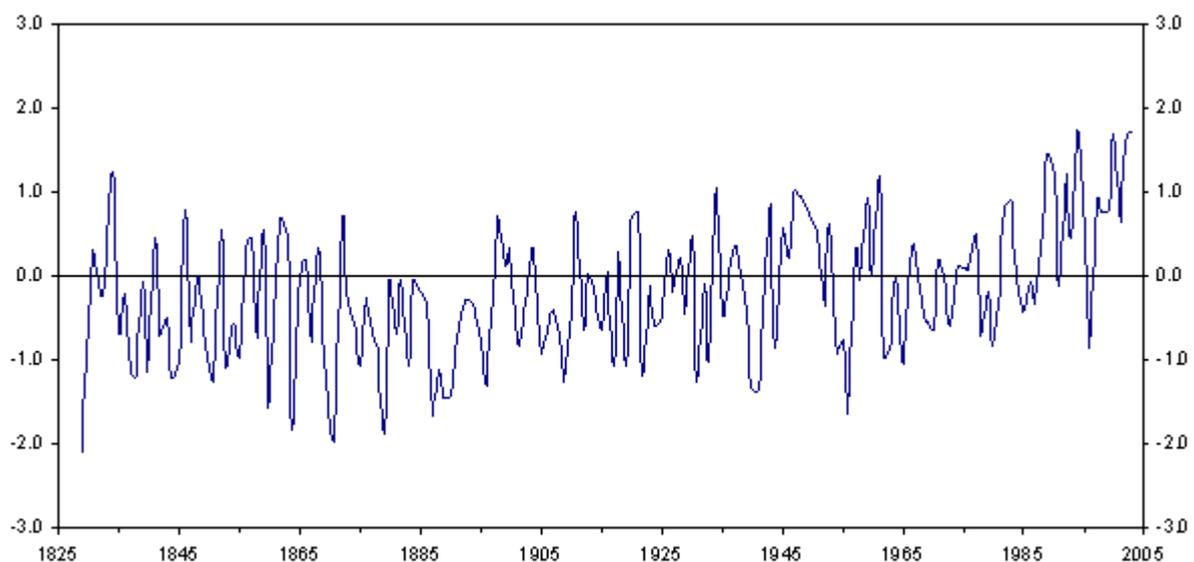


Abb. 5: Jahresmittel der bodennahen Lufttemperaturen in K zwischen 1829 und 2003 an der Station Hohenpeißenberg

## 3.2 Einflussgrößen

Die in Kapitel 1 vorgestellten Klimafaktoren sollen innerhalb der Schrittweisen Regression als potentielle Regressoren angeboten werden. Dazu sind die Einflüsse zunächst in geeigneter Form zu quantifizieren und in Zeitreihen darzustellen.

### 3.2.1 Solarer Einfluss

Der solare Einfluss ist durch Änderungen der Strahlungsflussdichte am gedachten oberen Rand der Atmosphäre (Solarkonstante) charakterisiert. In der jüngeren Vergangenheit konnten dazu satellitengestützte Messdaten gesammelt werden. Ältere Daten sind über Korrelationen mit den Sonnenflecken-Relativzahlen rekonstruiert worden. Abb. 6 stellt den Verlauf der Solarkonstanten (rekonstruiert nach Lean [10]) seit 1825 dar. Neben dem quasi-elfjährigen Sonnenflecken-Zyklus findet sich auch eine Schwankung deutlich niedrigerer Frequenz, deren letztes Minimum um 1890 zu erkennen ist. Aus den Absolutdaten der Jahresmittel wurden durch Abziehen des Mittelwertes jährliche Anomalien der Strahlungsflussdichte berechnet, deren Werte als Einflussgrößen in die späteren Analysen eingehen.

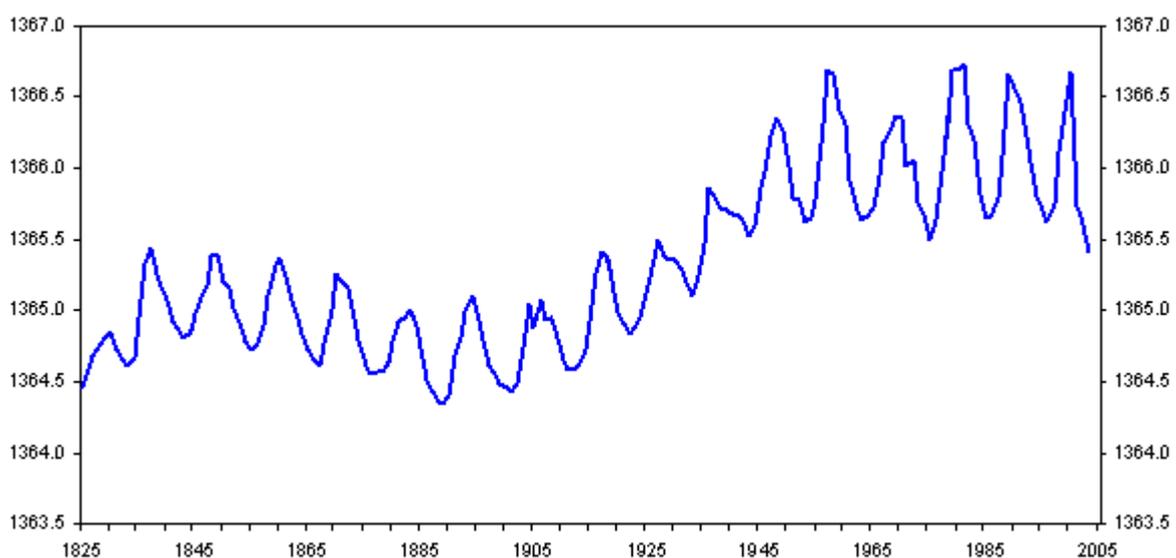


Abb. 6: Jahresmittel der Solarkonstanten zwischen 1825 und 2003, nach Lean [10].

### 3.2.2 Explosiver Vulkanismus

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, lässt sich aus Menge und Verteilung des in die Stratosphäre eingebrachten Sulfataerosols die Modifikation des troposphärischen Strahlungshaushaltes abschätzen. Entsprechend der zonalen Verteilungsmuster des vulkanischen Aerosols kann man für bestimmte zonale „Bänder“ Heizratenanomalien abschätzen. Nach Grieser [5] werden insgesamt 16 zonale Mittelwerte unterschieden. Für die anstehenden Berechnungen ist es sinnvoll, eine global repräsentative Größe zu berechnen, deren Zeitreihe dann für alle Analysen verwendet werden kann. Dies kann zum einen durch eine globale Mittelung der Heizraten geschehen (vgl. Abb. 7), die zweite Möglichkeit liegt in einer Reduktion des Datenfeldes mit Hilfe der in Kap. 2 erklärten Hauptachsen-Transformation.

Im Falle des vorliegenden Datenfeldes trägt die erste Hauptstruktur (PC) bereits rund 96% der Gesamtvarianz, so dass diese Zeitreihe ausreichend repräsentativ für das Datenfeld ist und als zugehörige Einflussgröße Verwendung finden soll. Abb. 8 illustriert den zeitlichen Verlauf der ersten PC zwischen 1825 und 2003. Es fällt dabei die große strukturelle Ähnlichkeit zum globalen Mittel auf.

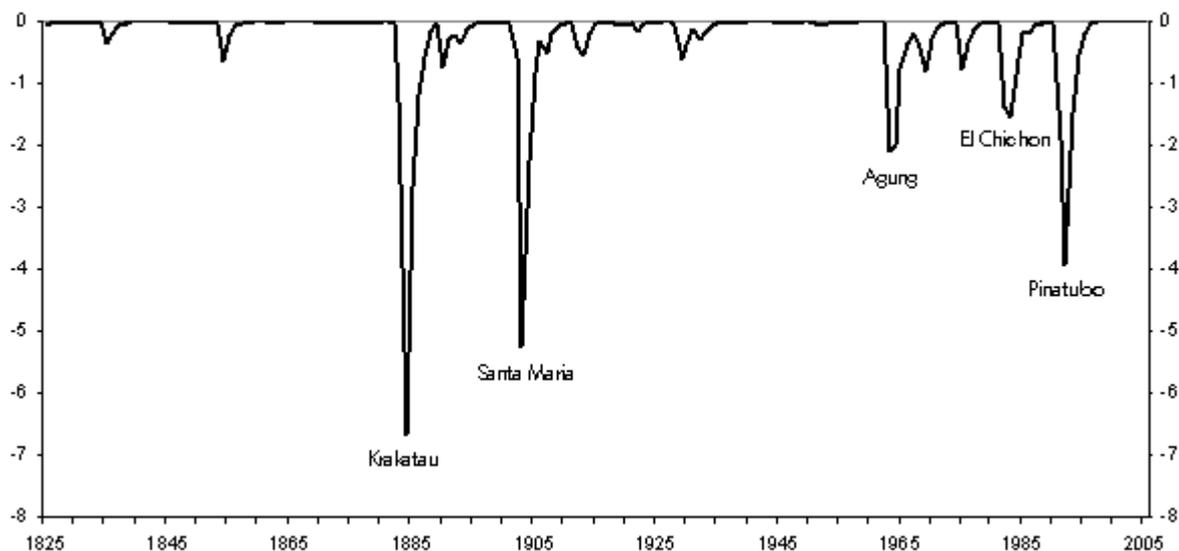


Abb. 7: Global gemittelte Jahresmittel der vulkanischen Heizraten zwischen 1825 und 2003 nach Grieser [5].

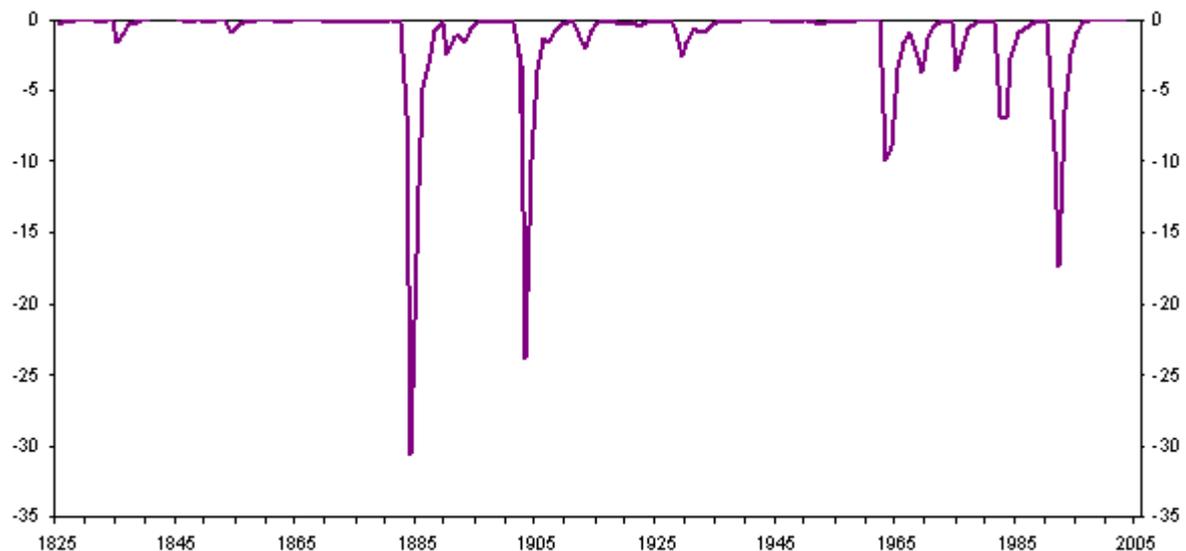


Abb. 8: Zeitreihe der ersten zeitlichen Hauptkomponente (PC) der 16 zonalen Gebietsmittel der vulkanischen Heizraten nach Grieser [5]. Aufgrund des sehr hohen Gewichtes dieser PC im Gesamtdatenfeld kann sie als global repräsentative vulkanische Einflussgröße verwendet werden.

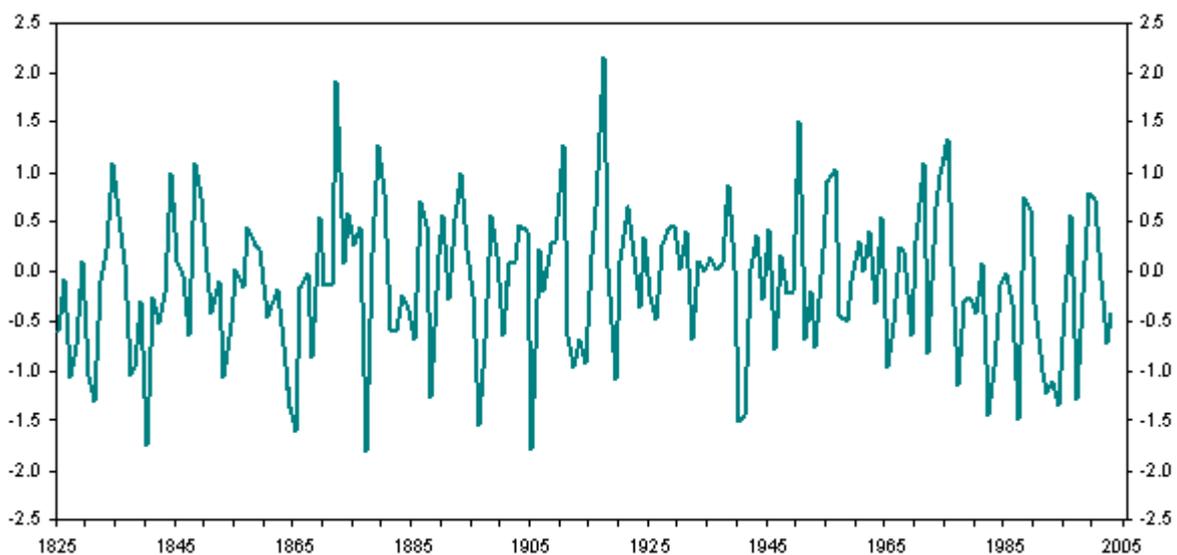


Abb. 9: Jahresmittelwerte des Southern Oscillation Index in hPa zwischen 1825 und 2003 nach Jones [13], Quelle: [22]; ergänzt um rekonstruierte Werte aus Korallendaten [20].

### 3.2.3 El Niño – Southern Oscillation

Der Southern Oscillation Index (SOI), definiert als standardisierte<sup>1</sup> Anomalie des mittleren Luftdruck-Unterschiedes zwischen den Stationen Darwin und Tahiti, charakterisiert als ein atmosphärisches Maß die atmosphärisch-ozeanische Wechselwirkung ENSO ausreichend gut und soll deshalb auch als repräsentative

<sup>1</sup>auf Mittelwert 0 und Standardabweichung 1

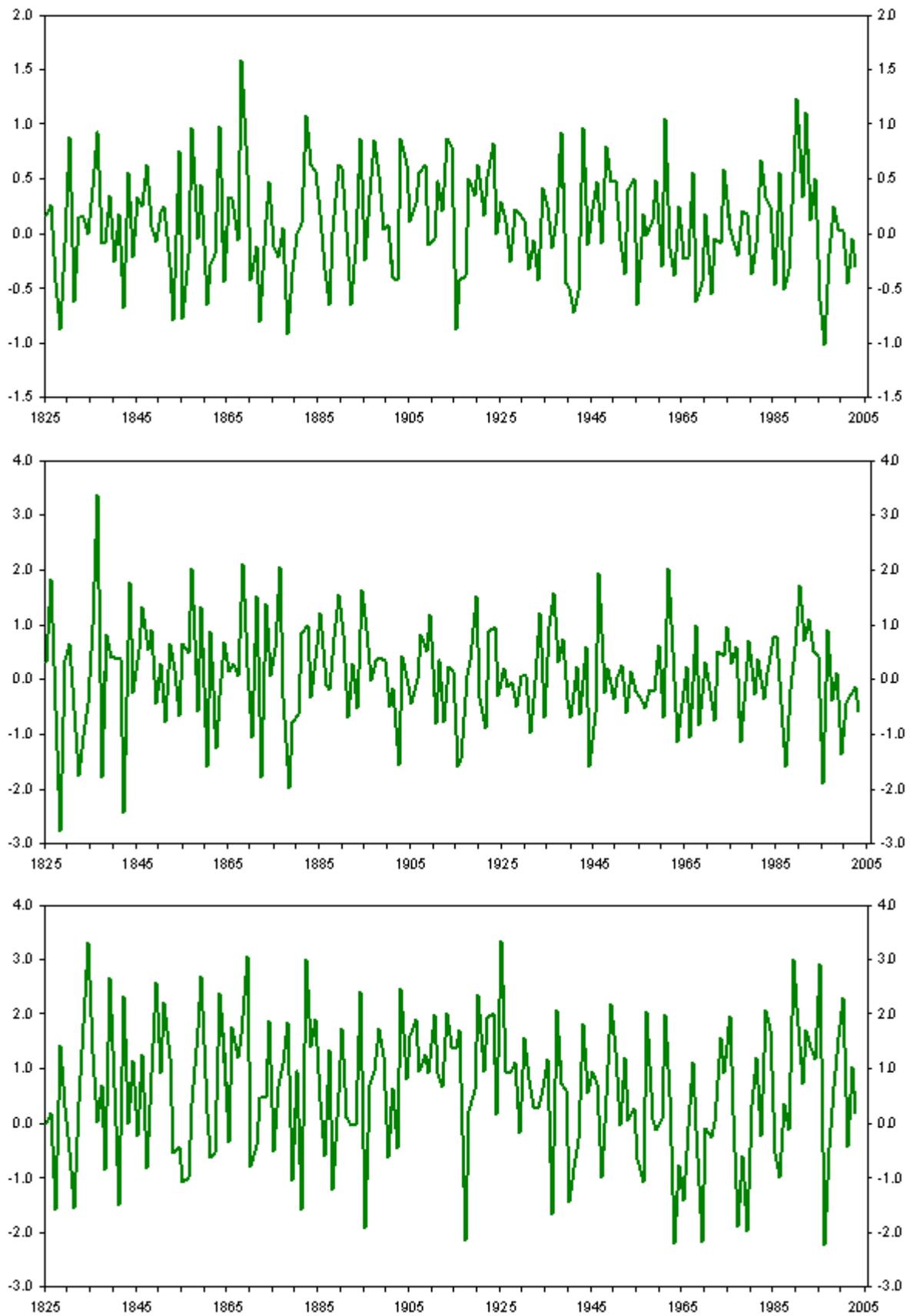


Abb. 10: Jahresmittelwerte (oben), saisonale Mittel Sommer (Mitte) und Winter (unten) des NAOI in hPa nach Jones [9] zwischen 1825 und 2003 (Quelle: [22]).

Einflussgröße innerhalb der Schrittweisen Regression verwendet werden. Abb. 9 zeigt den zeitlichen Verlauf des SOI ab 1825. Zu erkennen sind Zyklen, die häufig zwischen drei und acht Jahren betragen. Zur Erweiterung der erst ab 1866 verfügbaren instrumentellen Daten, wurden über Korallendaten rekonstruierte Werte [20] ergänzend in die Zeitreihe eingefügt.

### 3.2.4 Nordatlantik-Oszillation

Ähnlich wie bei ENSO wird auch im Falle der NAO der zugehörige Index als repräsentative Einflussgröße verwendet. Der Index der Nordatlantik-Oszillation ist definiert als standardisierte Anomalie der Luftdruckdifferenz zwischen den Stationen Stykkisholmur (Island) und Gibraltar (nach Jones [9]). Anstelle von Gibraltar wird alternativ auch die Station Ponta del Garda auf den Azoren zur Bestimmung des NAOI verwendet (nach Hurrell [7]). In Abb. 10 sind die für die Analysen benutzten Jahresmittelwerte sowie die saisonalen Mittelwerte für Winter und Sommer des NAOI nach Jones [9] aufgetragen. Ähnlich wie beim SOI ist ein quasi-periodischer Charakter auszumachen. Insbesondere im Winter nimmt die NAO großen Einfluss auf die Temperatur- und Niederschlagscharakteristik in Mittel- und Nordeuropa, wobei niedrige Werte im NAO mit niedrigen Temperaturen und geringen Niederschlägen korreliert sind.

### 3.2.5 Anthropogene Treibhausgase

Wie bereits in Kap. 1.5 erwähnt, modifizieren anthropogen verursachte Treibhausgase den Strahlungshaushalt. Man kann nun versuchen, die bereits beschriebene normierte  $\text{CO}_2$ -Äquivalent-Konzentration in einen funktionalen Zusammenhang zum resultierenden Strahlungsantrieb zu bringen. Dieser Zusammenhang ist aufgrund folgender Überlegungen nicht linear:

Bei Betrachtung des Absorptionsspektrums des  $\text{CO}_2$  zeigt sich, dass die terrestrische Strahlung in bestimmten Wellenlängen-Bereichen bereits vollständig absorbiert wird. Je höher also die  $\text{CO}_2$ -Gesamtkonzentration steigt, desto mehr dieser Wellenlängen-

Intervalle laufen in eine Sättigung, so dass zusätzlich eingebrachtes  $\text{CO}_2$  den Treibhauseffekt immer weniger verstärken kann. Dieser abgeschwächte Zusammenhang zum Strahlungsantrieb kann in guter Näherung durch den natürlichen Logarithmus beschrieben werden [24]. Als Einflussgröße geht deshalb der natürliche Logarithmus der  $\text{CO}_2$ -Äquivalent-Konzentration, abzüglich des natürlichen Logarithmus des vorindustriellen Wertes von 280 ppm, ein (vgl. Abb. 11). Durch die Normierung erhält man somit den isolierten Einfluss anthropogen verursachter Treibhausgase auf den Strahlungshaushalt.

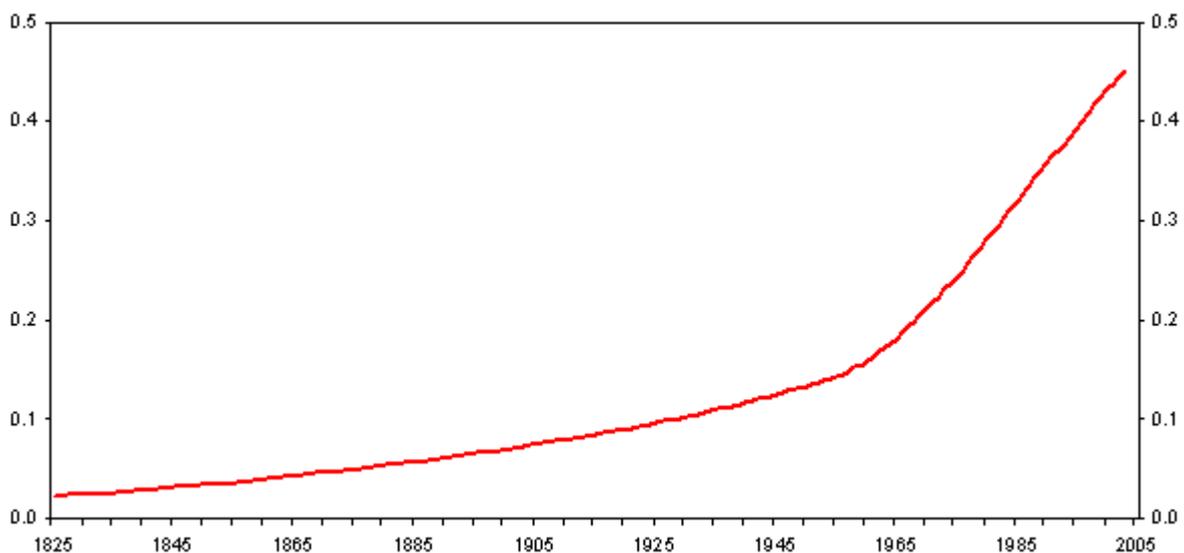


Abb. 11: Jahresmittel des natürlichen Logarithmus der normierten  $\text{CO}_2$ -Äquivalent-Konzentration für den Zeitraum 1825-2003.

Die fünf beschriebenen Einflüsse wurden mit Ausnahme der Treibhausgase in jeweils drei zeitlich um je ein Jahr versetzten Zeitreihen (z.B. 1899-2001, 1900-2002, 1901-2003) dem Pool der potentiellen Regressoren übergeben. Dadurch wird gewährleistet, dass auch mögliche zeitlich verzögerte Einflüsse beim Vergleich mit den Temperatur-Zeitreihen (entsprechend 1901-2003) erkannt werden. Aufgrund der hohen Selbstähnlichkeit in der Zeitstruktur der anthropogenen Treibhausgase ist die genannte Vorgehensweise für diese Zeitreihe nicht notwendig.

## 4. Analyse-Ergebnisse und Interpretation

### 4.1 Globale Gebietsmittel

#### Hauptkomponenten-Analyse

Im ersten Abschnitt soll die Vorbehandlung des Datenfeldes mit Hilfe der EOF-Transformation anhand einiger Ergebnisse illustriert werden. Für das Datenfeld 1901-2003, bestehend aus 51 Gebiets-Zeitreihen der Jahresmittel, sind zunächst die 51 Eigenwerte, die zusammen auch Eigenspektrum genannt werden, in Abb.12 dargestellt.

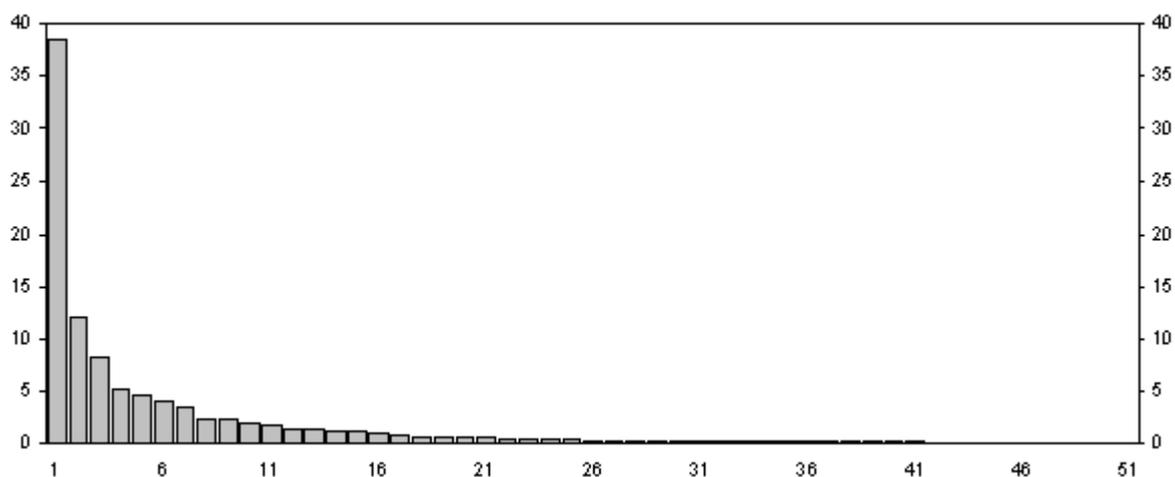


Abb. 12: 51 Eigenwerte des Datenfeldes der globalen Gebietsmittel Jahresmittel 1901-2003. Dargestellt ist der prozentuale Wert, der das Gewicht der zugehörigen zeitlichen Hauptkomponente im Gesamtdatenfeld angibt. Die erste Hauptkomponente erklärt entsprechend rund 39% der Gesamtvarianz des Datenfeldes.

Es zeigt sich, dass die Eigenwerte – und damit die Gewichte der zugehörigen Hauptkomponenten (PC) im Gesamtdatenfeld – mit steigender Komponentenzahl rasch abnehmen. Dabei erklärt die dominante erste PC bereits 38,6% der Gesamtvarianz des Datenfeldes. Ein Vergleich dieser PC zur globalen Mitteltemperatur (Abb. 13, links) verdeutlicht die hohe Korrelation beider Zeitreihen (Korrelationskoeffizient:  $r=0,98$ ), so dass die erste Hauptkomponente bereits repräsentativ für das globale Mittel ist.

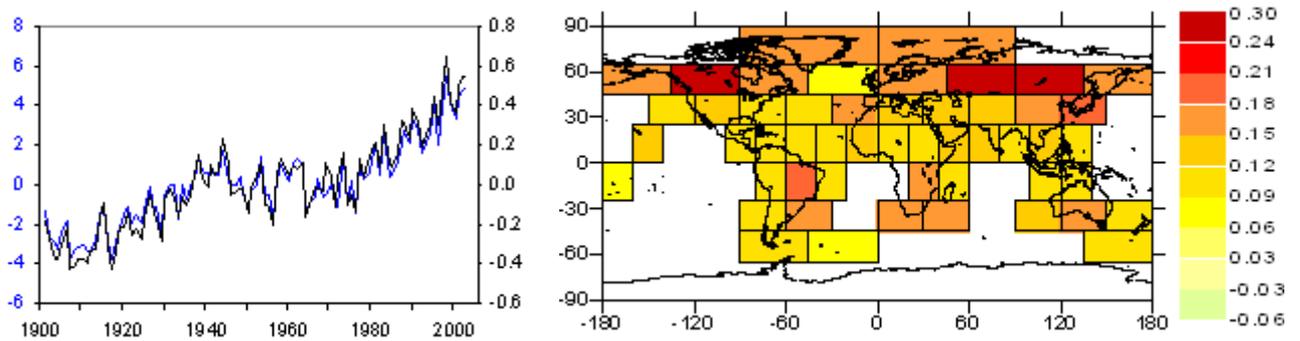


Abb. 13: Links: Vergleich der ersten zeitlichen Hauptkomponente der Globalen Gebiets-Jahresmittel 1901-2003 der Temperatur (blau) mit dem globalen Jahresmittel der Temperatur in K (schwarz). Rechts: Die zugehörige erste räumliche Hauptkomponente schlüsselt das Gewicht der ersten PC für die einzelnen Gebiete auf (dargestellt sind die Komponenten des ersten Eigenvektors mit dem Gesamtbetrag 1).

Die zur ersten zeitlichen Hauptkomponente gehörende räumliche Hauptkomponente (Abb. 13, rechts) gibt darüber Auskunft, wie stark die PC in den einzelnen Gebieten gewichtet ist. Betragsmäßig am stärksten vertreten ist die 1. PC in den kontinental geprägten Gebieten der mittleren nördlichen Breiten. In diesen Gebieten sollten demnach die Temperaturmittel Varianzanteile aufweisen, die der ersten PC besonders ähnlich sind.

Nach abgeschlossener EOF-Transformation erfolgt die Analyse der zeitlichen Hauptkomponenten mit der Schrittweisen Regression. Die anschließende Rücktransformation der in bestimmte Anteile zerlegten Zeitreihen liefert schließlich die gewünschten Temperatur-Signale, die zunächst für die Jahresmittel und später dann auch für saisonale Mittel berechnet werden. Der für die meisten Analysen zugrunde liegende Zeitraum 1901-2003 mit 51 Zeitreihen wird für ausgewählte Berechnungen zusätzlich auf das Zeitfenster ab 1881 mit dann 38 Zeitreihen erweitert.

#### 4.1.1 Jahresmittel 1901-2003

Zu Beginn sollen die Temperatur-Signale und die durch das Modell erklärten Varianzen für den Gesamtzeitraum dargestellt, anschließend die zeitlich gleitenden Berechnungen präsentiert werden.

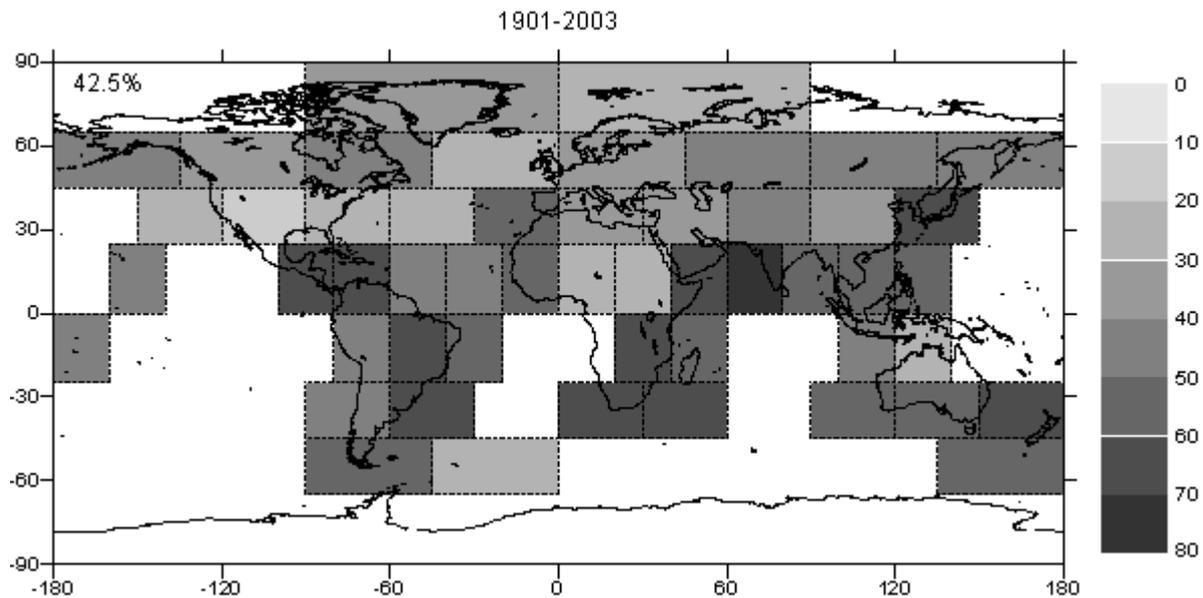


Abb. 14: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes der Temperatur-Jahresmittel (Zahlenwert links oben), sowie in den einzelnen Gebieten (Farbcode) für den Analysezeitraum 1901-2003 in %. Die höchsten Werte werden in Gebieten niedriger geographischer Breite erreicht, während zu den Polen hin die unerklärte Varianz etwas zunimmt.

Abb. 14 zeigt die räumliche Verteilung der erklärten Varianz bei Betrachtung des gesamten Zeitfensters. Für das Gesamtdatenfeld ergibt sich ein Wert von knapp 43%. Bei Aufschlüsselung der erklärten Varianzen auf die einzelnen Gebiete deutet sich eine leichte Abnahme mit zunehmender geographischer Breite an. Insbesondere einige Gebiete der Tropen und Subtropen (mit einem Maximalwert von 70% im Gebiet westliches Indien/ Nordindik), aber auch südhemisphärisch anschließende Regionen zeigen recht hohe Werte.

Auch die zeitlich gleitende Betrachtung – in Abb. 15 sind die Ergebnisse für 7 Zeitfenster zwischen 1901-1980 und 1924-2003 dargestellt – liefert ein recht einheitliches Bild bei der räumlichen Verteilung: Mit Ausnahme des kontinentalen Afrika kann in den Tropen und Subtropen sehr viel Varianz erklärt werden (Maximalwerte bis 81%), während besonders die mittleren und hohen nördlichen Breiten durchweg kleinere Werte aufweisen. Innerhalb der letztgenannten Gebiete lässt sich keine klare räumliche Differenzierung vornehmen. So zeigen einige Zeitfenster die geringeren erklärten Varianzen in den kontinental geprägten Gebieten, andere Intervalle hingegen deuten höhere zufällige Schwankungen (korrespondierend mit geringeren erklärten Varianzen) in einigen maritim beeinflussten Regionen an.

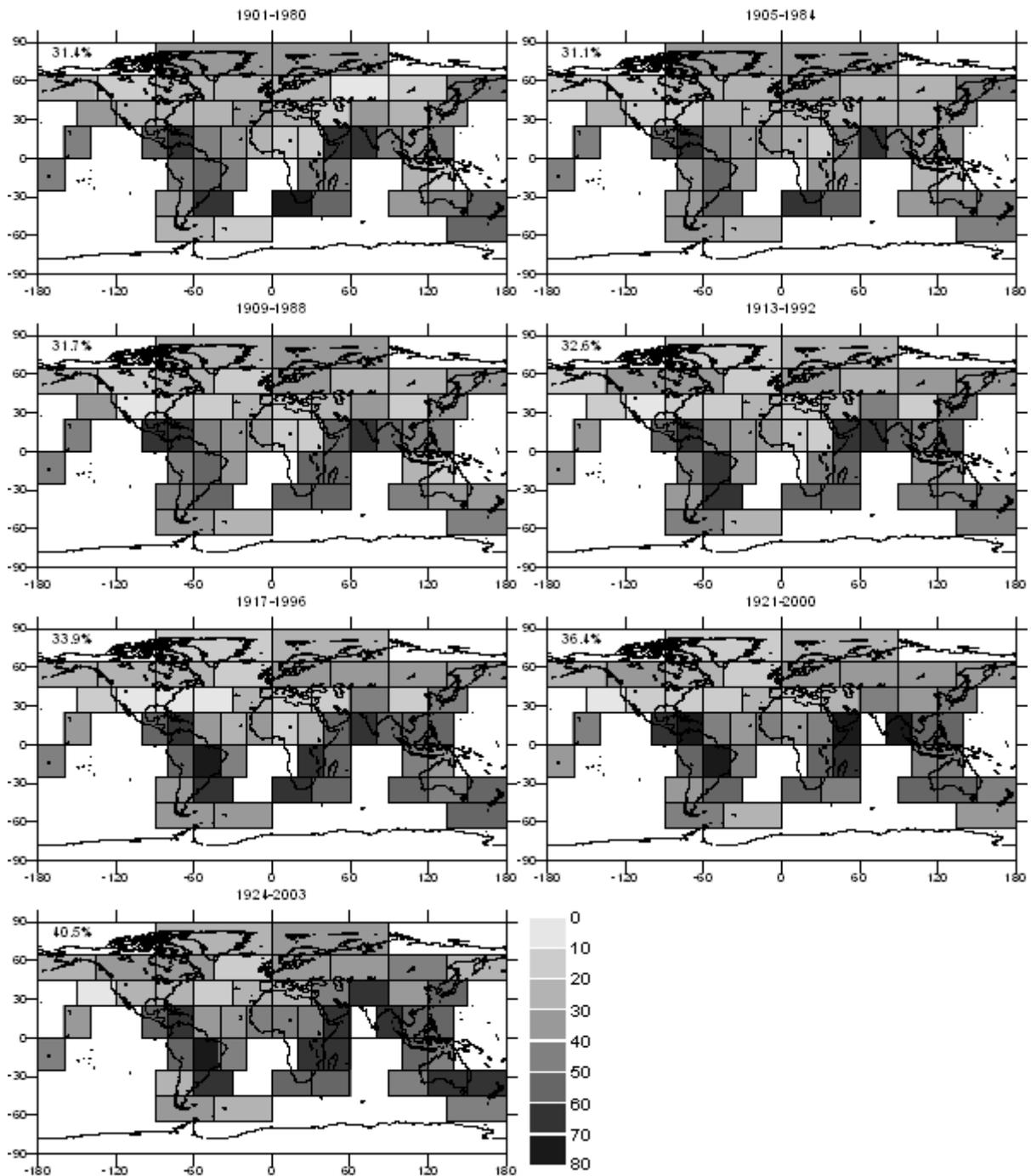


Abb. 15: wie Abb. 14, jedoch zeitlich gleitende Betrachtung. Dargestellt sind die Ergebnisse für 80-jährige Zeitintervalle zwischen 1901-1980 und 1924-2003.

Für das Gesamtdatenfeld kann besonders im Hinblick auf die jüngeren Intervalle eine Zunahme der erklärten Varianz konstatiert werden. So steigt der Wert im Verlauf von rund 31% (1901-1980) auf etwa 41% (1924-2003) an. Dies deutet auf ein Ansteigen der Bedeutung eines oder mehrerer Einflüsse hin. Zur Frage, welche Einflüsse zu dieser Zunahme führen, kann an dieser Stelle noch keine Aussage getroffen werden. Erst die Beschränkung der angebotenen Regressoren auf jeweils eine Einflussklasse

kann zur Feststellung des individuellen Anteils eines Einflusses an der erklärten Varianz führen. Entsprechende Analysen und Ergebnisse werden auf den Seiten 40-43 präsentiert.

Im Folgenden sollen nun die Temperatur-Signale der internen Wechselwirkungen ENSO und NAO für ausgewählte Jahre dargestellt werden. In Abb. 16 ist das dem ENSO-Einfluss zugeordnete Signalfeld für das Jahr 1987 dargestellt, ein Jahr mit einem niedrigen SOI-Wert (El-Niño-Ereignis). Angegeben sind die Abweichungen vom mittleren Signal am jeweiligen Ort, der zugrunde liegende Analysezeitraum ist 1901-2003. Auch wenn viele Gebiete des tropischen Pazifiks nicht durch Zeitreihen repräsentiert sind, zeichnet sich ein insgesamt typisches Signalmuster ab, mit positiven Abweichungen im Einflussbereich des tropischen Ost- bis Zentralpazifiks und in den Gebieten des nördlichen indischen Ozeans. Aber auch außertropisch sind teilweise deutliche Signale zu erkennen. Dabei zeigen sich in Europa und Nordasien negative Ausschläge, während sich weiter östlich im nordwestlichen Nordamerika die Signal-Vorzeichen wieder umkehren, wodurch deutlichen Gegensätze über dem Nordpazifik entstehen. Abb. 17 illustriert das ENSO-Signalfeld für das Jahr 1975, das ein deutliches Kaltwasser- oder La-Niña-Ereignis markiert. Im Vergleich zum El-Niño-Jahr 1987 sind hier die Vorzeichen der Temperatur-Signale umgekehrt, was Ausdruck und Auswirkung der gegenteiligen atmosphärisch-ozeanischen Strömungsanomalien ist [1].

Die Nordatlantik-Oszillation ist im Unterschied zur Southern Oscillation in ihrer Wirkung auf die Temperaturdaten regional begrenzter und zeitlich im Wesentlichen auf die Wintermonate beschränkt. In Abb. 18 und 19 sind die NAO-Signalfelder für die Jahre 1941 und 1961, berechnet für die Jahresmittel der Temperatur im Zeitraum 1901-2003, dargestellt. Der stark negative NAO-Index im Jahre 1941 führt zu negativen Signalen in Europa sowie West- und Zentralasien, sowie positiven Abweichungen im Nordosten Nordamerikas und im Bereich von Grönland. Die größten Signale werden in den benachbarten Gebieten Grönland (+0,55 K) und Europäische Arktis (-0,66 K) registriert. Ein gegenteiliges Bild bietet das NAO-Signalfeld des Jahres 1961 (Jahr mit hohem NAO-Index): Der Nordosten Nordamerikas und Grönland weisen negative Signale bis -0,5 K auf, während Mittel- und Nordeuropa positive Abweichungen bis +0,6 K zeigen.

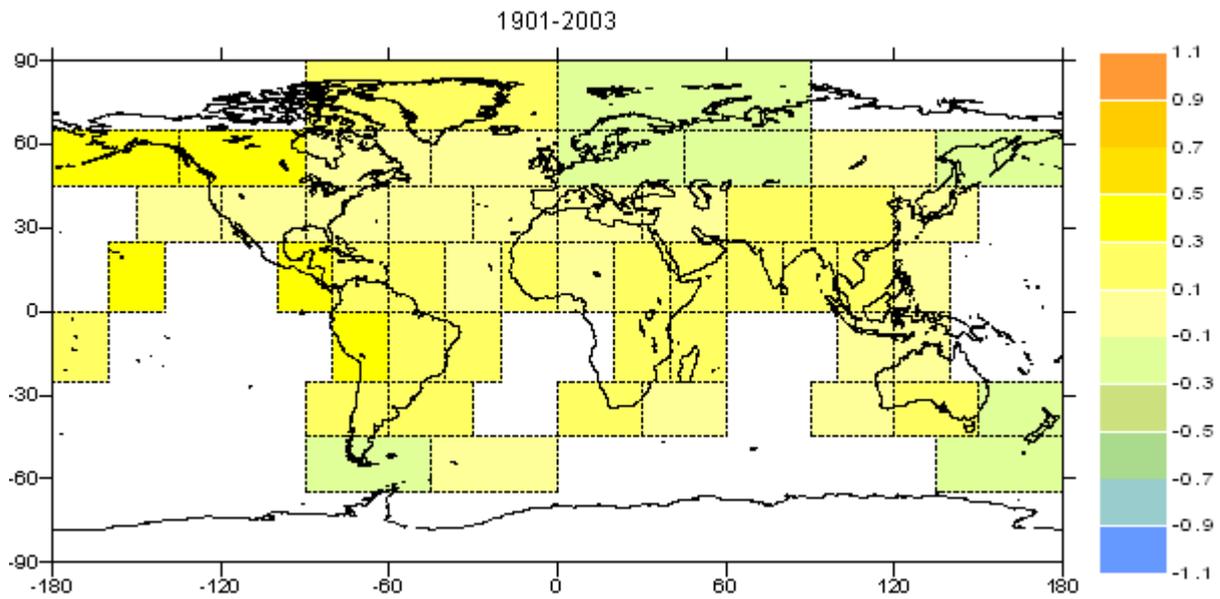


Abb. 16: ENSO-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel für das Jahr 1987 (El-Niño-Ereignis), basierend auf Analysezeitraum 1901-2003.

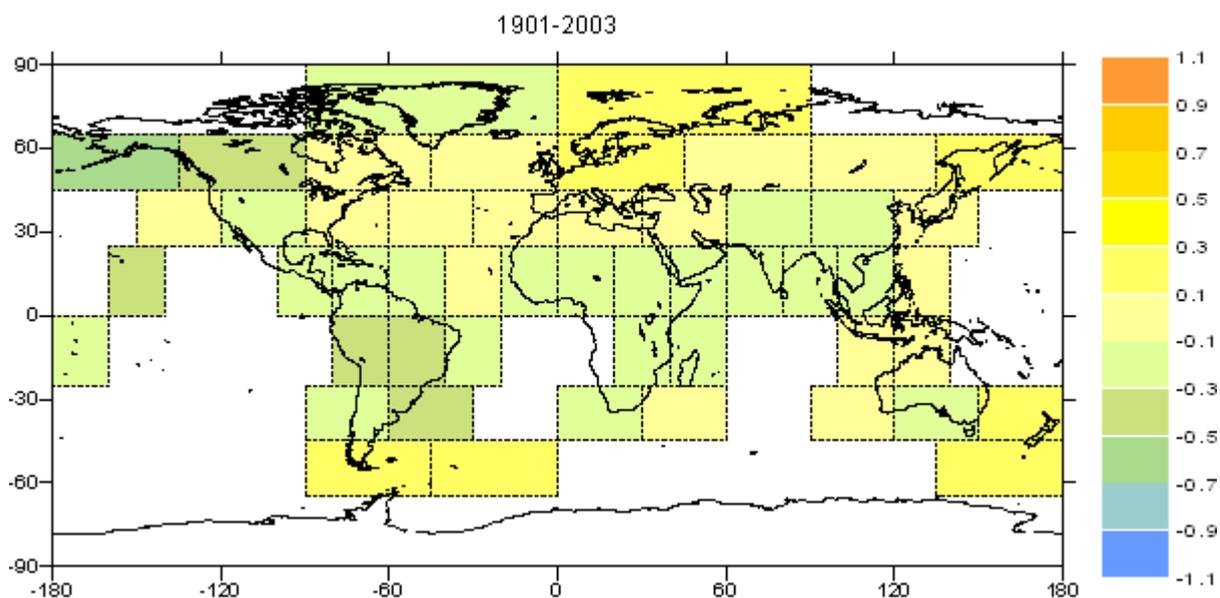


Abb. 17: ENSO-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel für das Jahr 1975 (La-Niña-Ereignis), basierend auf Analysezeitraum 1901-2003.

In Abb. 20 ist das Vulkanismus-Signalfeld für 7 aufeinander folgende Jahre zwischen 1990 und 1996 dargestellt, um den ermittelten Einfluss der durch den Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen im Sommer 1991 emittierten Aerosole auf das Temperaturfeld zu illustrieren. Erneut wurden die Jahresmittel der Temperatur für den Zeitraum 1901-2003 analysiert. Im Jahr 1990, also ein Jahr vor dem Ausbruch,

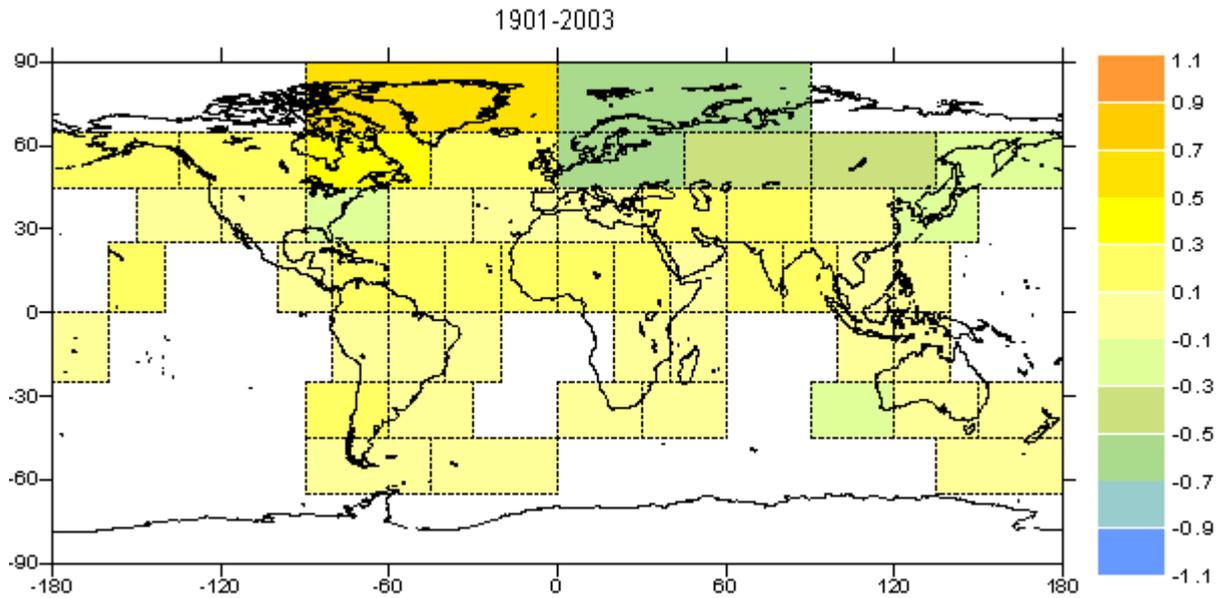


Abb. 18: NAO-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel für das Jahr 1941, basierend auf dem Analysezeitraum 1901-2003.

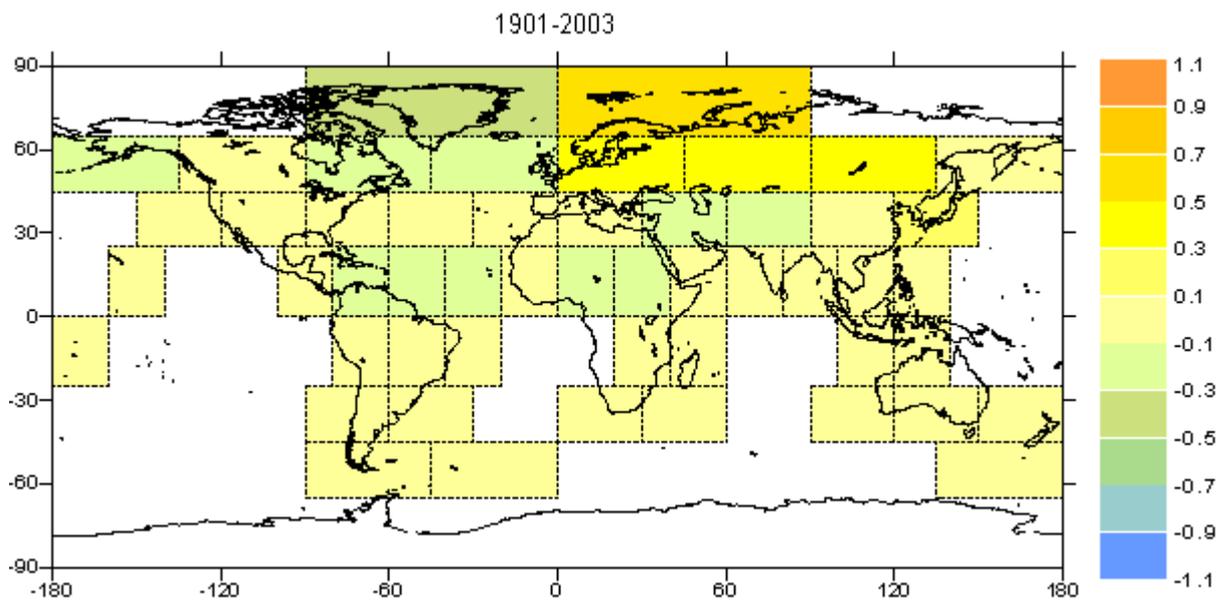


Abb. 19: NAO-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel für das Jahr 1961, basierend auf dem Analysezeitraum 1901-2003.

liegen sämtliche Signale bei exakt 0 K, da in den Jahren zuvor kein klimawirksamer Ausbruch stattgefunden hat. Die Eruptionen des Pinatubo zwischen Juni und August 1991 sorgt für erste schwache Signale noch im gleichen Jahr. In den Jahren 1992 und 1993 sind die größten Abweichungen zu beobachten. Dabei fallen die Signale mit bis zu -0,67 K in den hohen nördlichen Breiten am größten aus, nur einzelne Gebiete im Pazifik und der südlichste Atlantik weisen anfangs noch leicht

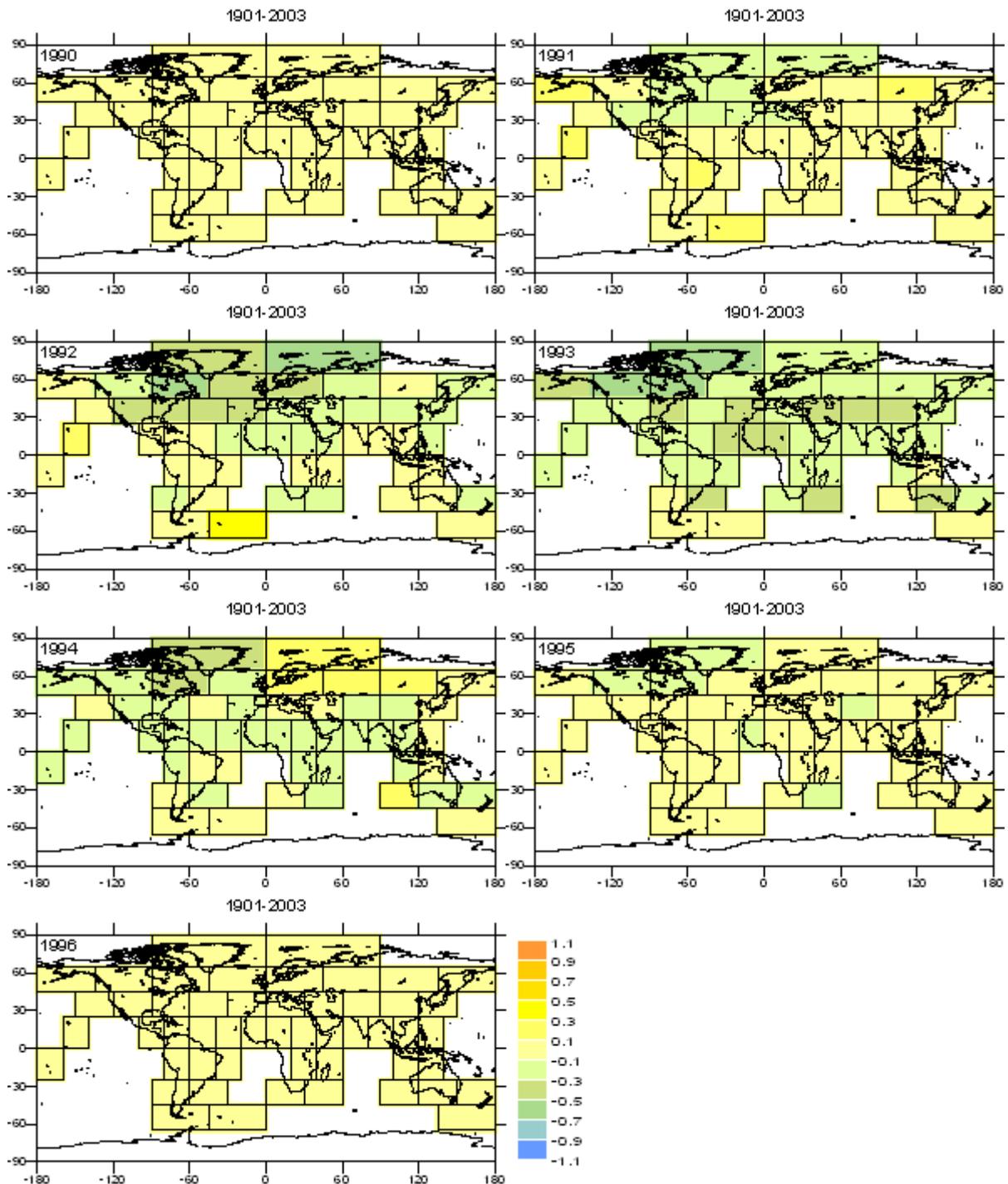


Abb. 20: Vulkanismus-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für die Jahre 1990-1996. Signale relativ zu den Werten von 1962 (Nullniveau).

positive Signale auf. 1994 schwächen sich die Signalwerte in den meisten Gebieten mit Abnahme der Sulfatkonzentration in der Stratosphäre wieder ab, im Bereich des europäischen und nordasiatischen Kontinents kehrt sich das Vorzeichen sogar um. In den Jahren 1995 und 1996 schließlich klingen sämtliche Signale wieder auf Werte nahe 0 K ab.

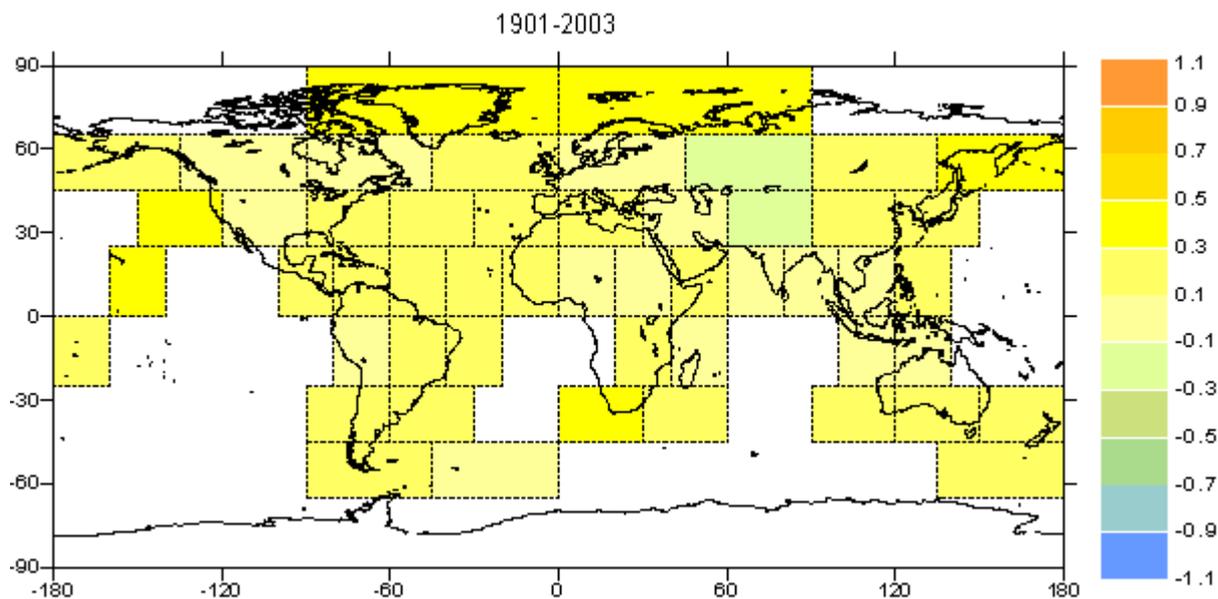


Abb. 21: Solares Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für das Jahr 1980. Die Werte wurden relativ zum Bezugsjahr 1927 (dem Jahr des niedrigsten solaren Maximums innerhalb des Überschneidungs-Zeitraums 1924-1980) berechnet.

Abb. 21 zeigt das Signalfeld des solaren Einflusses für das Jahr 1980, berechnet für die Temperatur-Jahresmittel 1901-2003. Um eine Vergleichbarkeit mit den anschließend vorgestellten 80-jährig zeitlich gleitenden Analysen zu ermöglichen, wurden die Signale für das Jahr des höchsten solaren Maximums (1980) innerhalb des Überschneidungs-Zeitraums 1924-1980 relativ zum niedrigsten Maximum im gleichen Zeitraum (1927) ausgegeben. Bis auf einzelne Ausnahmen führt der Anstieg der solaren Strahlungsflussdichte im betrachteten Zeitraum zu positiven Temperatur-Signalen. Dabei zeigen sich im Einflussbereich der Ozeane die etwas höheren Werte, während über den großen Kontinenten eher kleine oder sogar negative Signale vorherrschen. Diese Ergebnisse dürfen jedoch nicht überinterpretiert werden, da aufgrund der in beiden Einflussreihen vorhandenen Trendkomponente der solare Einfluss in Konkurrenz zum anthropogenen Treibhausgas-Einfluss steht. Im multiplen Modell (unter Berücksichtigung beider Einflüsse) vermindert das höhere Signal des einen Einflusses aufgrund hoher Kovarianz den Signalwert des anderen.

In Abb. 22 und 23 sind die entsprechenden Signalfelder des anthropogenen Treibhausgas-Einflusses für die Jahre 1980 und 2003 dargestellt. Alle Werte sind relativ zum Jahr 1901 berechnet worden. Man erkennt mit Ausnahme des Gebietes Grönland ausschließlich positive Signale. Die höheren Werte sind dabei in den

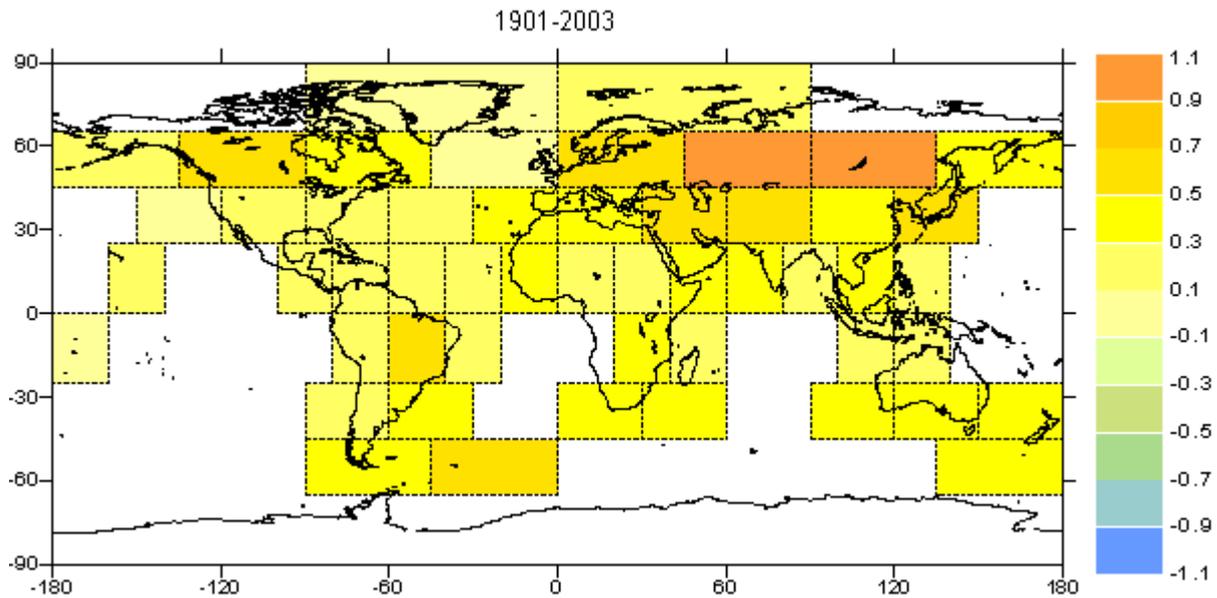


Abb. 22: Anthropogenes Treibhausgas-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für das Jahr 1980. Die Werte wurden relativ zum Jahr 1901 berechnet.

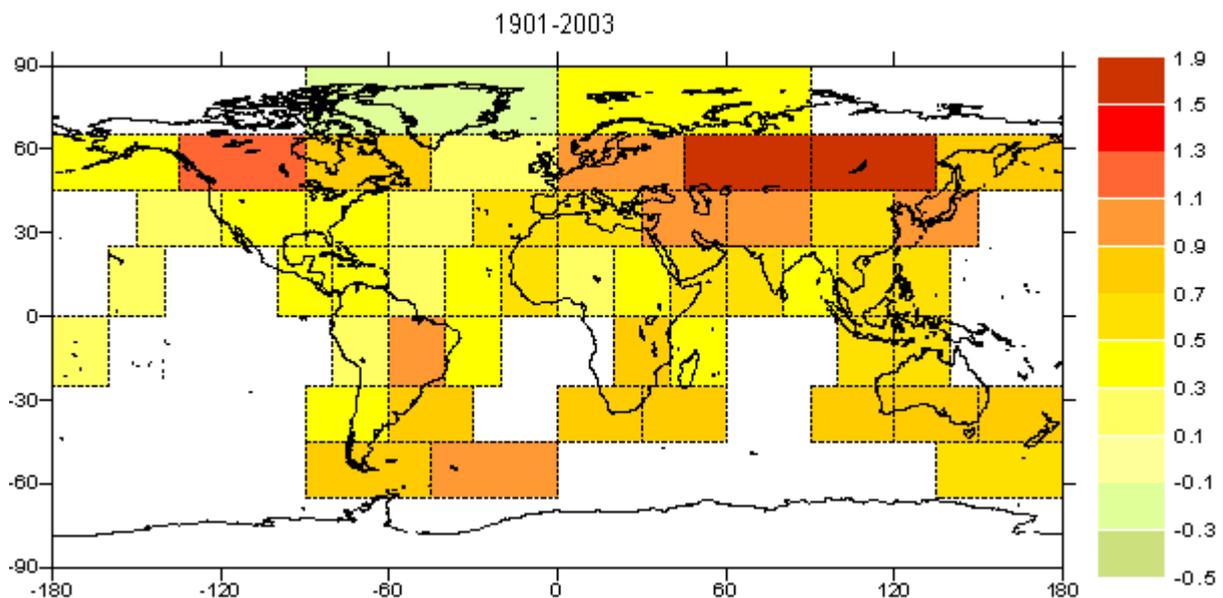


Abb. 23: Anthropogenes Treibhausgas-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für das Jahr 2003. Die Werte wurden relativ zum Jahr 1901 berechnet.

mittleren bis höheren Breiten ( $45-65^\circ$ ), insbesondere in den kontinental geprägten Gebieten der Nordhemisphäre vorzufinden. Für das Jahr 1980 liegt das größte Signal bei 1,0 K im kontinentalen Russland. Entsprechend dem Anstieg der Einflussgröße wachsen die Signale bis zum Jahr 2003 noch einmal deutlich an und erreichen Werte bis 1,9 K. Im direkten Vergleich zum solaren Einfluss wird dem Einfluss durch anthropogene Treibhausgase bereits 1980 vom Modell ein etwas höheres Signal-Gewicht zugewiesen.

Beide Einflussgrößen erfahren im Verlauf des 20. Jahrhunderts eine Zunahme. Während sich der Anstieg bei den anthropogenen Treibhausgasen stetig intensiviert hat, ist die solare Einflussgröße – klammert man den elfjährigen Zyklus aus – seit dem Maximum im Jahre 1981 in etwa unverändert geblieben. Vor dem Hintergrund dieser unterschiedlichen Entwicklung beider Größen in den letzten 25 Jahren sind für die zeitlich gleitenden Analysen, die im Folgenden vorgestellt werden, gewisse Änderungen in den Signalfeldern zu erwarten.

In Abb. 24 sind die solaren Signale im Jahr 1980 (relativ zum Wert von 1927) für verschiedene 80-jährige Zeitfenster (jeweils oberhalb der Grafik angezeigt) gezeigt. Für die älteren Zeitintervalle ergeben sich verbreitet positive Signale, die im Gebiet Grönland mit bis zu +1,06 K sehr deutlich ausfallen. Mit Verschiebung des Zeitfensters in die Neunziger Jahre hinein nehmen die positiven Signale vor allem in der Nordhemisphäre deutlich ab, um in den jüngsten Zeitintervallen sogar negative Werte anzunehmen. So weist das Gebiet Grönland für den Zeitraum 1924-2003 einen Signalwert von -0,63 K auf. Diese teilweise deutlichen Änderungen sind zunächst schwer zu interpretieren. So sind negative Signale durch solaren Einfluss, wie sie in den jüngeren Zeitfenstern vermehrt auftauchen, unplausibel – da die Einflussgröße zwischen 1927 und 1980 zugenommen hat –, lassen sich aber möglicherweise durch die Konkurrenz zum anthropogenen Einfluss und eine resultierende Falschanpassung des Modells erklären.

Für die 80-jährig zeitlich gleitenden Berechnungen des anthropogenen Treibhausgas-Signalfeldes (vgl. Abb. 25) – im Folgenden auch kurz GHG-Signalfeld (GHG: Greenhouse Gases) genannt – ergeben sich nur für die Südhemisphäre etwa gleich bleibende Signalgrößen. Bei Betrachtung der Nordhemisphäre zeigen sich für die frühen Zeitfenster viele negative Signale (bis -1,1 K im Gebiet Grönland), die sich mit fortschreitender Verschiebung des Analysezeitraums mehr und mehr abbauen, um schließlich für das jüngste Zeitintervall in allen Gebieten positiv auszufallen. Wie schon beim solaren Einfluss kann man auch im Falle der anthropogenen Treibhausgase negative Korrelationen zur Temperatur beobachten, was unplausibel erscheint. Die Tatsache, dass positive Signale des einen Einflusses mit negativen Signalen des anderen korrespondieren, deutet eine falsche Anpassung des zugrunde liegenden Modells an, die wohl auf die ähnliche Trendkomponente in den

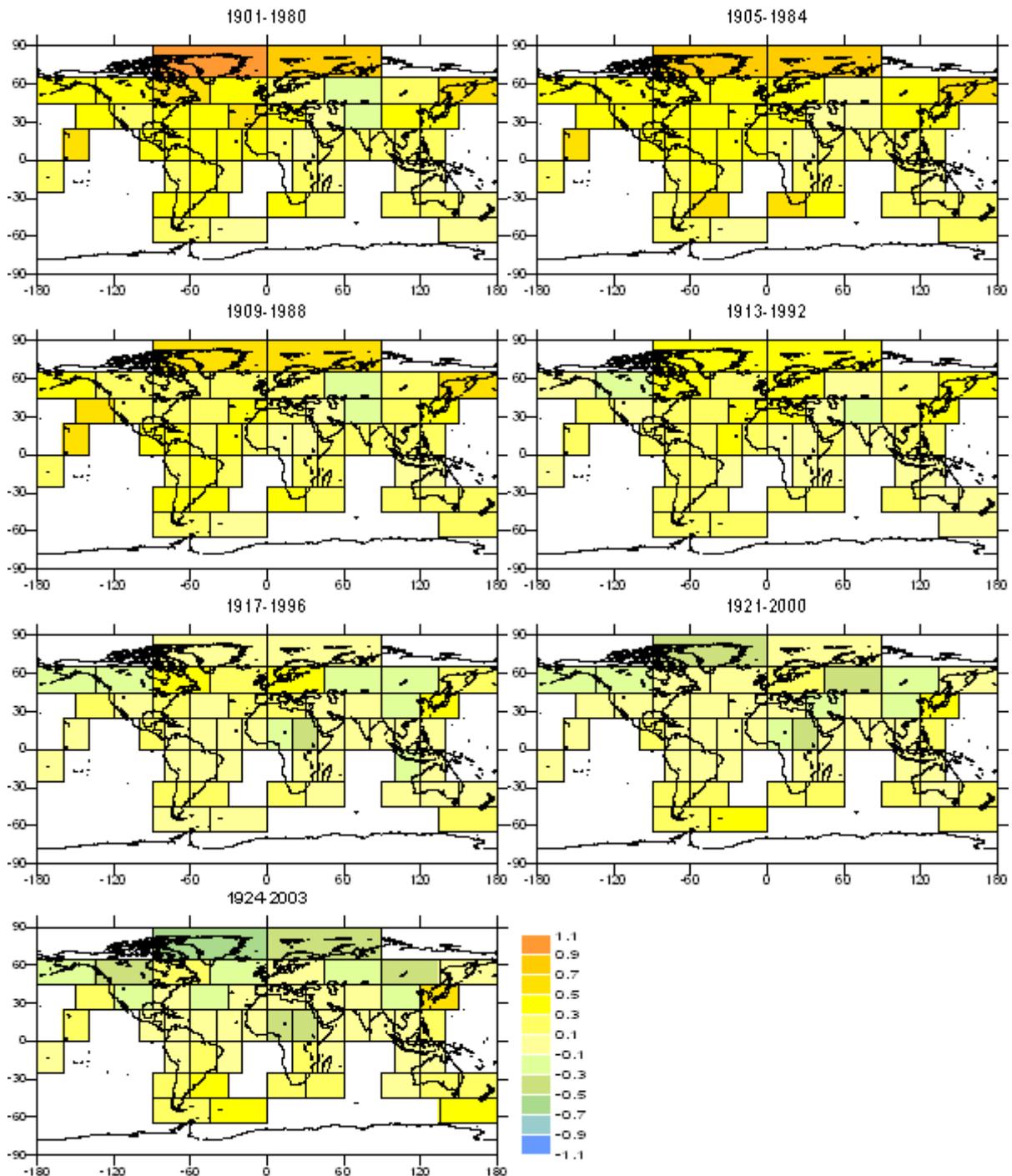


Abb. 24: wie Abb. 21, jedoch zeitlich gleitende Betrachtung. Dargestellt sind die Ergebnisse für 80-jährige Zeitintervalle zwischen 1901-1980 und 1924-2003.

Zeitreihen der beiden Einflüsse bis etwa 1980 zurückzuführen ist:

Der signifikantere der beiden Einflüsse geht als erster in das Modell ein. In einem späteren Regressionsschritt kann möglicherweise der andere Einfluss einen unabhängigen Erklärungsbeitrag zum bisherigen Residuum leisten, muss dann aber

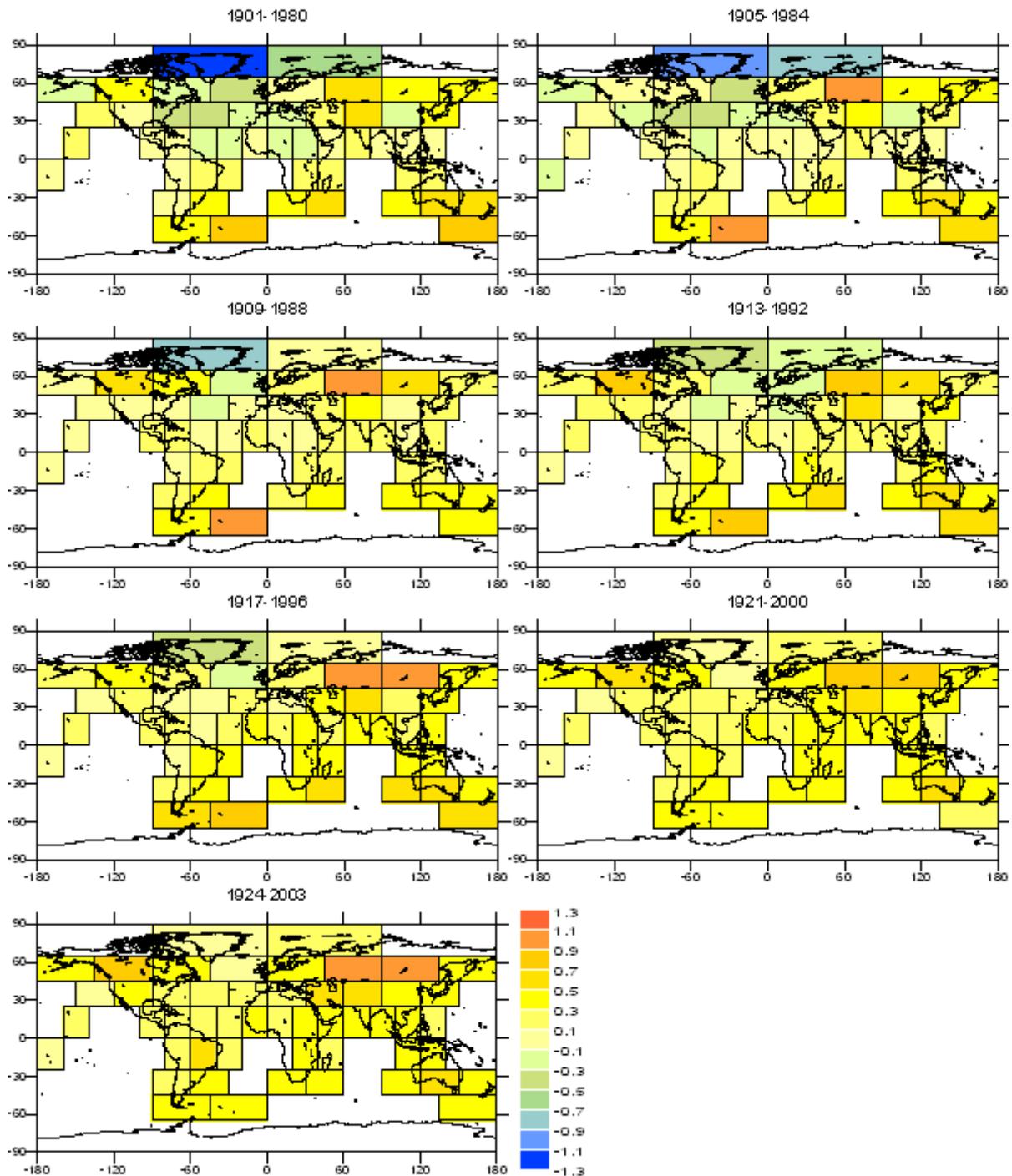


Abb. 25: wie Abb. 22, jedoch zeitlich gleitende Betrachtung. Dargestellt sind die Ergebnisse für 80-jährige Zeitintervalle zwischen 1901-1980 und 1924-2003.

mit allen Varianzanteilen (auch der kovarianten Trendkomponente) im multiplen Modell berücksichtigt werden. Geht dieser Regressor mit positivem Koeffizienten in das Modell ein, verringert sich der Regressionskoeffizient des anderen. Bei umgekehrtem Vorzeichen vergrößert sich der Regressionskoeffizient und damit das Signal des zuerst berücksichtigten Einflusses. In beiden Fällen kommt es dabei zu

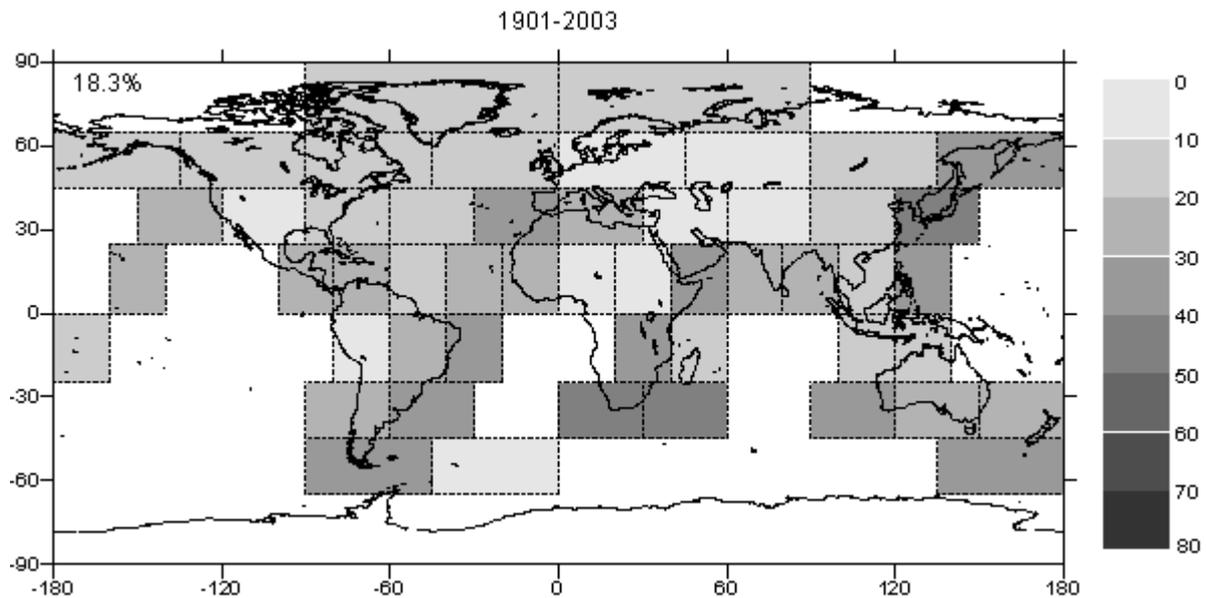


Abb. 26: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes der Temperatur-Jahresmittel (Zahlenwert links oben), sowie in den einzelnen Gebieten (Graucode) bei **Beschränkung der Regressoren auf den solaren Einfluss** für den Analysezeitraum 1901-2003; alle Zahlenangaben in %.

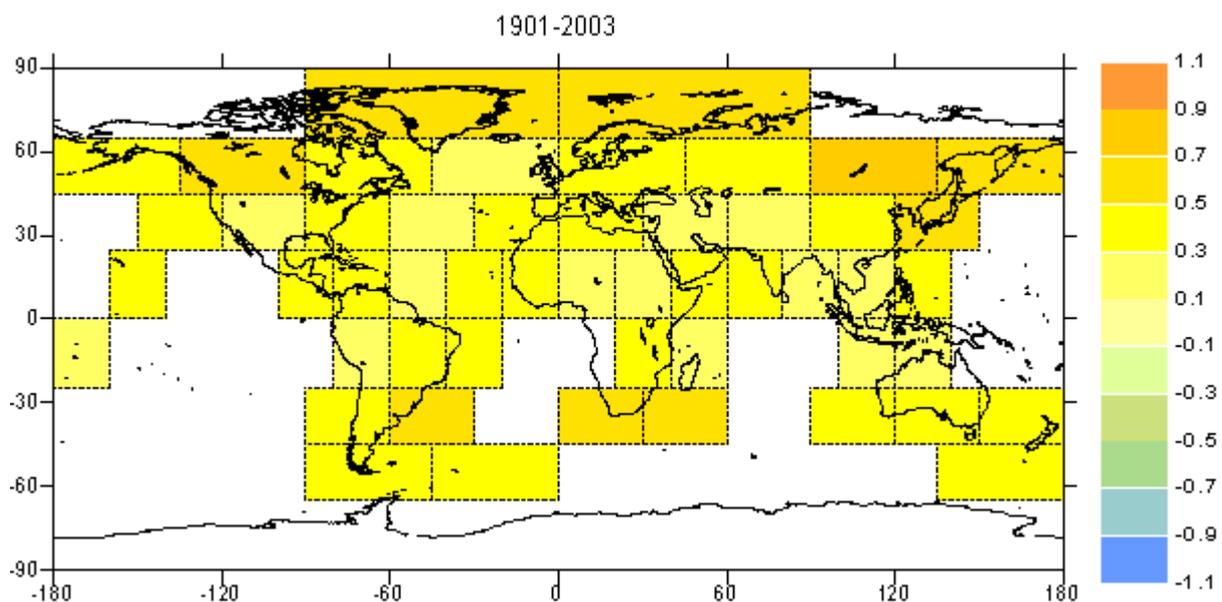


Abb. 27: Solares Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für das Jahr 1980, bei **Beschränkung der Regressoren auf den solaren Einfluss**. Die Werte wurden relativ zum Bezugsjahr 1927 (dem Jahr des niedrigsten solaren Maximums innerhalb des Überschneidungszeitraums 1924-1980) berechnet.

einer störenden Überlagerung mit möglicherweise verfälschten Einzel-Signalfeldern.

Eine Möglichkeit, die bestehende Konkurrenzsituation beider Einflüsse zu umgehen, liegt in der Beschränkung des Modells auf jeweils eine der beiden Einflussklassen. Dadurch erhält man eine klare Trennung der Signale und der erklärten Varianzen und kann so bessere Aussagen über die Bedeutung beider Einflüsse treffen.

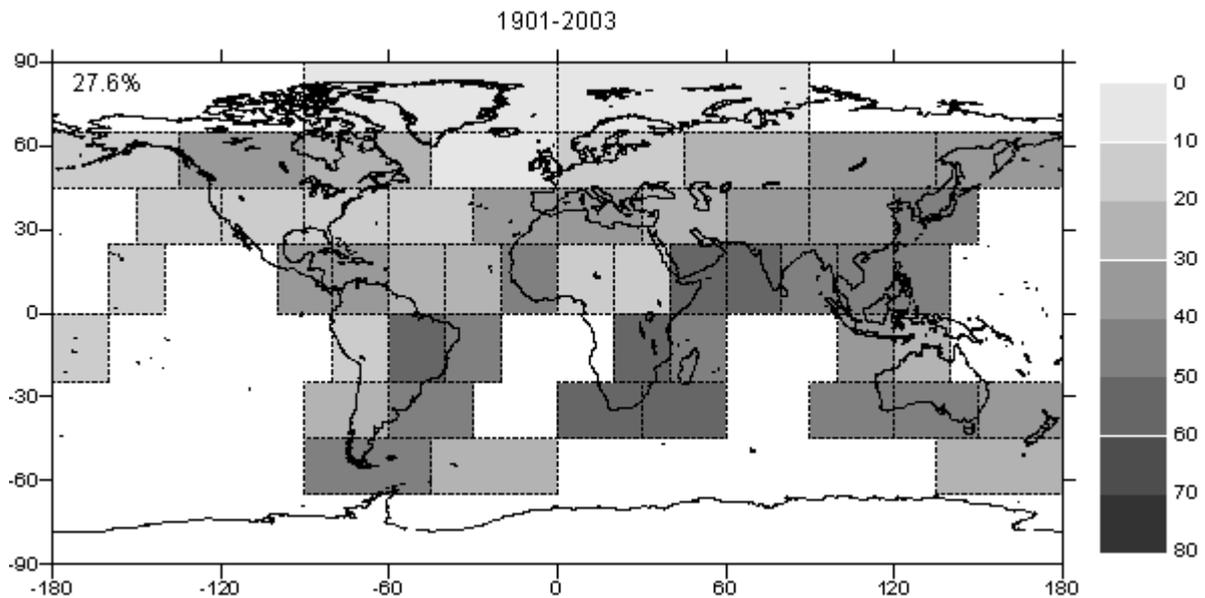


Abb. 28: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes der Temperatur-Jahresmittel (Zahlenwert links oben), sowie in den einzelnen Gebieten (Farbcode und Beschriftung) bei **Beschränkung der Regressoren auf den GHG-Einfluss** für den Analysezeitraum 1901-2003; alle Zahlenangaben in %.

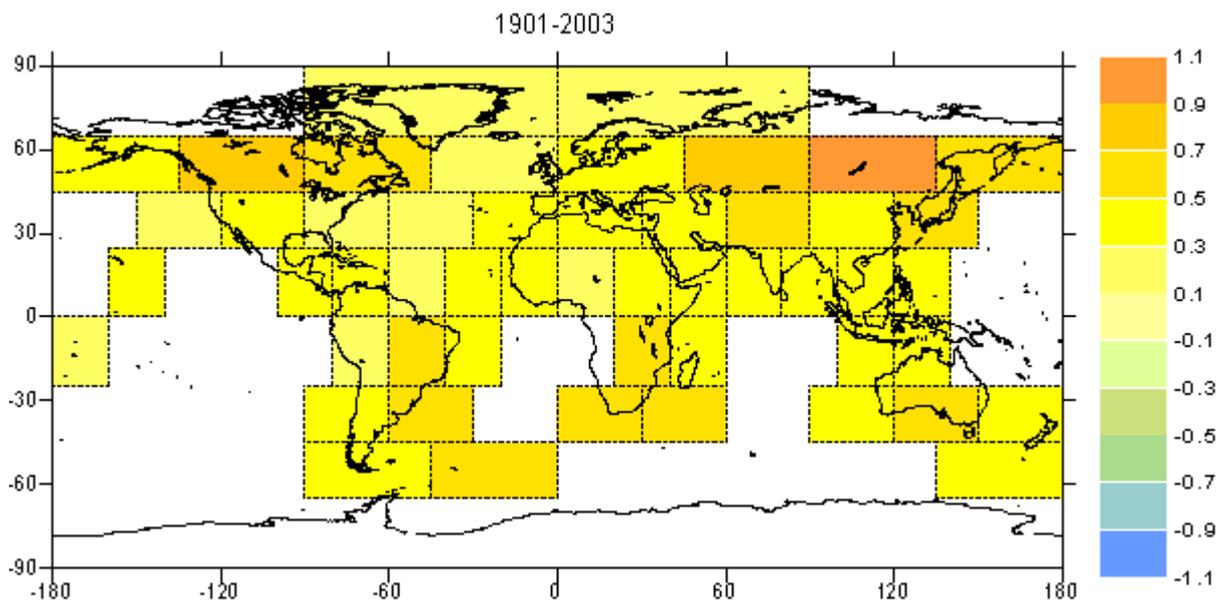


Abb. 29: Anthropogenes Treibhausgas-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für das Jahr 1980 **bei Beschränkung der Regressoren auf den GHG-Einfluss**. Die Werte wurden relativ zum Jahr 1901 berechnet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser auf jeweils eine Einflussklasse beschränkten Analysen präsentiert. Abb. 26 zeigt die durch den solaren Einfluss erklärten Varianzen, Abb. 27 das solare Signalfeld im Temperatur-Datenfeld 1901-2003. Im Vergleich zum multiplen Modell (vgl. Abb. 21) liegen die Signalwerte etwas höher – was durch das Fehlen des GHG-Einflusses erklärt werden kann – und das Feld ist homogener. Einige hohe Werte in den mittleren und hohen nördlichen

Breiten stehen im Zusammenhang mit relativ geringer erklärter Varianz (rund 10%), so dass die Aussagekraft dieser Signale nicht groß ist. Für das gesamte Datenfeld beträgt die erklärte Varianz immerhin 18%.

In den Abb. 28 und 29 sind die erklärten Varianzen und Signalwerte des anthropogenen Treibhausgas-Einflusses für den Zeitraum 1901-2003 dargestellt. Erneut wurde bei der Modellierung genau eine Einflussklasse angeboten. Im Vergleich zum separierten solaren Einfluss kann der GHG-Einfluss insgesamt mehr Varianz erklären (28%). Das GHG-Signalmuster ähnelt dabei dem entsprechenden Muster aus dem multiplen Modell (vgl. Abb. 22), mit hohen Signalen im Bereich der kontinental geprägten Gebiete der Nordhemisphäre, die gleichzeitig relativ viel Varianz (rund 30%) erklären können.

Des Weiteren ist nun von Interesse, wie sich die Ergebnisse für die 80-jährig zeitlich gleitenden Analysen bei Beschränkung auf die Einzelklassen GHG und SOL gestalten. Abb. 30 zeigt den Verlauf der Erklärten Varianzen bei Variation des Zeitfensters zwischen 1901-1980 und 1924-2003 für die beiden Einzelklassen sowie für das multiple Modell unter Berücksichtigung aller Einflüsse (GES). Die erklärten Varianzen (abgekürzt: EV) bleiben für die 80-jährigen Intervalle etwas hinter den Werten für den Gesamtzeitraum (18 bzw. 28%) zurück, was auf eine schlechtere Anpassung an die gemessene Temperatur-Variabilität bei Verkürzung des Zeitfensters zurückzuführen ist. Im Verlauf fallen die durch SOL erklärten Varianzen von 14% auf 7% ab, während die EV durch GHG deutlich zunehmen (von 9% auf 23%). Der Anstieg der Temperaturen in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts (vgl. Abb. 3) kann offenbar gut durch die solaren Schwankungen erklärt werden, die bis zum Beginn der 80er Jahre eine deutliche Trendkomponente aufweisen. Seit dieser Zeit jedoch oszilliert die Solarkonstante auf einheitlichem Niveau, während das globale Temperatur-Mittel einen verstärkten Anstieg durchlaufen hat. Mit Berücksichtigung dieses jüngeren Zeitintervalls fallen die durch den solaren Einfluss erklärten Varianzen ab, was den Schluss nahe legt, dass die kurzfristigen, quasi-elfjährigen Schwankungen kaum nachweisbare Auswirkungen auf das Temperatur-Datenfeld haben. Bei Betrachtung der durch die anthropogenen Treibhausgase erklärten Varianzen zeigen sich umgekehrte Trends: Die Abkehr vom positiven Temperatur-Trend, im globalen Mittel in etwa zwischen 1950 und 1980 zu

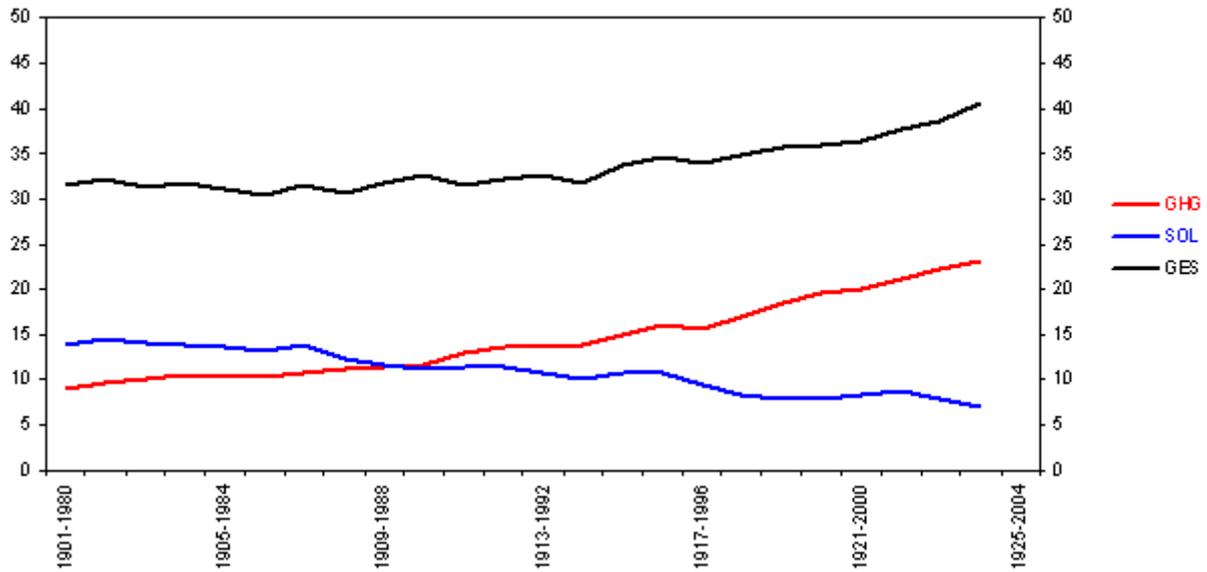


Abb. 30: Verlauf der durch den solaren Einfluss (SOL) und anthropogenen Treibhausgas-Einfluss (GHG) am Gesamtdatenfeld der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 erklärten Varianz für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

beobachten, führt dazu, dass für das Analyseintervall 1901-1980 global betrachtet nur ein schwacher Zusammenhang zwischen beiden Größen (9% EV) auszumachen ist. Erst der neuerliche Anstieg des globalen Mittels seit Beginn der Achtziger Jahre lässt die Bedeutung der anthropogenen Treibhausgase bei der statistischen Modellierung stetig ansteigen, so dass für das Zeitfenster 1924-2003 23% der Varianz erfasst werden. Weitergehende Interpretationen zu den zeitlich gleitend berechneten EV folgen in Kapitel 4.1.3, in welchem entsprechende Ergebnisse für den erweiterten Zeitraum 1881-2003 präsentiert werden.

#### 4.1.2 Saisonale Mittel 1901-2003

Im Folgenden sollen anstelle der Temperatur-Jahresmittel die saisonalen Mittel für Sommer und Winter (bezogen auf die Nordhemisphäre) mit der Schrittweisen Regression analysiert werden. Auf eine jahreszeitliche Anpassung der Einflussgrößen wurde dabei mit Ausnahme der NAO verzichtet.

Abb. 31 zeigt die EV, wie sie sich bei der Analyse der Wintermittel (links) und der Sommermittel (rechts), jeweils bezogen auf die Nordhemisphäre, darstellen.

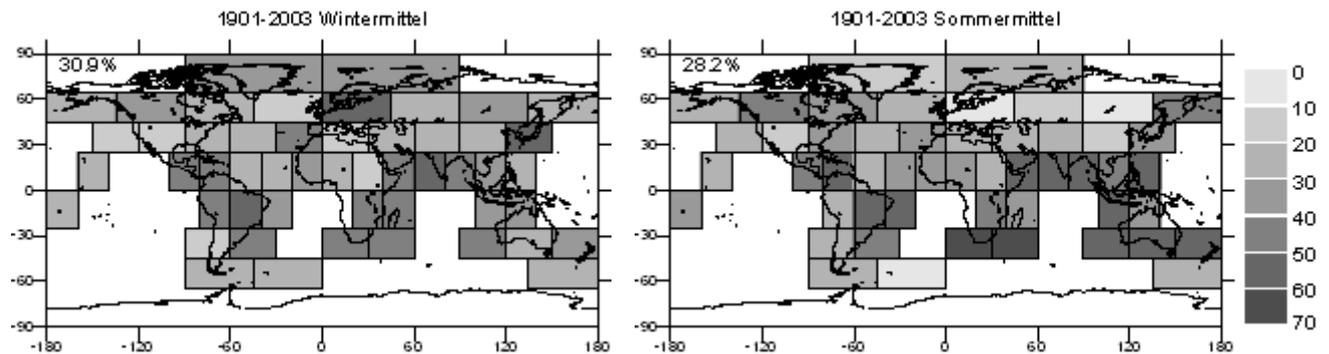


Abb. 31: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes (Zahlenwert jeweils links oben) der saisonalen Temperatur-Mittel nordhemisphärischer Winter (links) und nordhemisphärischer Sommer (rechts), sowie in den einzelnen Gebieten (Graucode) für den Analysezeitraum 1901-2003; alle Zahlenangaben in %.

Nordhemisphärisch liegen die Werte im Winter höher als im Sommer. Insbesondere in den Gebieten mit hohem NAO-Einfluss macht sich eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit bemerkbar. Auch südhemisphärisch zeigen die dortigen Wintermonate meist die höheren EV. Offenbar verringert eine sich verlagernde und im Winter verstärkte Westdrift die Gesamtvarianz in den beeinflussten Gebieten.

Beim Vergleich der saisonalen Signalfelder weist insbesondere der Einfluss durch die Nordatlantik-Oszillation eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit auf. In Abb. 32 sind die entsprechenden Signalfelder im Winter (links) und Sommer (rechts) – Jahreszeiten immer bezogen auf die Nordhemisphäre – des Jahres 1961, einem Jahr mit sehr hohem NAO-Index in beiden Jahreszeiten, dargestellt. Wie bereits in Kapitel 1.4 gesagt wurde, beeinflusst die NAO besonders im Winter die Temperaturen im mittleren und nördlichen Europa sowie im Nordosten Nordamerikas. Im hier gezeigten Winter 1961 fallen die Signale mit bis zu +1,04 K in Europa und -0,84 K im Gebiet Grönland sehr hoch aus. Im gleichjährigen Sommer, der ebenso von einem hohen NAO-Index geprägt ist, sind keine solchen Verteilungsmuster zu erkennen. Allenfalls schwache Signale in Grönland und Nordeuropa, die sich im globalen Vergleich nicht abheben, sind zu konstatieren.

Auch das GHG-Signalfeld zeigt regional teilweise starke jahreszeitliche Unterschiede. In Abb. 33 sind die entsprechenden Signale für das Wintermittel (links) und das Sommermittel (rechts) im Jahre 2003 (normiert zu 1901) dargestellt. Deutlich fallen dabei die sehr hohen Winter-Signale in den Kontinentalgebieten der

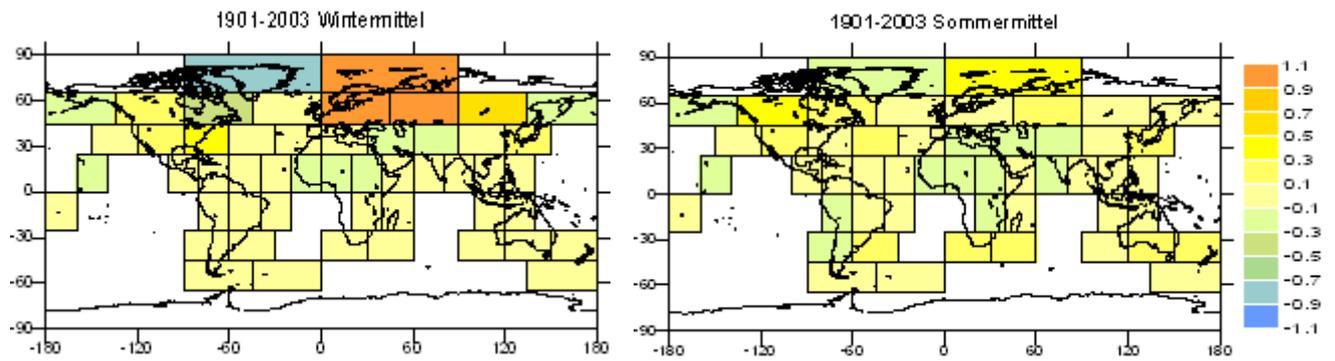


Abb. 32: NAO-Signalfeld in K der saisonalen Temperatur-Mittel nordhemisphärischer Winter (links) und nordhemisphärischer Sommer (rechts) für das Jahr 1961, basierend auf dem Analysezeitraum 1901-2003.

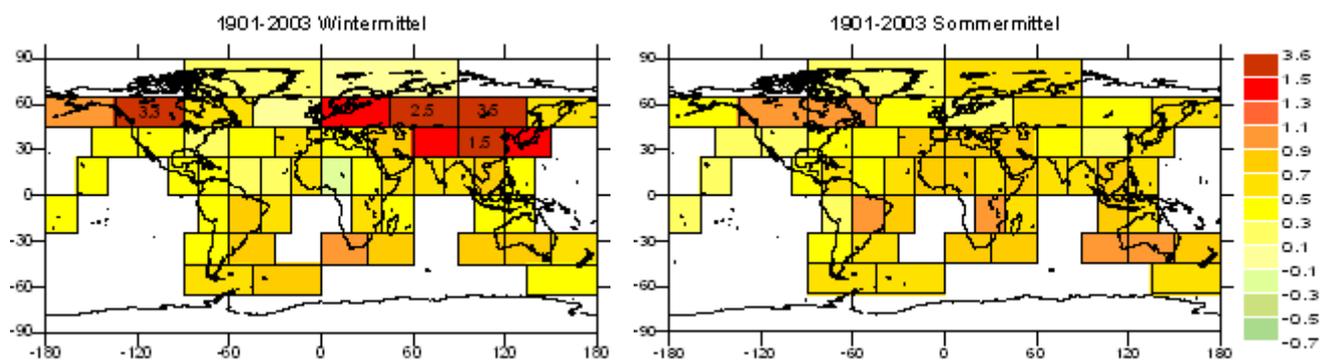


Abb. 33: Anthropogenes Treibhausgas-Signalfeld in K der saisonalen Temperatur-Mittel nordhemisphärischer Winter (links) und nordhemisphärischer Sommer (rechts) für das Jahr 2003 (Werte relativ zu 1901), basierend auf dem Analysezeitraum 1901-2003.

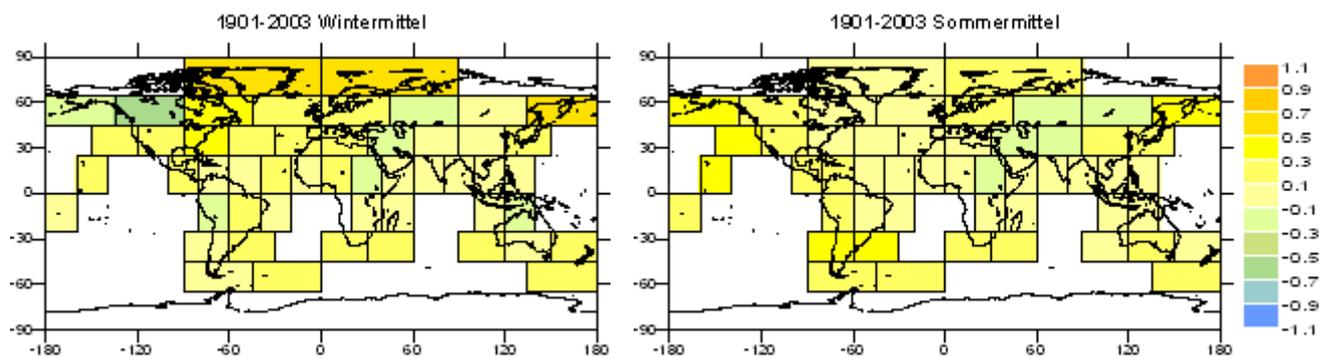


Abb. 34: Solares Signalfeld in K der saisonalen Temperatur-Mittel nordhemisphärischer Winter (links) und nordhemisphärischer Sommer (rechts) für das Jahr 1980 (Werte relativ zu 1927), basierend auf dem Analysezeitraum 1901-2003.

Nordhemisphäre mit Werten teilweise über 3 K (Westkanada: +3,3 K, Westrussland: +2,5 K, Zentralrussland: +3,5 K) auf. Möglicherweise führen Rückkopplungsmechanismen im Zusammenhang mit abnehmender Schneebedeckung oder veränderte Zirkulationsmuster zu verstärkten Temperatur-Trends im Winter.

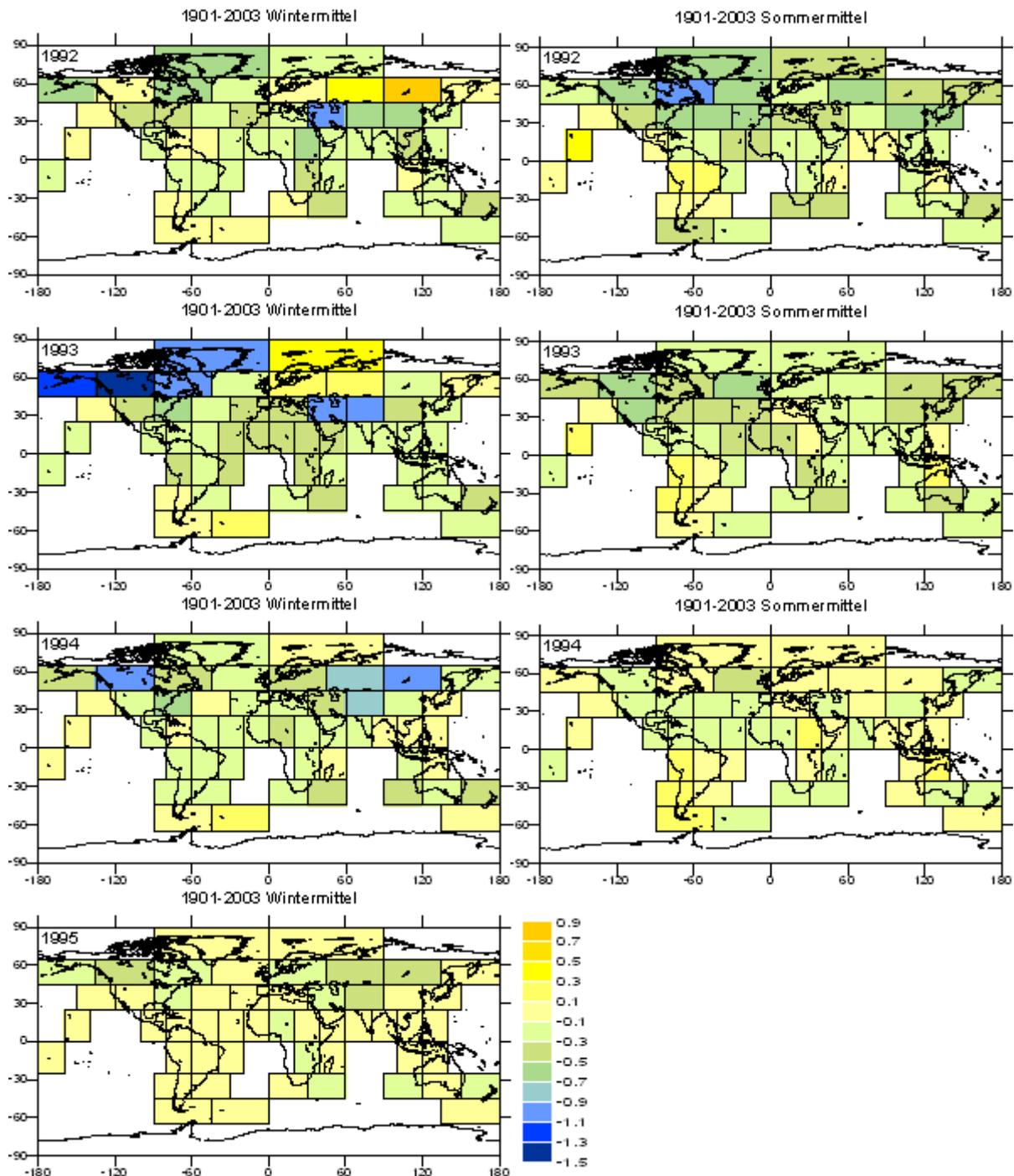


Abb. 35: Vulkanismus-Signalfeld in K der saisonalen Temperatur-Mittel nordhemisphärischer Winter (jeweils links) und nordhemisphärischer Sommer (jeweils rechts) für die Jahre 1992-1995 (Werte relativ zu 1962), basierend auf dem Analysezeitraum 1901-2003.

Ohne stärkere jahreszeitliche Unterschiede fallen die Ergebnisse der solaren Signalfelder aus (vgl. Abb. 34). Die saisonalen Signalgrößen des Jahres 1980 (relativ zu 1927) weichen nur in einzelnen Gebieten des nordamerikanischen Kontinents deutlicher voneinander ab.

Abb. 35 illustriert den Verlauf der jahreszeitlichen Signalfelder des explosiven Vulkanismus zwischen 1992 und 1995. Dabei zeigen sich die stärkeren Temperatursignale in den Wintermonaten, der größte Ausschlag beträgt  $-1,5\text{ K}$  im Jahre 1993. Allerdings sind die Signale beim Wintermittel sehr uneinheitlich, in Europa und Nordasien ergeben sich sogar positive Werte. Dies erscheint unplausibel, lässt sich aber durch eine stratosphärisch induzierte Veränderung der troposphärischen Dynamik [4] durchaus erklären. Für den Einfluss durch ENSO werden hier keine saisonalen Analyseergebnisse präsentiert, da aufgrund der teilweise zeitlich verzögerten Einflussnahme und jahreszeitlicher Schwankungen der Einflussgröße eine saisonale Auflösung nur schwer zu gewährleisten ist.

#### 4.1.3 Jahresmittel 1881-2003

Für wenige ausgewählte Berechnungen soll im Folgenden der Analysezeitraum rückreichend um 20 Jahre erweitert werden. Dadurch verringert sich die Anzahl der Gebiete mit verfügbaren Temperatur-Zeitreihen von 51 auf 38 Gebiete. Unter Berücksichtigung aller Einflüsse wurde das Datenfeld zunächst für den Gesamtzeitraum und anschließend 80-jährig zeitlich gleitend analysiert.

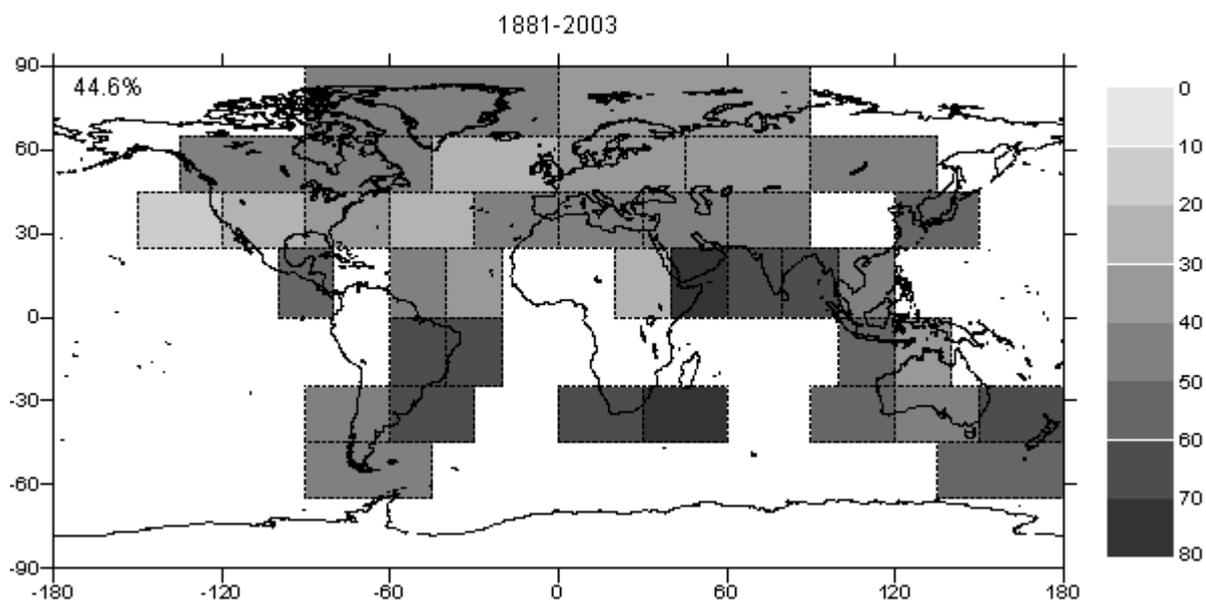


Abb. 36: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes der Temperatur-Jahresmittel (Zahlenwert links oben), sowie in den einzelnen Gebieten (Graucode) für den Analysezeitraum 1881-2003; Zahlenangaben in %.

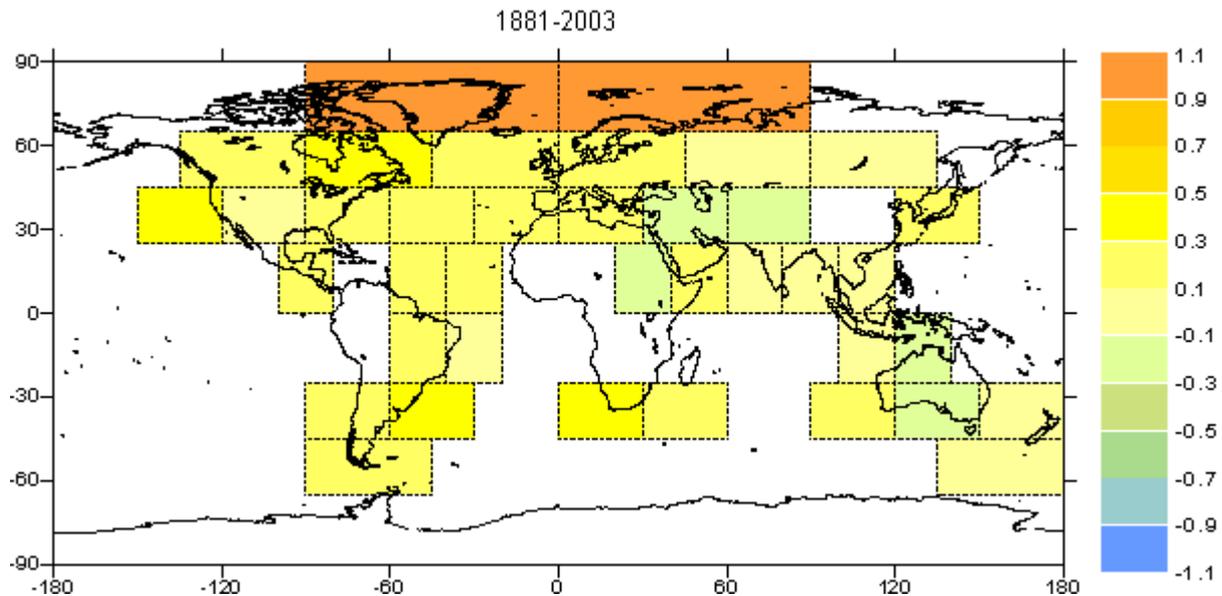


Abb. 37: Solares Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1881-2003 für das Jahr 1981. Die Werte wurden relativ zum Bezugsjahr 1883 (Jahr des niedrigsten solaren Maximums zwischen 1881 und 2003) berechnet.

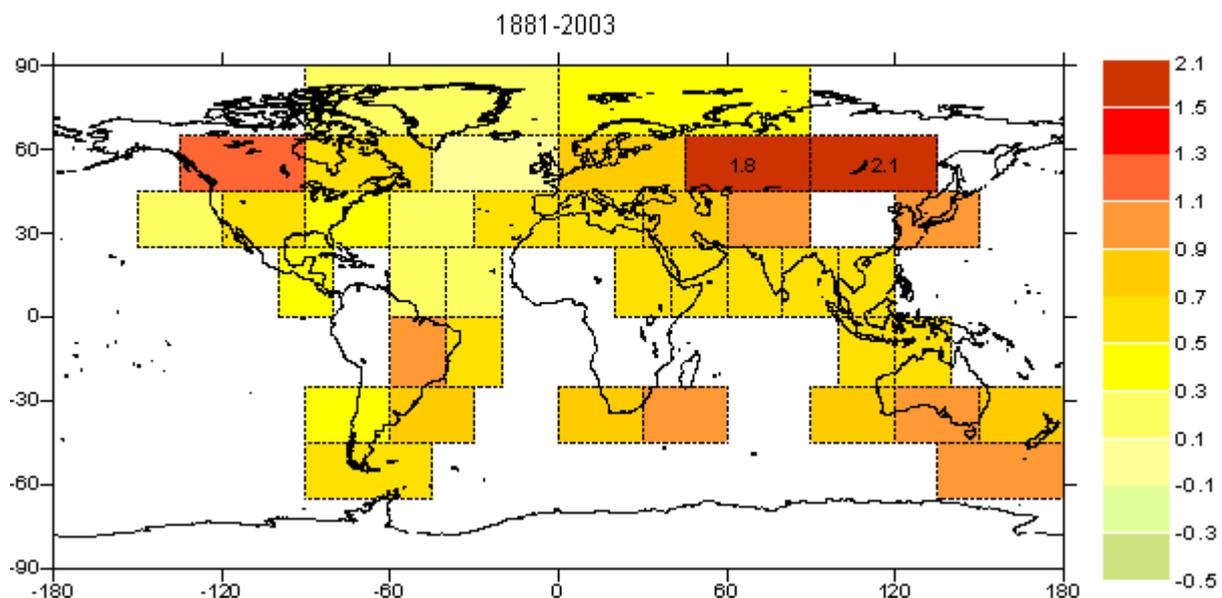


Abb. 38: Anthropogenes Treibhausgas-Signalfeld in K der Temperatur-Jahresmittel 1881-2003 für das Jahr 2003. Die Werte wurden relativ zum Jahr 1881 berechnet.

In Abb. 36 ist die räumliche Verteilung der erklärten Varianzen, berechnet für das Gesamtintervall 1881-2003, dargestellt. Es zeigt sich ein insgesamt ähnliches Bild wie bei den Analysen 1901-2003, mit tendenziell höheren EV in den Gebieten niedriger geographischer Breite. Für das Gesamtdatenfeld ergibt sich ein Wert von rund 45%.

Das solare Temperatur-Signalfeld für das Jahr 1981 (höchstes Maximum der Solarkonstanten im Zeitraum 1881-2003), normiert zum Signal des Jahres 1883 – dem Jahr des niedrigsten Maximums im gleichen Zeitraum – zeigt Abb. 37. Mit Ausnahme zweier Gebiete führt die Erweiterung des Analyse-Zeitraums trotz des potentiell niedrigen Bezugssignals zu keiner Vergrößerung der Signale (vgl. Abb. 21). Anders sehen die Ergebnisse für die anthropogenen Treibhausgase aus. Wie Abb. 38 illustriert, erhöhen sich für den Analysezeitraum 1881-2003 nahezu sämtliche Temperatur-Signale des Jahres 2003 (vgl. Abb. 23), was durch die potenziell niedrigeren Bezugssignale des Jahres 1881 erklärbar ist. Die Gebiete des kontinentalen Russlands erreichen dabei die höchsten Werte mit etwa 2 K.

Ein Vergleich der erklärten Varianzen (vgl. Abb. 39), wie sie sich durch Beschränkung der Regressoren auf jeweils eine Einflussklasse ergeben, unterstreicht die höhere Bedeutung der anthropogenen Treibhausgase: 30% EV gegenüber 22% EV durch den solaren Einfluss. Bei der räumlichen Verteilung der EV zeichnen sich keine klaren Unterschiede ab. Die höheren Werte sind jeweils eher in den niedrigen Breiten zu finden.

Abb. 40 stellt den Verlauf der EV bei 80-jährig zeitlich gleitender Betrachtung dar. Dabei zeigen die durch SOL erklärten Schwankungen eine stetige Abnahme, während GHG nach anfänglicher Bedeutungsabnahme ab Berücksichtigung des Zeitraumes ab 1980 wieder mehr und mehr Varianz erklären können. Die Erweiterung des betrachteten Gesamtzeitraums auf das Intervall ab 1881 belegt, dass der Anstieg der Temperaturen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sowohl durch den solaren als auch durch den anthropogenen Treibhausgas-Einfluss gut erklärbar ist. Das Ausbleiben des Trends im globalen Mittel zwischen etwa 1950 und 1980 kann durch die angebotenen Regressoren nicht erfasst werden. Man nimmt an, dass während dieser Zeit ein zunehmender Einfluss durch anthropogen verursachtes troposphärisches Sulfat (vgl. [3]) einen zu erwartenden globalen Temperaturanstieg unterdrückt hat. Physikalische Modelle können diesen Einfluss auf das globale Temperaturmittel gut simulieren (vgl. [6]), der Versuch der Berücksichtigung des troposphärischen Sulfats bei der Schrittweisen Regression führte jedoch zu unplausiblen Ergebnissen [19].

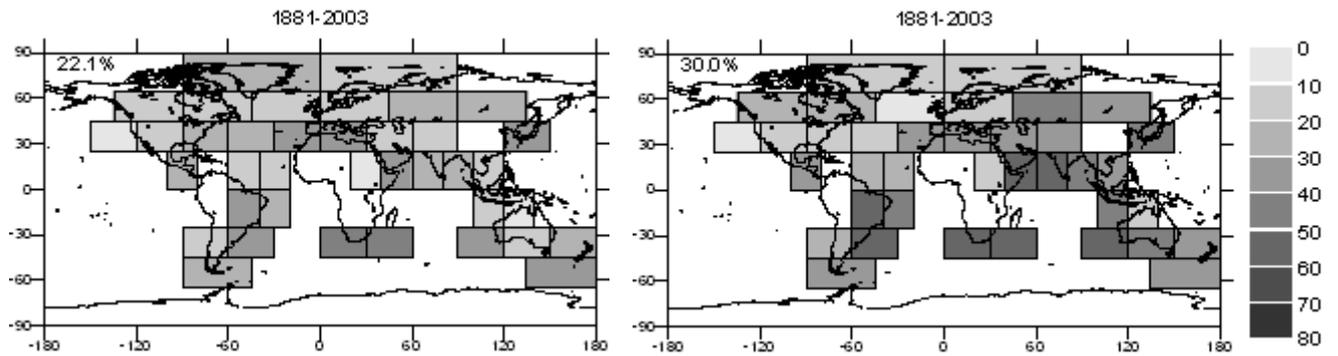


Abb. 39: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes der Temperatur-Jahresmittel (Zahlenwert jeweils links oben), sowie in den einzelnen Gebieten (Farbcode) bei **Beschränkung der Regressoren auf den SOL-Einfluss (links)**, bei **Beschränkung auf den GHG-Einfluss (rechts)** für den Analysezeitraum 1881-2003; alle Zahlenangaben in %.

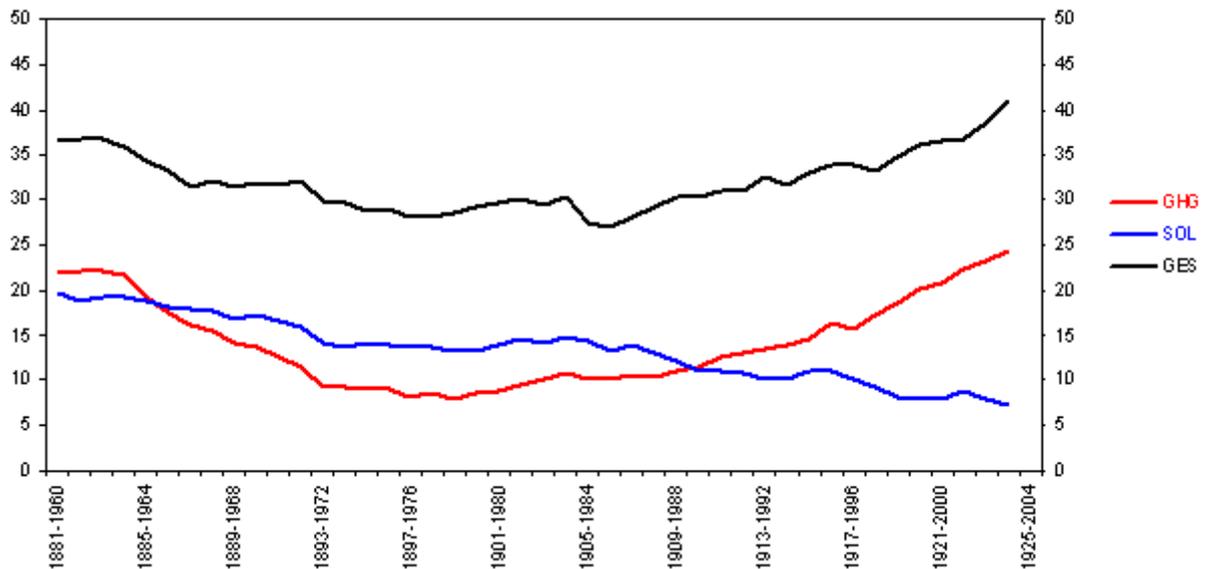


Abb. 40: Verlauf der durch den solaren Einfluss (SOL) und anthropogenen Treibhausgas-Einfluss (GHG) am Gesamtdatenfeld der Temperatur-Jahresmittel 1881-2003 erklärten Varianz für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

## 4.2 Einzelzeitreihen Deutschland

Zur Analyse mit der Schrittweisen Regression wurden Zeitreihen der bodennahen monatlichen Mitteltemperatur von insgesamt 10 deutschen Stationen ausgewählt. Bei einigen dieser Zeitreihen mussten einzelne Datenlücken über Regressionsbeziehungen zu benachbarten Stationen geschlossen werden. Aus den Monatsmitteln wurden Jahresmittelwerte sowie die saisonalen Mittel für Sommer und Winter berechnet. Mit einer Ausnahme sind sämtliche Stationsdaten ab spätestens 1891 verfügbar, weshalb bei den meisten Analysen der Zeitraum 1891-2003 zugrunde liegt. Tabelle 2 listet die einzelnen Stationen und die zugehörigen Analysezeiträume auf.

Tab. 2: Stationen der für die Analyse mit der schrittweisen Regression verwendeten Temperatur-Zeitserien und zugehöriger Analyse-Zeitraum.

Stationsname	Analysezeitraum
Bremen Flughafen	1891-2003
Dresden Stadt	1891-2003
Frankfurt/Main Stadt	1891-2003
Geisenheim	1891-2003
Hamburg Fuhlsbüttel	1891-2003
Hohenpeißenberg	1829-2003; 1891-2003
Jena Sternwarte	1891-2003
Potsdam	1891-2003
Schwerin	1891-2003
Zugspitze	1901-2003

### 4.2.1 Jahresmittel

Ähnlich wie bei den Berechnungen zu den globalen Gebietsmitteln – allerdings ohne den Zwischenschritt der EOF-Transformation – lassen sich auch für die im Folgenden untersuchten Einzelzeitreihen den bei der Schrittweisen Regression ausgewählten Regressoren bestimmte Temperatur-Signale zuordnen. Die nachfolgend präsentierten Diagramme zeigen jeweils links den zeitlichen Verlauf dieser Einzelsignale sowie rechts die durch den jeweiligen Einfluss erklärten Varianzen. Man erkennt für die Station Bremen (vgl. Abb. 41, oben) relativ hohe Temperatur-Signale durch die Nordatlantik-Oszillation (NAO), die unter Ausschluss aller anderen Einflüsse rund 19% der Varianz erklärt (siehe Balkendiagramm). Die

anthropogenen Treibhausgase (GHG) können etwa 5% EV beitragen. Im multiplen Modell wurde zusätzlich zu den beiden genannten Einflüssen auch ENSO ausgewählt, auch wenn dieser Einfluss einzeln betrachtet keine Varianz erklären kann. Insgesamt können durch die drei Regressoren 28% der Varianz erfasst werden. Im Liniendiagramm sind bestimmte Niveaus der Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich ein Signal vom unbestimmten Rauschen (Residuum) abhebt, eingetragen (gestrichelte Linien). Für die Station Hamburg (vgl. Abb. 41, Mitte) ergeben sich abweichende Ergebnisse beim GHG-Einfluss: Die durch die anthropogenen Treibhausgase erklärte Varianz erreicht 11% und das zugehörige Signal ist deutlich größer. Allerdings ist dieses Signal aufgrund des negativ korrelierten solaren Einflusses etwas überschätzt. Den Ergebnissen der Hamburger Zeitreihe sehr ähnlich sehen die Werte der Station Schwerin (vgl. Abb. 41, unten). Auch wenn im multiplen Modell statt des solaren Einflusses der Vulkanismus ausgewählt wird, deuten die erklärten Varianzen gute Übereinstimmungen der beiden Zeitreihen an. Neben dem dominanten NAO-Signal findet sich ein immer stärker werdendes Treibhausgas-Signal, das im Jahre 2003 bereits mehr als 1K beträgt.

Abb. 42 zeigt die Analyse-Ergebnisse der Jahresmittel 1891-2003 für die Stationen Potsdam (oben), Dresden (Mitte) und Jena (unten). Alle drei Stationen weisen ähnlich hohe NAO-Signale auf, die in Verbindung mit hohen erklärten Varianzen stehen. Im Falle der anthropogenen Treibhausgase deuten sich jedoch große Unterschiede an: So zeigt die Station Jena ungewöhnlich hohe Signalwerte und EV durch GHG, die auf einen überlagernden Temperatur-Trend durch einen zeitlich zunehmenden Stadteffekt hindeuten. Der solare Einfluss kann unter Ausschluss der anderen Einflüsse an den drei Stationen Varianz erklären, wird jedoch im multiplen Modell nicht immer berücksichtigt. Wie schon bei den Interpretationen zu den Untersuchungen der Gebietsmittel erwähnt, ist dies auf die in beiden Einfluss-Zeitreihen vorhandene positive Trendkomponente zurückzuführen, welche die Einflüsse innerhalb der Schrittweisen Regression in Konkurrenz zueinander treten lässt.

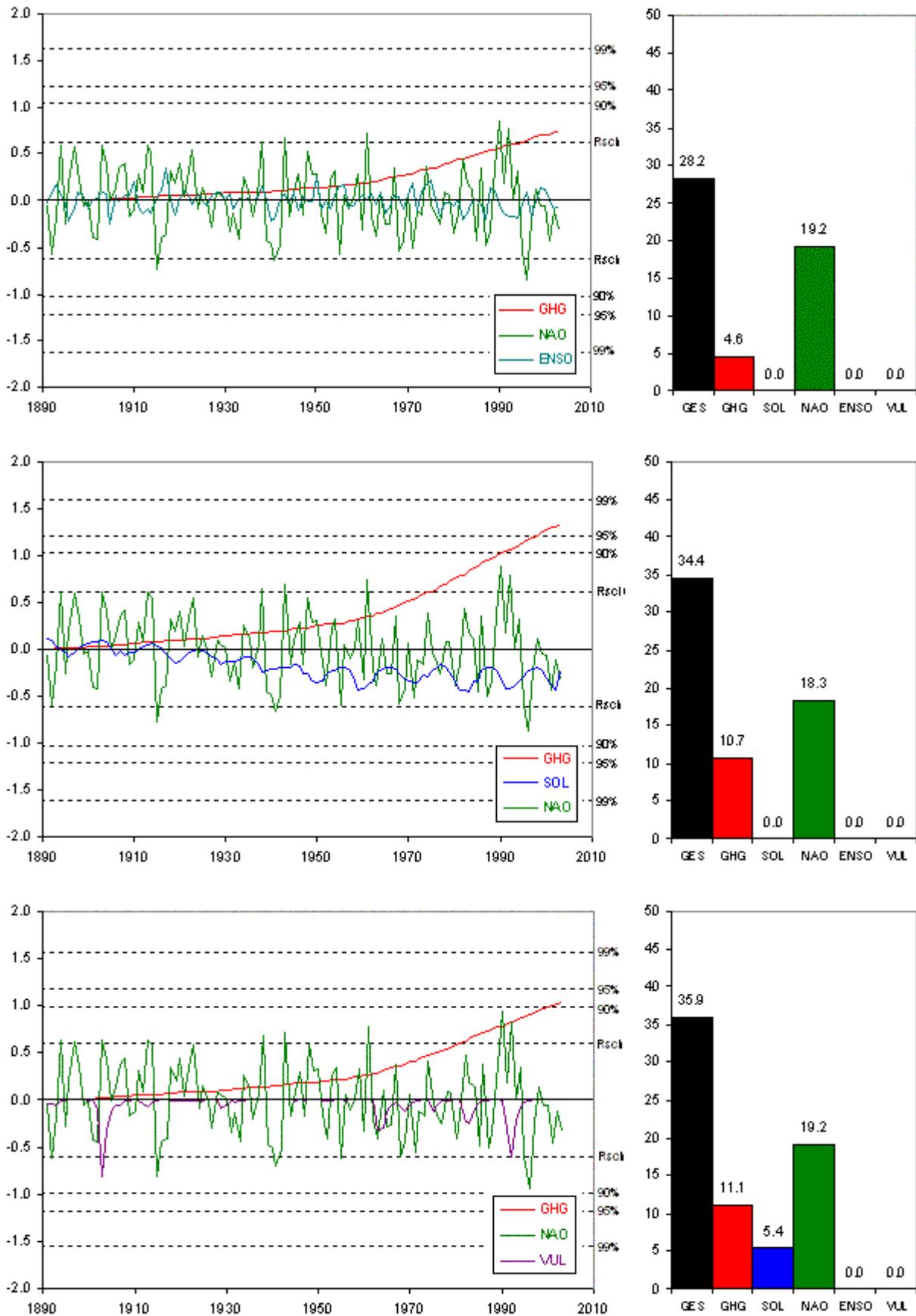


Abb. 41: Signalverlauf in K der Temperatur Jahresmittel 1891-2003 für die Stationen Bremen (oben), Hamburg (Mitte) und Schwerin (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

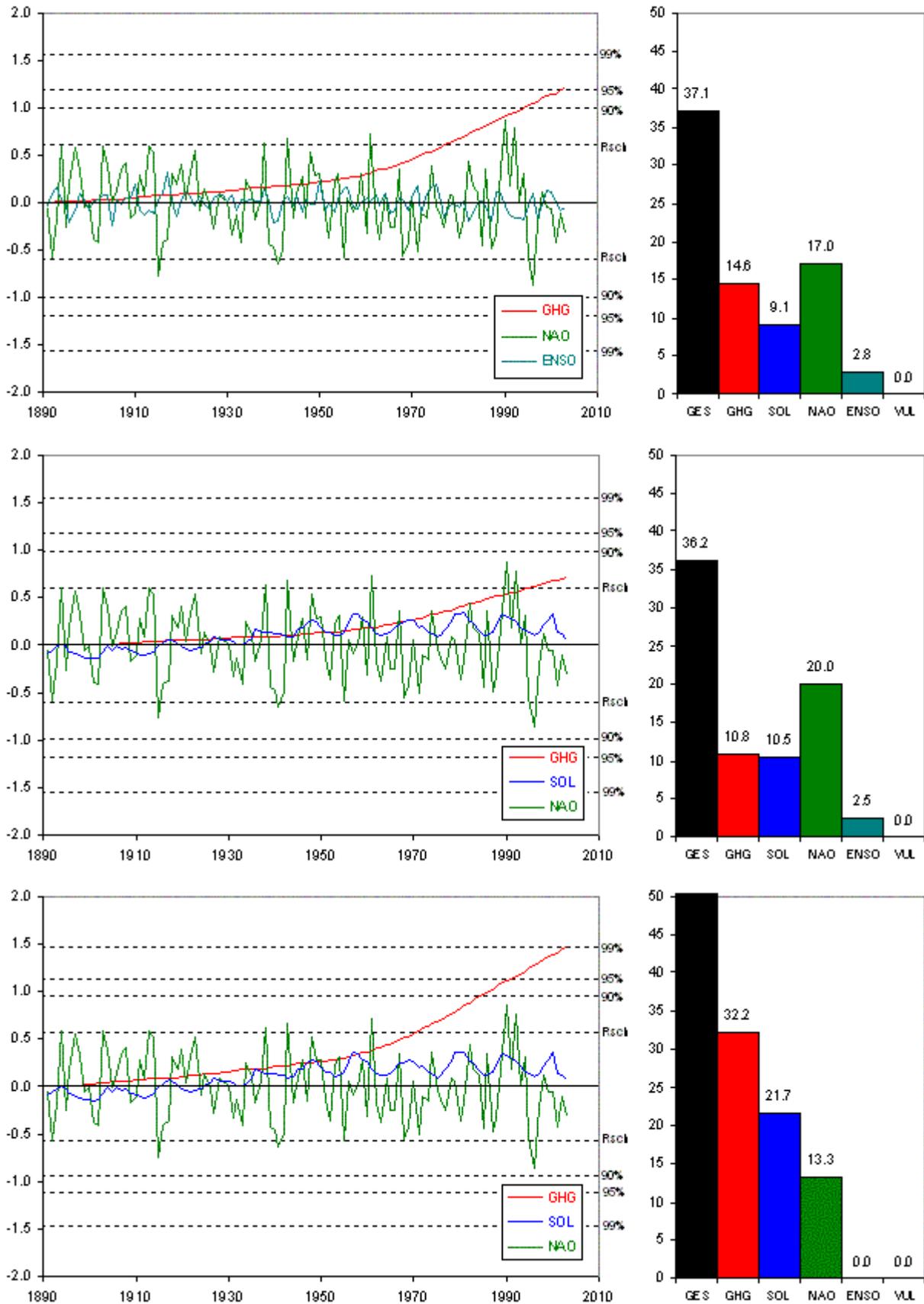


Abb. 42: Signalverlauf in K der Temperatur-Jahresmittel 1891-2003 für die Stationen Potsdam (oben), Dresden (Mitte) und Jena (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

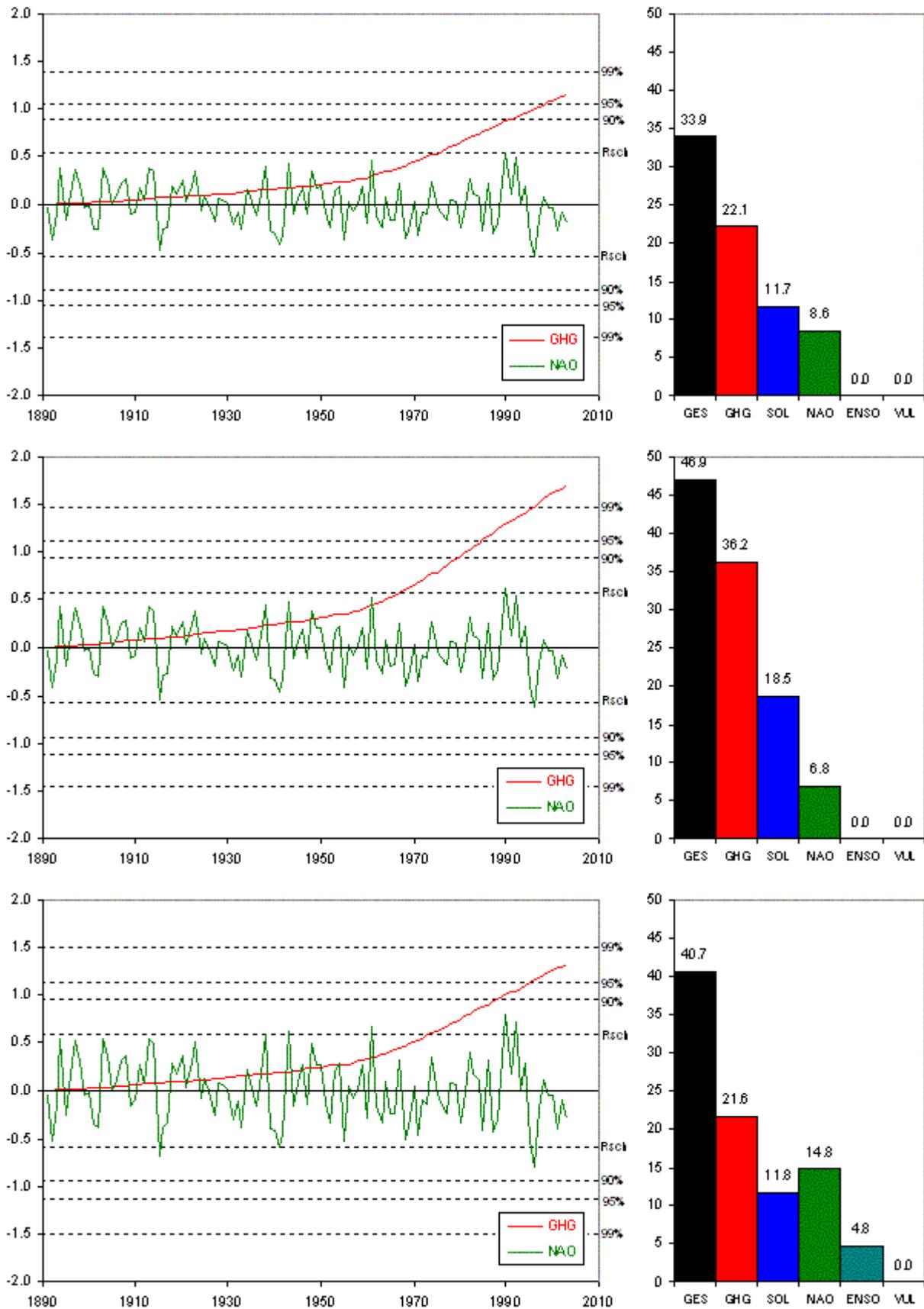


Abb. 43: Signalverlauf in K der Temperatur-Jahresmittel 1891-2003 für die Stationen Geisenheim (oben), Frankfurt/Main (Mitte) und Hohenpeißenberg (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

Abb. 43 illustriert die entsprechenden Ergebnisse für die westlich gelegenen Stationen Geisenheim (oben) und Frankfurt/Main (Mitte) sowie die südlich gelegene Bergstation Hohenpeißenberg (unten). Die durch die anthropogenen Treibhausgase erklärten Varianzen liegen hier deutlich höher, die dem NAO-Einfluss zugeordneten Varianzen deutlich niedriger, als an den nördlichen und östlichen Stationen. Für die Zeitreihe Frankfurt/Main Stadt deuten sich, wie schon bei der Station Jena beobachtet, Inhomogenitäten durch einen überlagernden Stadtklimaeffekt an. Anders sind die großen Differenzen im Temperatur-Trend zum nahe gelegenen Geisenheim nicht zu erklären. Mit  $+1,2$  K (Geisenheim) und  $+1,3$  K (Hohenpeißenberg) überschreitet das GHG-Signal im Jahre 2003 deutlich die Signifikanz-Schwelle von 95%.

Ergänzend zu den Analysen für den Zeitraum 1891-2003 sind weitere Berechnungen für die Jahresmittel 1901-2003 an der Station Zugspitze (Abb. 44) sowie 1829-2003 (Abb. 45) an der Station Hohenpeißenberg durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Zugspitze-Zeitreihe unterscheiden sich beim Treibhausgas-Einfluss von den Werten des nahe gelegenen Hohenpeißenbergs: Sowohl Signal-Werte als auch erklärte Varianz liegen hier niedriger. Dies kann nur zu einem kleinen Teil am verkürzten Analyse-Intervall und dem jüngeren Bezugsjahr 1901 liegen. Denkbar wäre, dass sich hier die hohe Lage der Station auf knapp 3000 m auswirkt.

In einem zweiten Schritt wurden die Analysen der Jahresmittel zeitlich gleitend für jeweils 80-jährige Zeitfenster durchgeführt, wobei an dieser Stelle nur die Ergebnisse für vier der zehn Stationen präsentiert werden sollen. Die Abb. 46-49 zeigen, wie sich mit Verschiebung des Analyse-Zeitraums die durch die einzelnen Einflüsse erklärten Varianzen an den Stationen Hamburg, Potsdam, Geisenheim und Hohenpeißenberg verändern. Im Vergleich zum 113-jährigen Zeitfenster zeigen sich für die kürzeren Zeiträume höhere EV bei den Einflüssen NAO und ENSO und niedrigere EV bei den Faktoren GHG und SOL. Offenbar spielt dabei die Zeitstruktur der Einflussgröße eine wichtige Rolle: Die mit hoher Frequenz variierenden Faktoren NAO und ENSO lassen sich bei kürzeren Zeitintervallen besser an die Zielgröße anpassen, als die über langfristige Trends Einfluss nehmenden Faktoren GHG und SOL. Im zeitlichen Verlauf lässt sich ein starker NAO-Einfluss konstatieren, der bei allen vier betrachteten Zeitreihen etwas an Bedeutung gewinnt, was offenbar auch auf

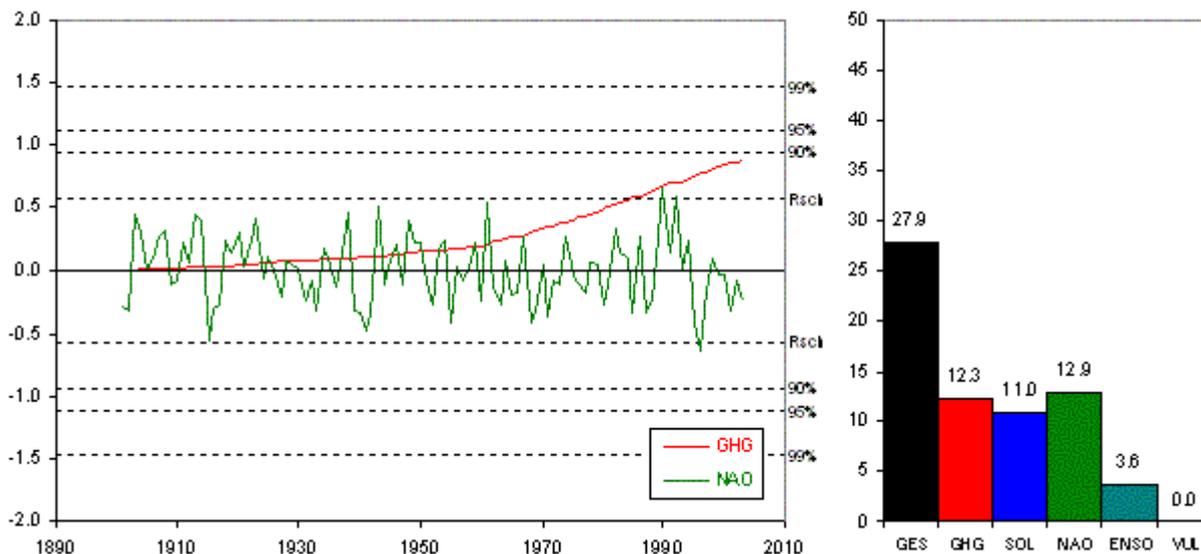


Abb. 44: Signalverlauf in K der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 für die Station Zugspitze und zugehörige erklärte Varianzen in % (rechts).

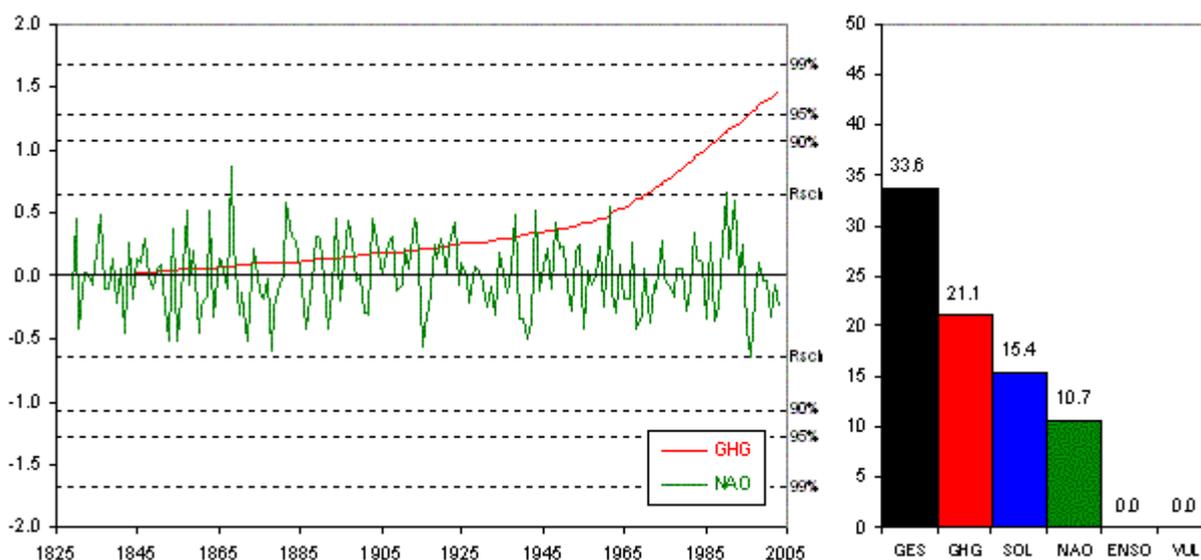


Abb. 45: Signalverlauf in K der Temperatur-Jahresmittel 1829-2003 für die Station Hohenpeißenberg und zugehörige erklärte Varianzen in % (rechts).

eine leichte Intensivierung der NAO in den jüngeren Intervallen zurückzuführen ist. Die anthropogenen Treibhausgase können zunächst kaum Varianz erklären, gewinnen aber mit Berücksichtigung der jüngsten Temperaturentwicklung deutlich an Gewicht, wobei der Westen und Süden Deutschlands (vertreten durch Geisenheim und Hohenpeißenberg) die höheren Werte erreicht. Auch der solare Einfluss bleibt meist schwach, kann aber – mit Ausnahme der Station Hamburg – in den jüngeren Zeitfenstern etwas an Gewicht zulegen. Bei Erweiterung des Analyse-Zeitraums für

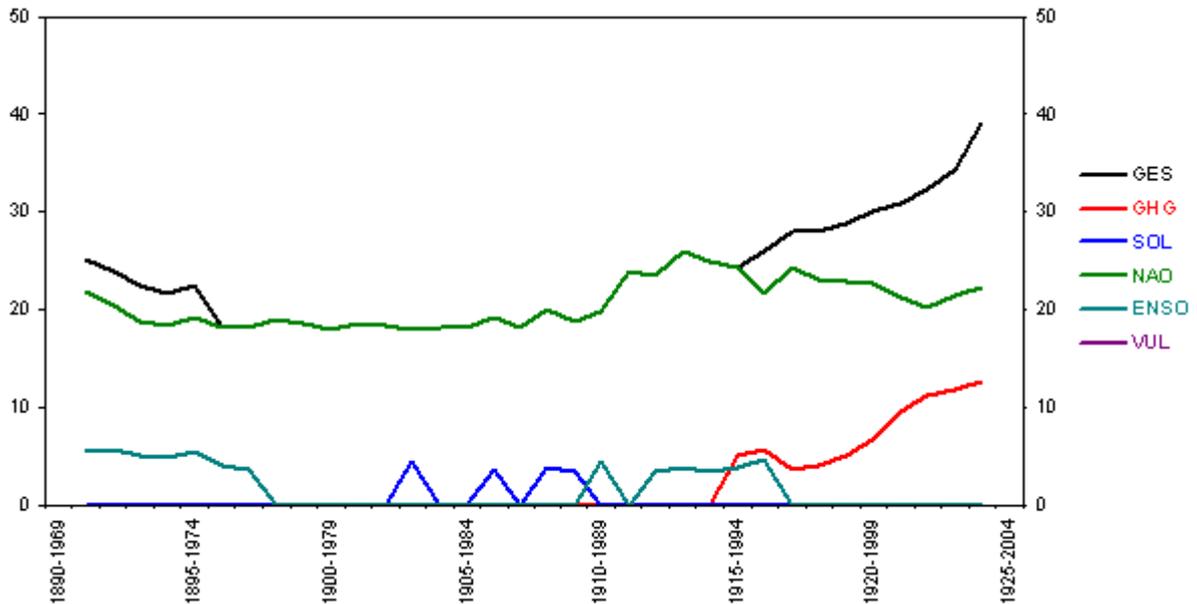


Abb. 46: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Jahresmittel Hamburg 1891-2003 erklärten Varianzen in % für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

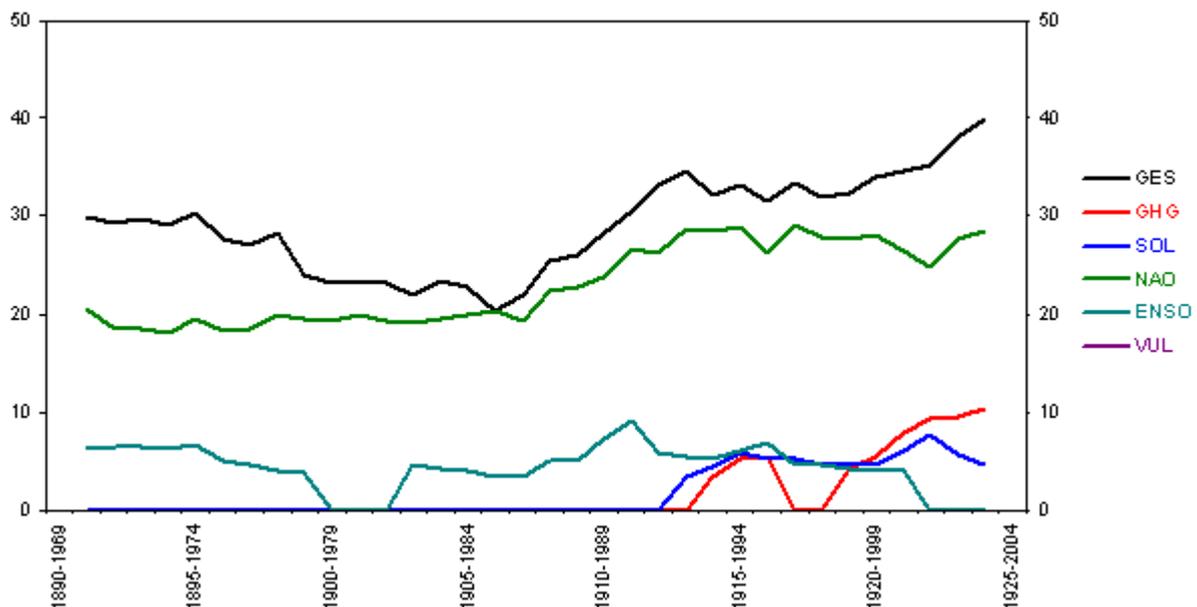


Abb. 47: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Jahresmittel Potsdam 1891-2003 erklärten Varianzen in % für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

die Station Hohenpeißenberg (vgl. Abb. 50) verdeutlicht sich die Konkurrenzsituation der beiden Einflüsse GHG und SOL: Der Temperaturanstieg in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wird von beiden Regressoren gut erklärt. Die anschließende Abkehr vom positiven Temperaturtrend, die in den deutschen Zeitreihen zwischen etwa 1950 und 1990 zu beobachten ist, führt zu einer Abnahme des Gewichtes

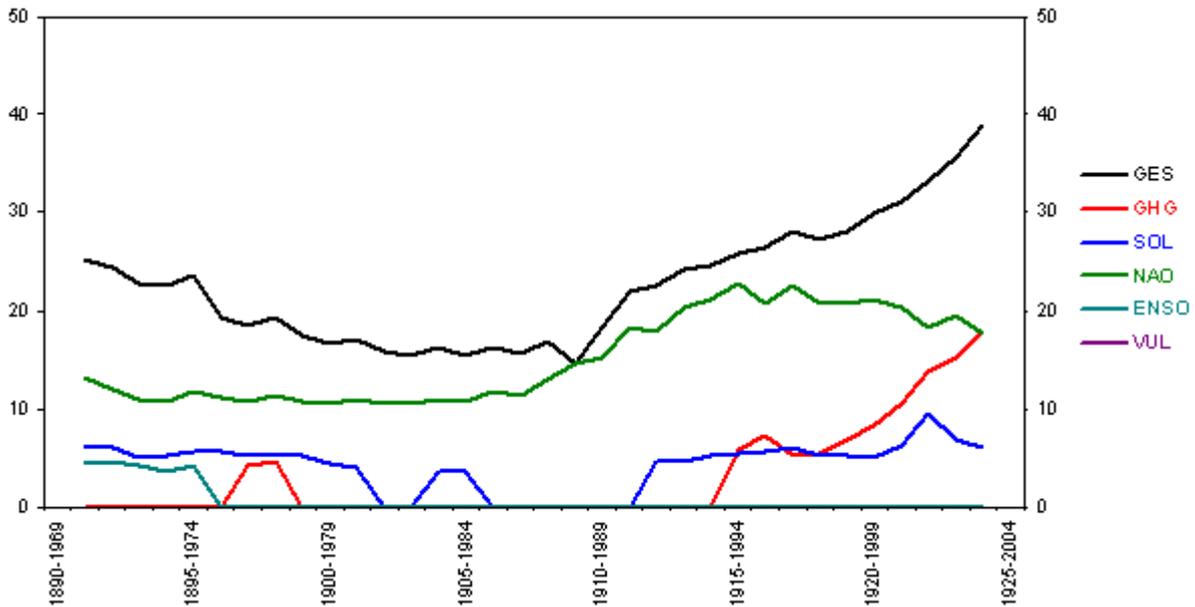


Abb. 48: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Jahresmittel Geisenheim 1891-2003 erklärten Varianzen in % für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

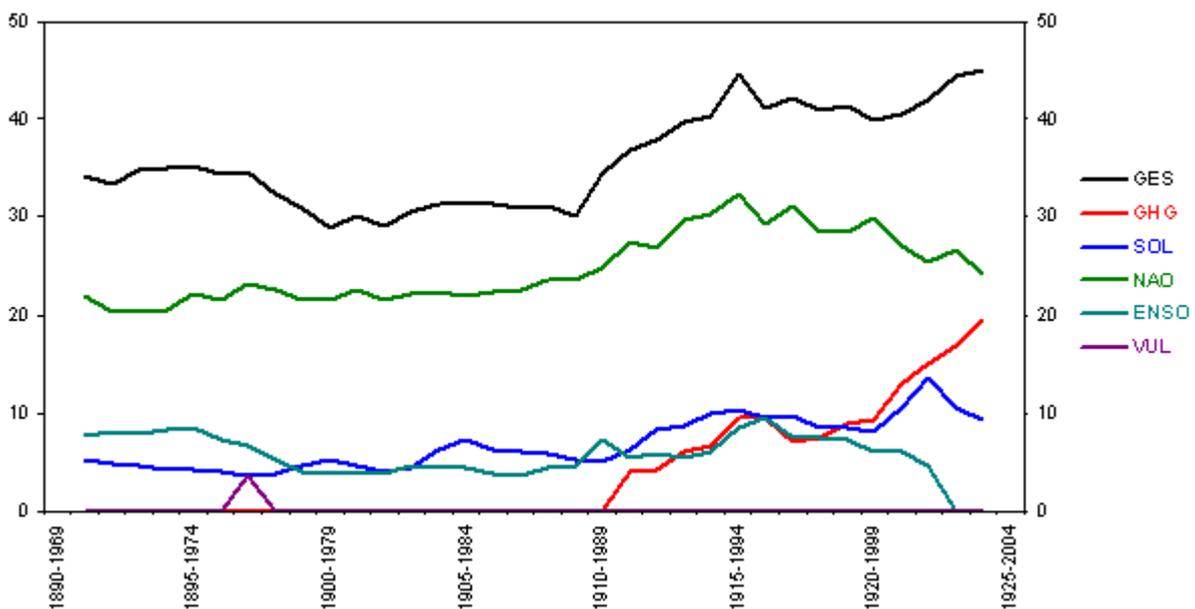


Abb. 49: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Jahresmittel Hohenpeißenberg 1891-2003 erklärten Varianzen in % für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

beider Einflüsse, ehe ab den Neunziger Jahren eine deutliche Zunahme besonders der anthropogenen Treibhausgase zu verzeichnen ist. Bei Betrachtung der durch die NAO erklärten Varianzen fällt auf, dass für die frühen Zeitfenster relativ niedrige Werte berechnet werden, obwohl die NAO innerhalb dieser Intervalle eine hohe

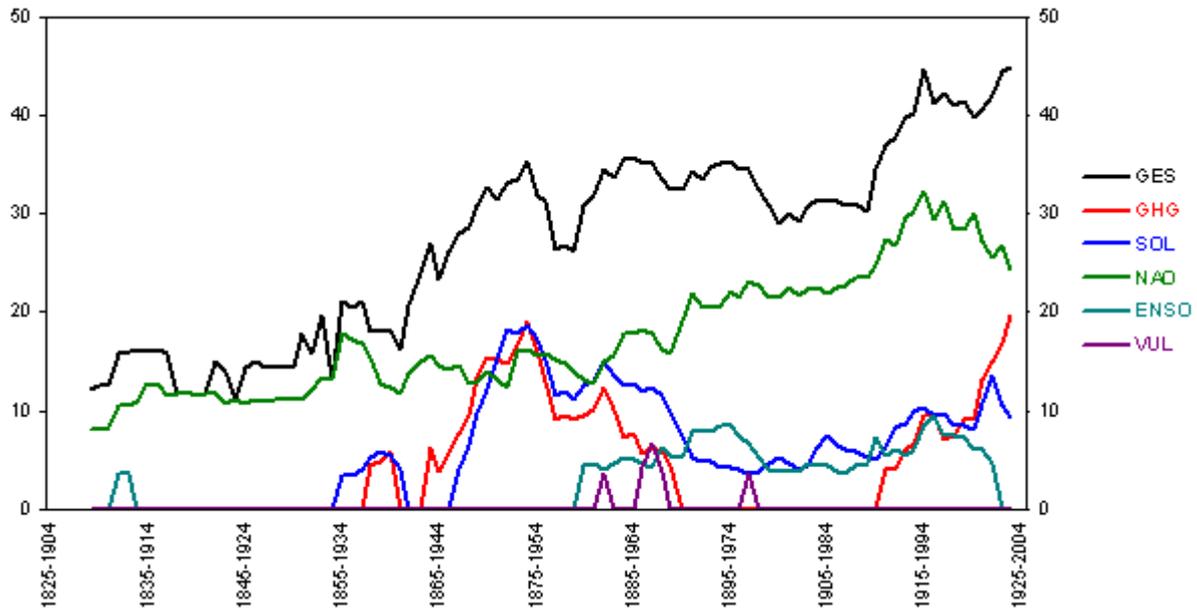


Abb. 50: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Jahresmittel Hohenpeißenberg 1829-2003 erklärten Varianzen in % für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

Varianz aufweist. Möglicherweise ist dies auch auf Ungenauigkeiten bei den frühen NAO-Daten zurückzuführen.

#### 4.2.2 Saisonale Mittel

In diesem Kapitel sollen die Analyse-Ergebnisse der Sommer- und Wintermittel der Temperatur an den zehn betrachteten Stationen präsentiert werden. Dazu wurde, wie in Kapitel 4.1.2 begründet, die Zeitreihe der NAO entsprechend jahreszeitlich angepasst, während bei den anderen Einflüssen die Zeitreihen der Jahresmittel Verwendung fanden.

Abb. 51 stellt die Signale und erklärten Varianzen für die Sommermittel 1891-2003 an den Stationen Hamburg und Schwerin dar. Die Analyse der Stationsdaten aus Bremen ergab keinerlei Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgröße. Auch für die Stationen Hamburg und Schwerin ist der gefundene Zusammenhang nur schwach: Der anthropogene Treibhausgas-Einfluss erklärt jeweils rund 5% der Gesamtvarianz, bei einem Signalwert von +0,75 (Hamburg) bzw. +0,78 K (Schwerin) im Jahre 2003. Damit liegen die GHG-Signalwerte im Sommer niedriger als im

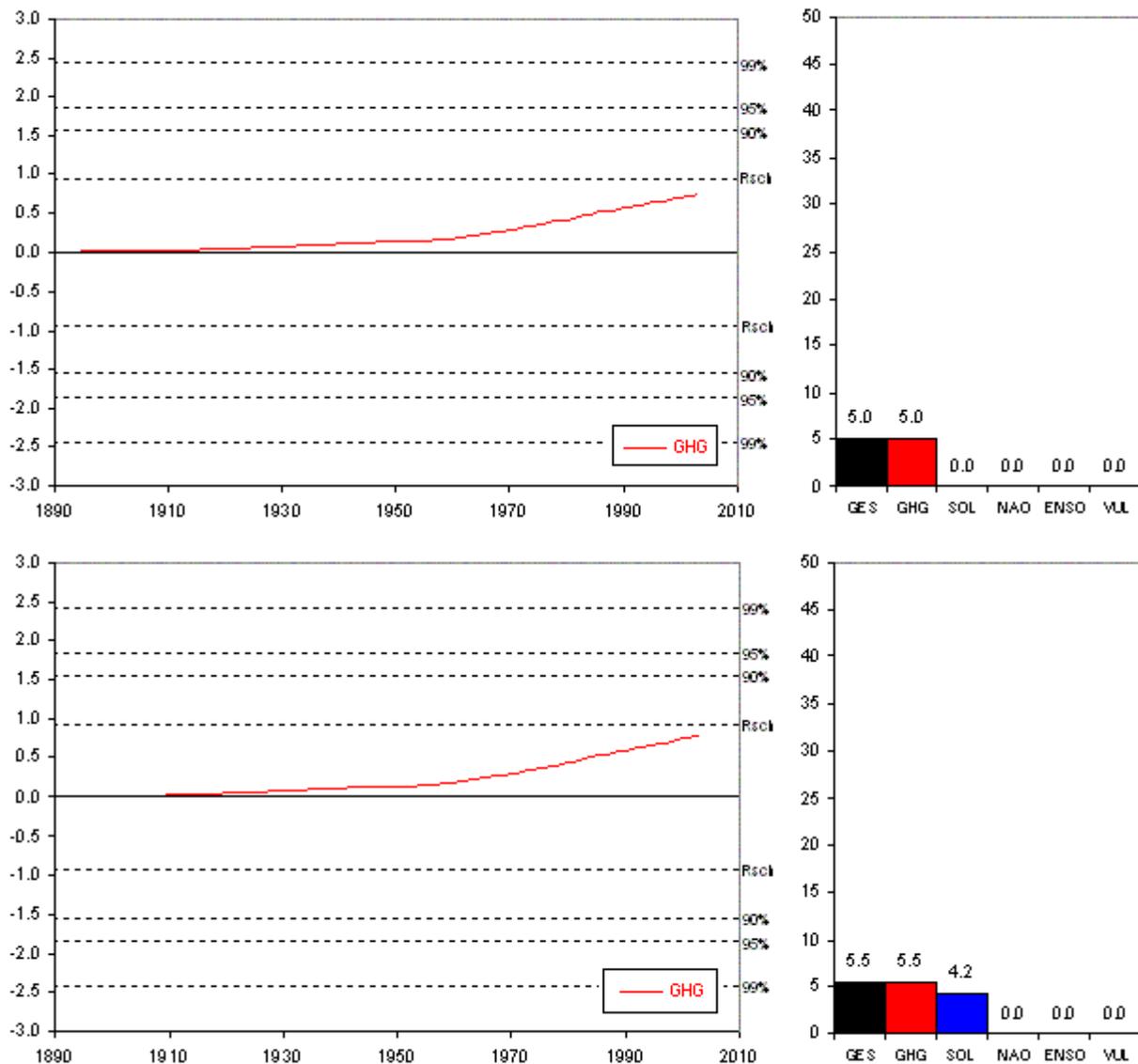


Abb. 51: Signalverlauf in K der Temperatur-Sommerrmittel 1891-2003 für die Stationen Hamburg (oben) und Schwerin (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

Jahresmittel. Auffällig ist die Tatsache, dass die NAO – die Analyseergebnisse der anderen Zeitreihen werden dies bestätigen – offenbar keinerlei Einfluss auf die Sommertemperaturen in Mitteleuropa nimmt.

Für die Stationen Potsdam, Dresden und Jena (vgl. Abb. 52) ergeben sich höhere erklärte Varianzen. Dabei können die solaren Strahlungsschwankungen sogar etwas mehr Varianz erklären, als die anthropogenen Treibhausgase. Das Gesamtsignal erreicht an der Station Potsdam ähnliche Werte, wie an den nördlichen Stationen, für Dresden liegt es mit rund +1 K etwas höher. Die Werte der Station Jena sind aufgrund des vermuteten Stadtklima-Einflusses – gleiches gilt später auch für

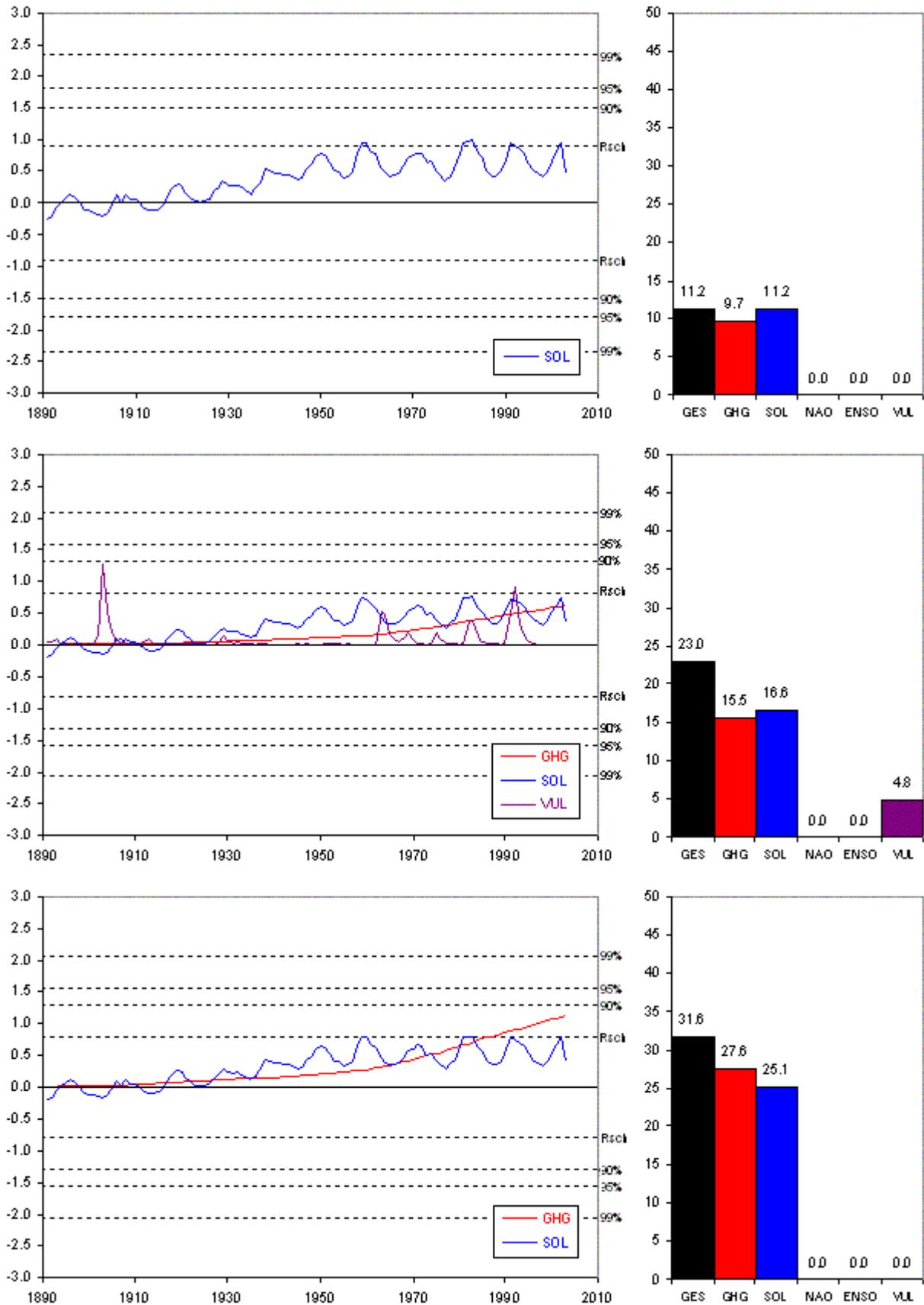


Abb. 52: Signalverlauf in K der Temperatur-Sommertmittel 1891-2003 für die Stationen Potsdam (oben), Dresden (Mitte) und Jena (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

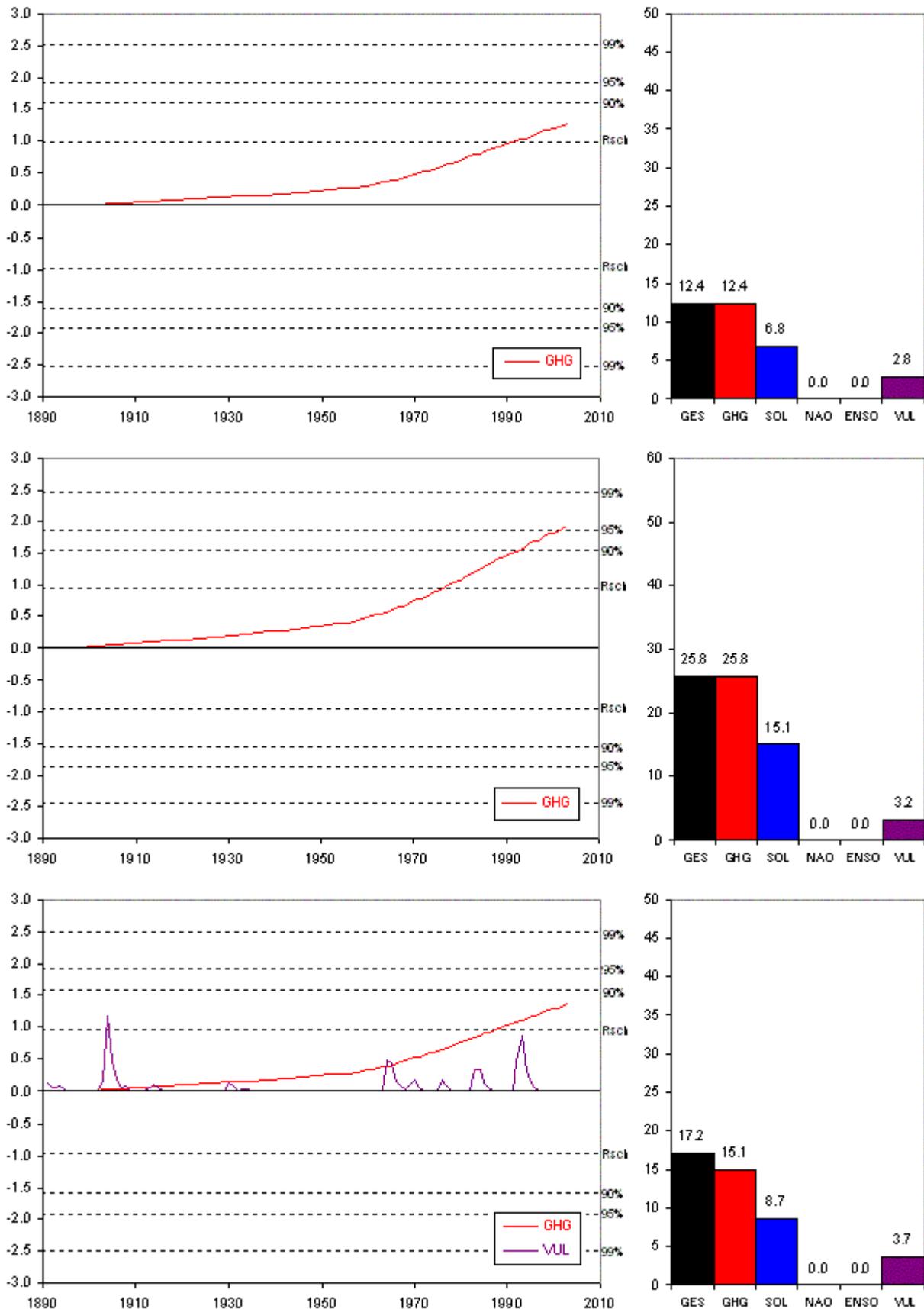


Abb. 53: Signalverlauf in K der Temperatur-Sommerrmittel 1891-2003 für die Stationen Geisenheim (oben), Frankfurt/Main (Mitte) und Hohenpeißenberg (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

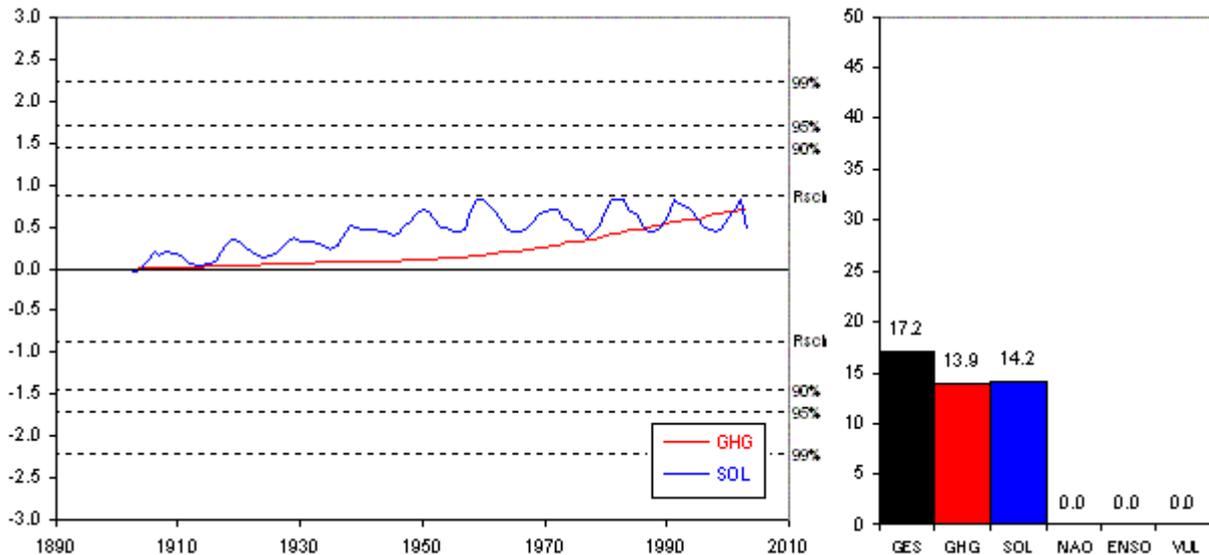


Abb. 54: Signalverlauf in K der Temperatur-Sommertmittel 1901-2003 für die Station Zugspitze und zugehörige erklärte Varianzen in % (rechts).

Frankfurt – weniger beachtenswert und werden im Folgenden nicht mehr kommentiert. Bei den westlichen und südlichen Stationen (vgl. Abb. 53) bestätigt sich das bisherige Bild: Ein zeitlicher Trend in den Sommertemperaturen wird vom GHG- oder vom solaren Einfluss gut beschrieben, alle weiteren Varianzanteile können jedoch kaum zugeordnet werden. Auffällig ist die Berücksichtigung des Vulkanismus als Regressor bei den Analysen der Zeitreihen Dresden und Hohenpeißenberg, da er mit negativem Koeffizienten, also positivem Temperatur-Signal in die Berechnungen eingeht. Im Jahre 2003 erreicht das GHG-Signal für Geisenheim +1,3 K, für den Hohenpeißenberg +1,4 K. Ähnlich wie beim Jahresmittel, sind also auch beim Sommermittel die höheren Temperatur-Trends im Süden und Westen Deutschlands zu finden. Die Zeitreihe der Zugspitze (vgl. Abb. 54) weist im Sommermittel ein im Vergleich zum Jahresmittel stärkeres Gesamtsignal auf.

Auch für die Untersuchungen der Sommermittel sollen im Folgenden die Ergebnisse der 80-jährig zeitlich gleitenden Berechnungen für vier der zehn Stationen präsentiert werden. Abb. 55 zeigt die errechneten erklärten Varianzen für die Station Hamburg. Die Verkürzung der Intervalle führt dazu, dass GHG und SOL kaum noch Varianz erklären, während dem Vulkanismus in den jüngeren Zeitfenstern überraschend viel Varianz zugeordnet wird. Auch bei den anderen Stationsdaten (Abb. 56 bis 59) bestätigt sich dieses starke Gewicht des Vulkanismus in den jüngeren Zeitintervallen. Die negative Einflussgröße ist dabei für alle Zeitintervalle (auch der Reihe

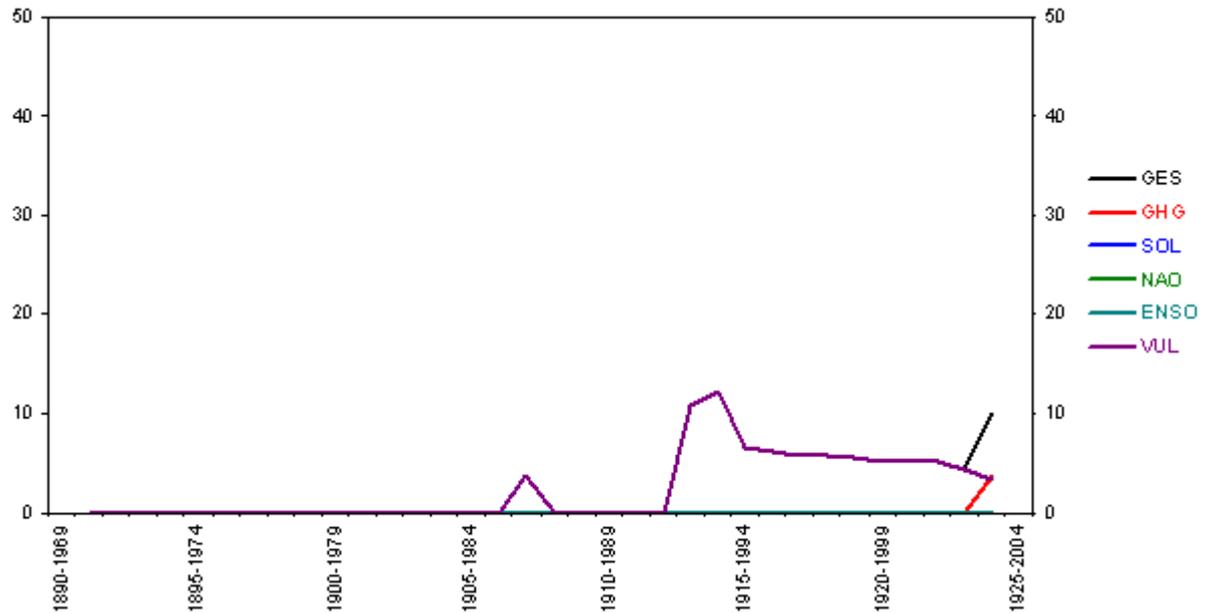


Abb. 55: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Sommertittel Hamburg 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

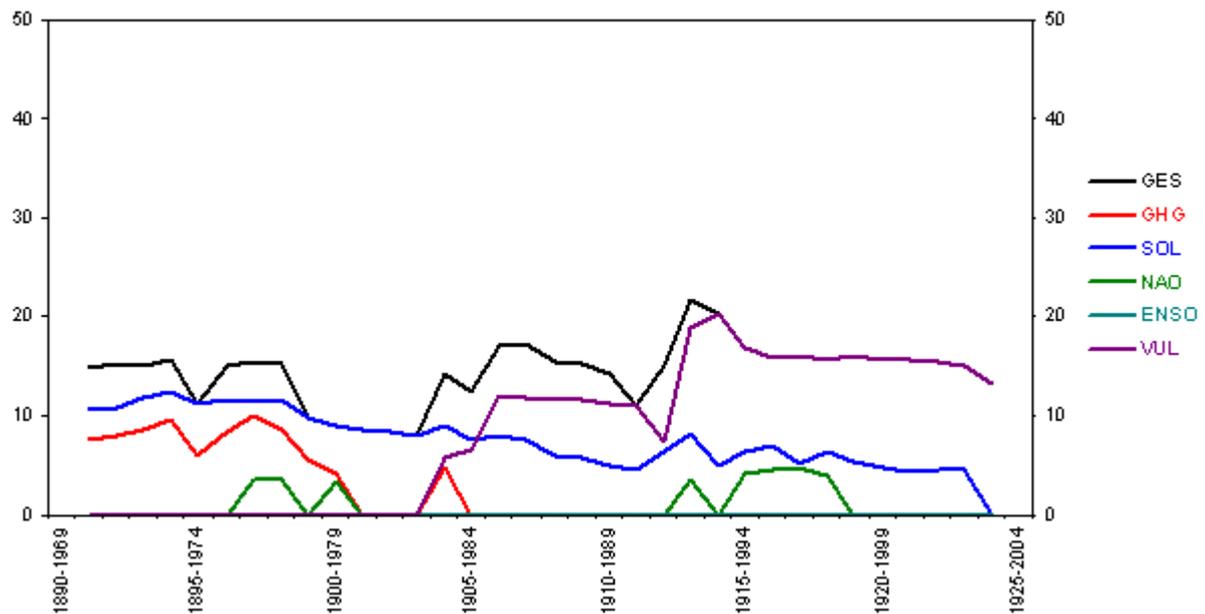


Abb. 56: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Sommertittel Potsdam 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

Hohenpeißenberg ab 1829) negativ zum Sommertittel korreliert, so dass offenbar klimawirksamen Vulkanausbrüchen eher warme Sommer in Mitteleuropa folgten, was im Widerspruch zu den Ergebnissen aus den Untersuchungen der globalen Gebietsmittel steht. Die erklärten Varianzen der anderen Einflüsse liegen an den Stationen Potsdam, Geisenheim und Hohenpeißenberg im Vergleich zur Station

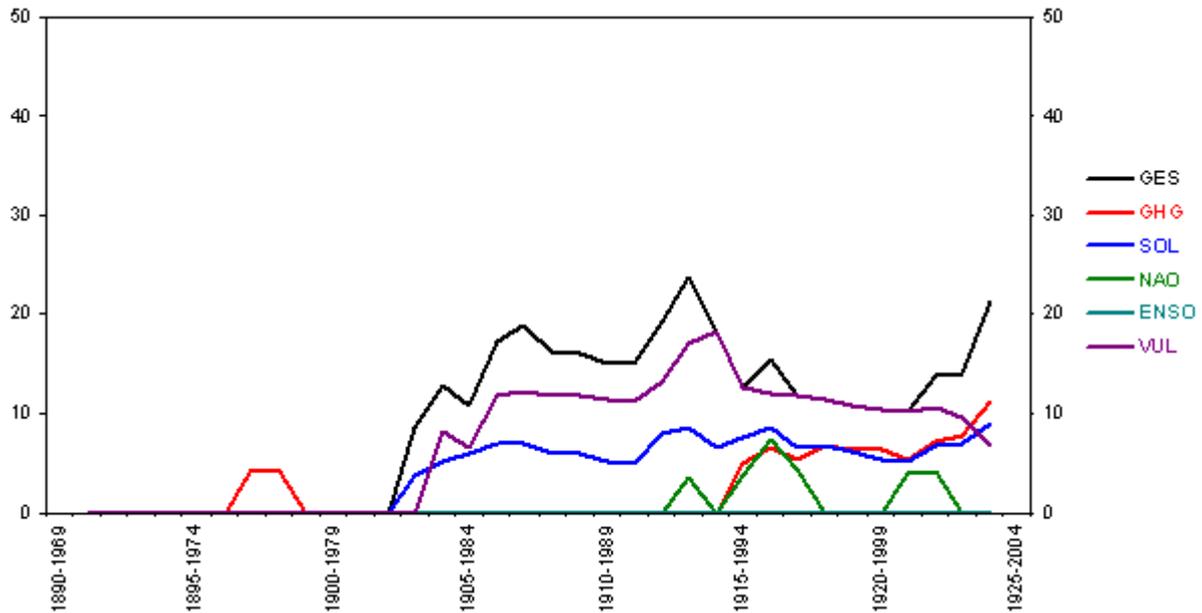


Abb. 57: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Sommertittel Geisenheim 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

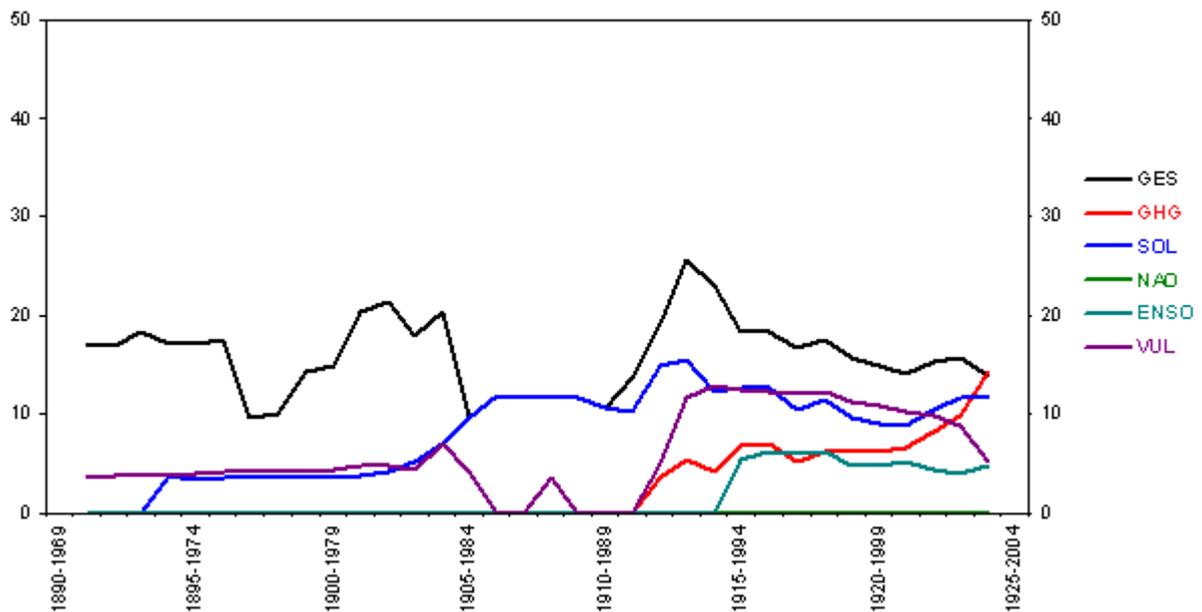


Abb. 58: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Sommertittel Hohenpeißenberg 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

Hamburg höher. Dabei zeigen sich allerdings keine einheitlichen zeitlichen Trends des solaren und anthropogenen Einflusses.

Abb. 60 stellt die Signale und erklärten Varianzen, die sich aus den Analysen der Wintermittel an den drei nördlichen Stationen Bremen, Hamburg und Schwerin

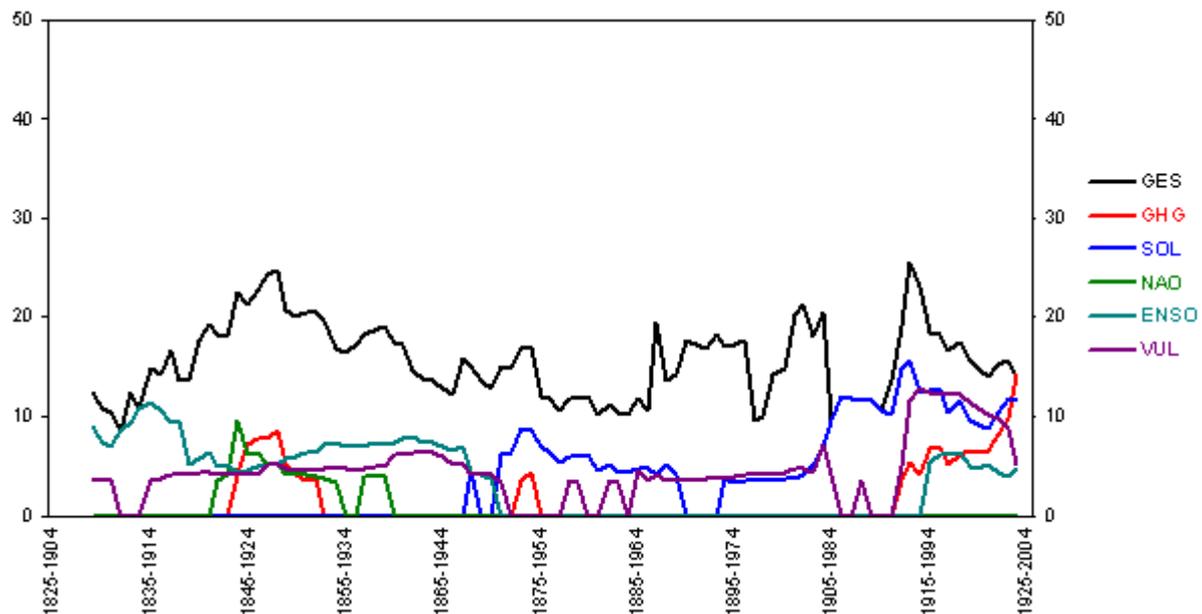


Abb. 59: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Sommertittel Hohenpeißenberg 1829-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

ergeben, dar. Im Vergleich zu den Sommermitteln weisen die Wintermittel eine deutlich höhere Gesamtvarianz auf. Trotz dieser hohen Varianz können an den drei Stationen rund 45% der Schwankungen allein durch die NAO erfasst werden. Neben der dominanten NAO werden noch GHG und ENSO im multiplen Modell berücksichtigt. Das GHG-Signal liegt höher als im Sommer und erreicht im Jahre 2003 Werte zwischen +1,2 K (Bremen) und +1,6 K (Hamburg). Ebenfalls hohe EV durch die NAO ergeben die Analysen der Wintermittel an den östlichen Stationen Potsdam, Dresden und Jena (vgl. Abb. 61). Das anthropogene Treibhausgas-Signal erreicht in Potsdam +1,5 K, während in Dresden offenbar kein so deutlicher Temperatur-Trend vorliegt und deshalb ein im Vergleich schwächeres solares Signal berechnet wurde. Auch an den westlichen Stationen Geisenheim und Frankfurt und der südlichen Station Hohenpeißenberg (vgl. Abb. 62) ist der NAO-Einfluss im Winter dominant, aber weniger stark als im Osten und Norden. Die Signalwerte der GHG erreichen hier bis zu +1,8 K (Hohenpeißenberg). Auch für die Wintermittel wurde ergänzend die Zeitreihe der Zugspitze für den Zeitraum 1901-2003 analysiert. Die Ergebnisse (vgl. Abb. 63) zeigen, dass die Wintertemperaturen auf den Bergen (abgeschwächt gilt dies auch für den Hohenpeißenberg) weniger stark von der NAO beeinflusst werden, denn meridionale Witterung im Winter infolge schwacher NAO kann für die Berge sowohl zu Warmluft-, als auch zu Kaltluftadvektion führen,

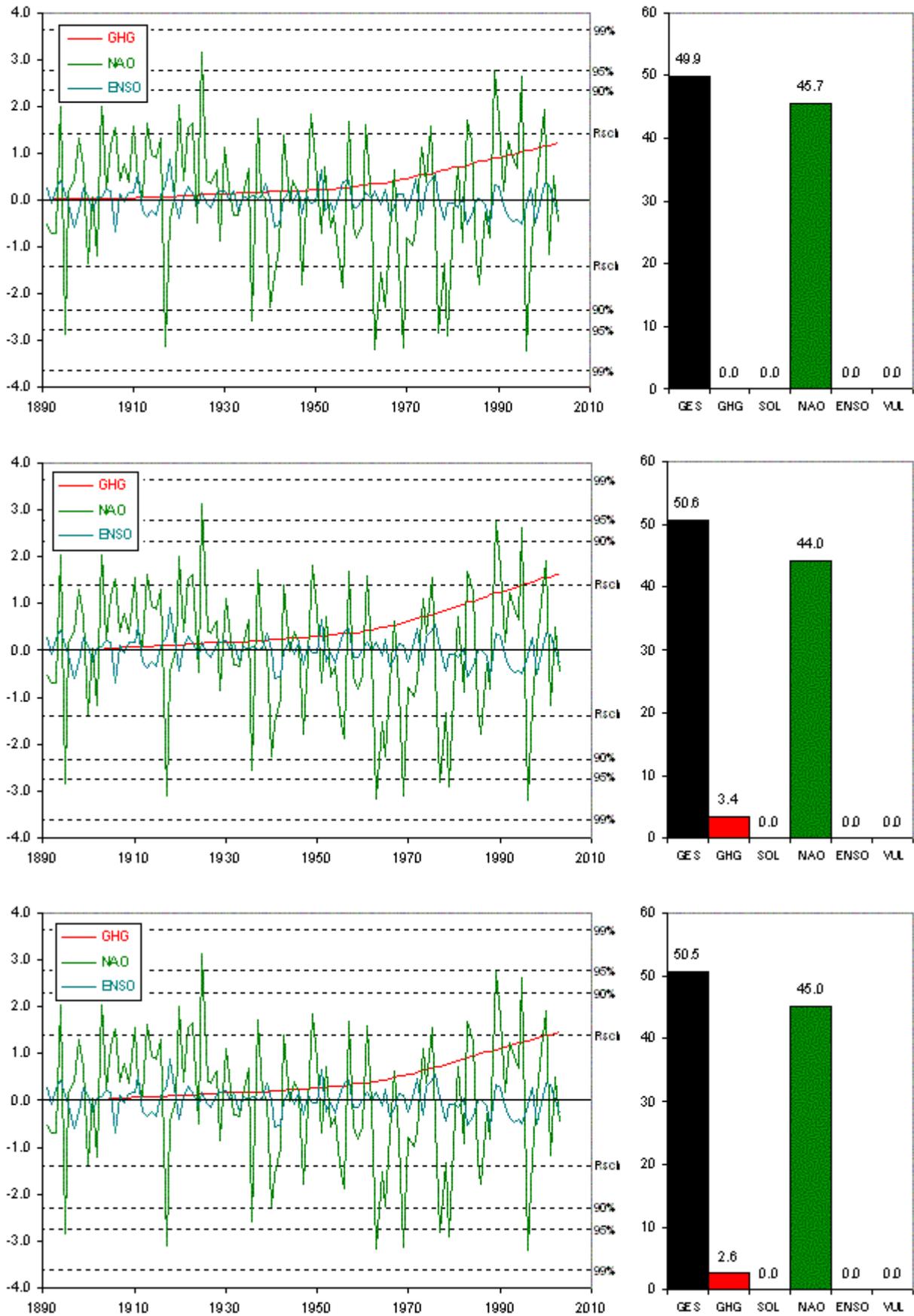


Abb. 60: Signalverlauf in K der Temperatur-Wintermittel 1891-2003 für die Stationen Bremen (oben), Hamburg (Mitte) und Schwerin (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

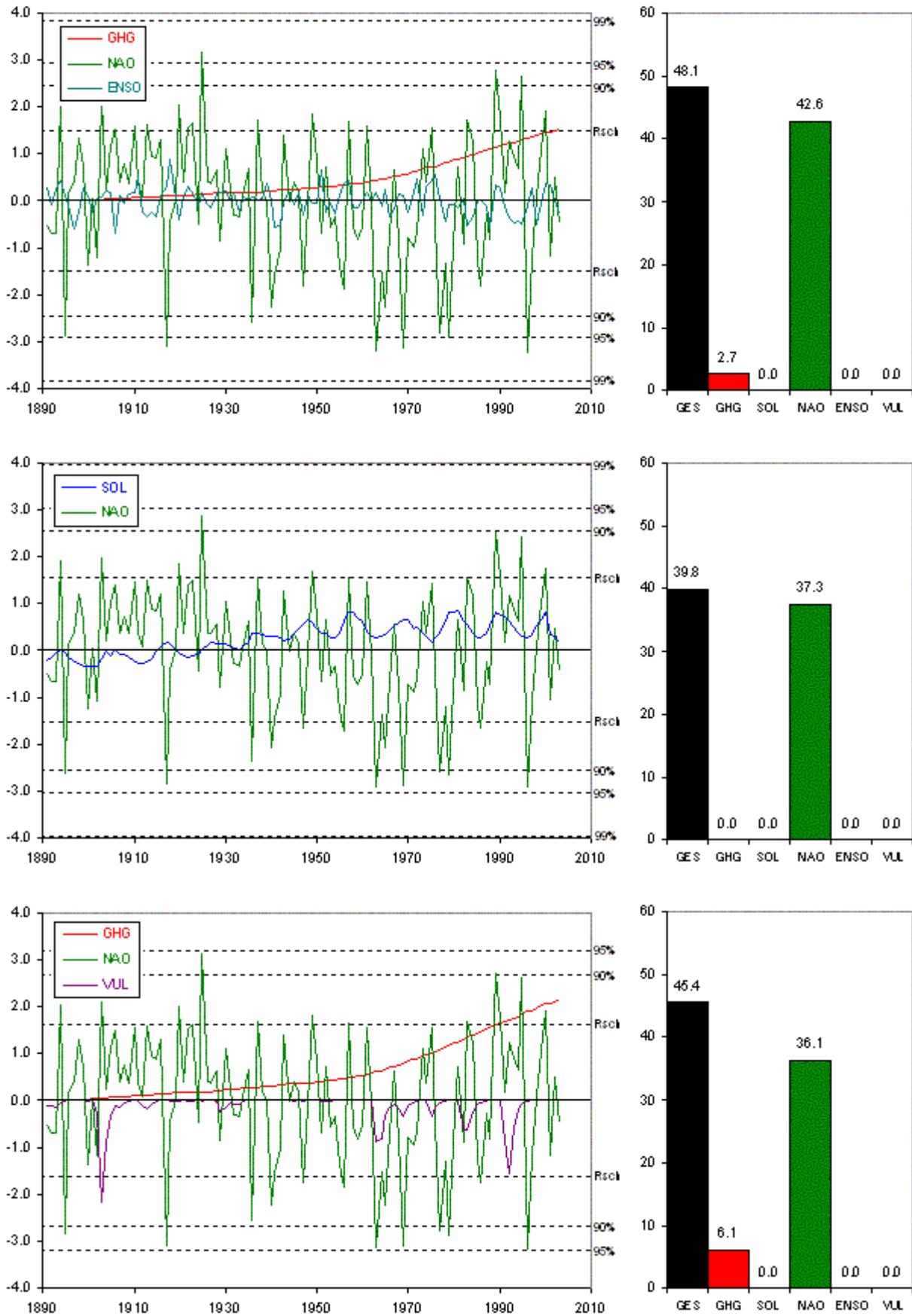


Abb. 61: Signalverlauf in K der Temperatur-Wintermittel 1891-2003 für die Stationen Potsdam (oben), Dresden (Mitte) und Jena (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

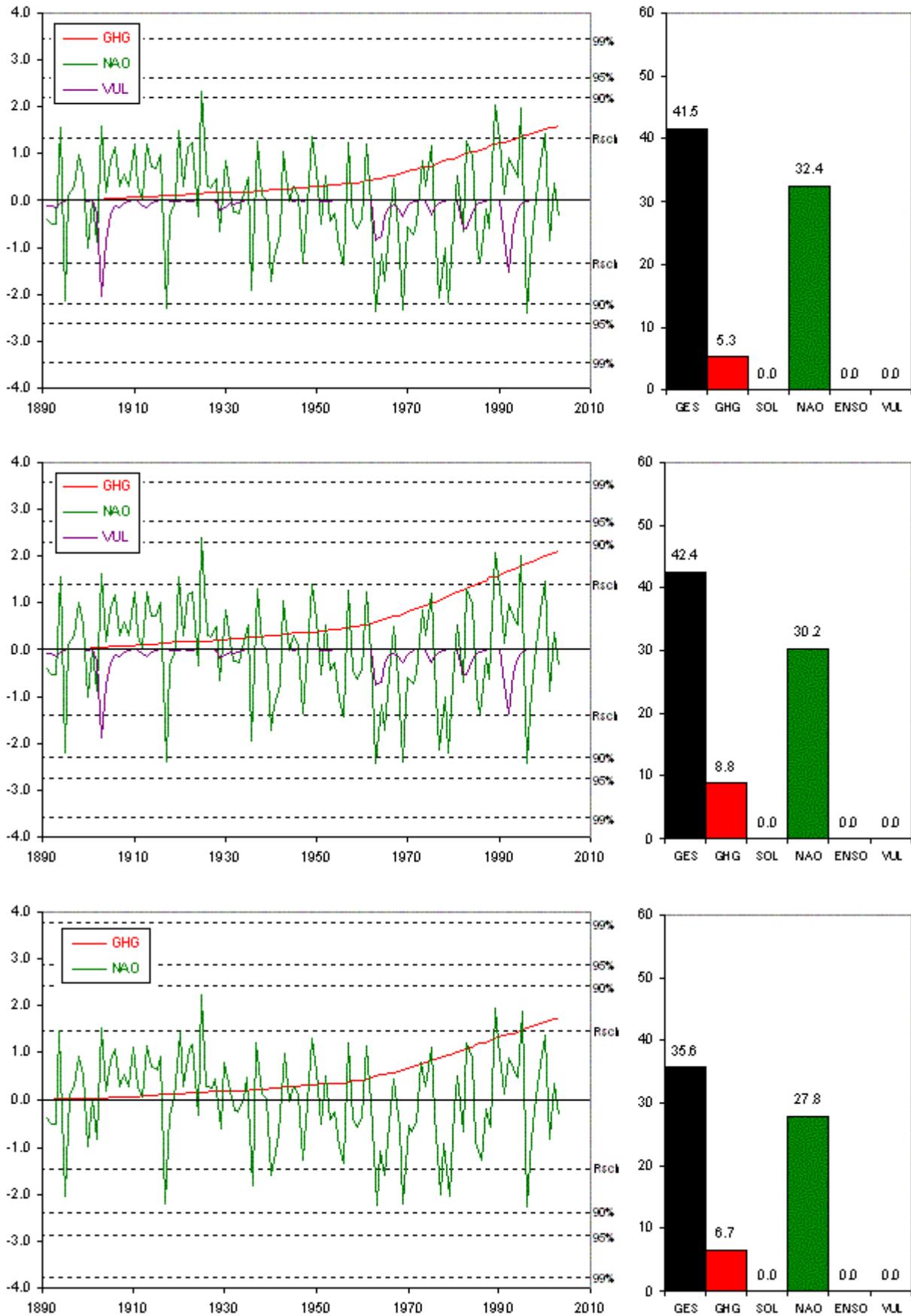


Abb. 62: Signalverlauf in K der Temperatur-Wintermittel 1891-2003 für die Stationen Geisenheim (oben), Frankfurt/Main (Mitte) und Hohenpeißenberg (unten) und zugehörige erklärte Varianzen in % (jeweils rechts).

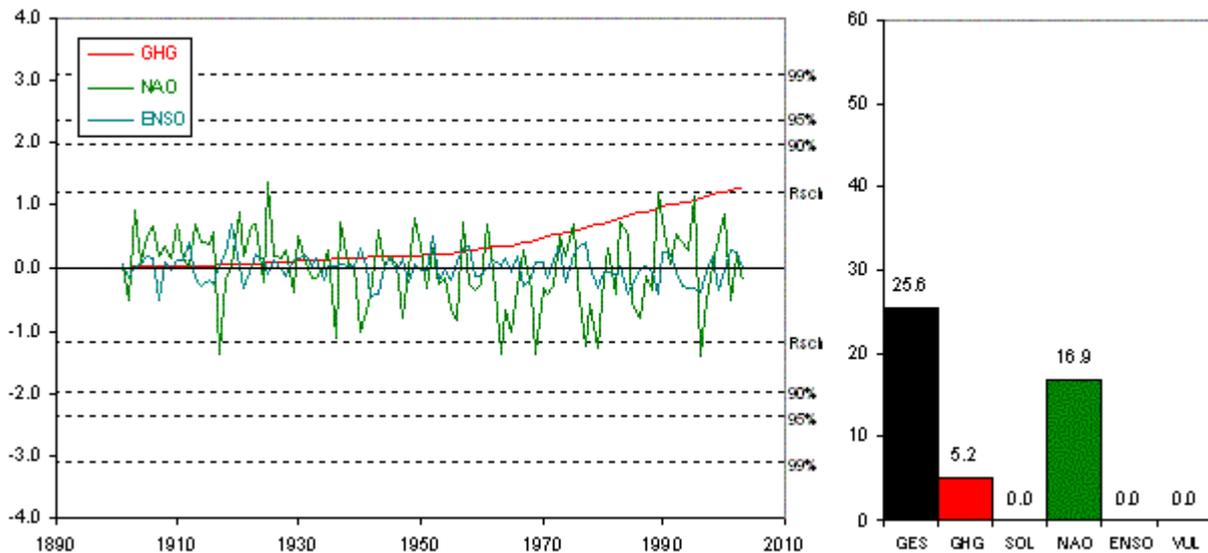


Abb. 63: Signalverlauf in K der Temperatur-Wintermittel 1901-2003 für die Station Zugspitze und zugehörige erklärte Varianzen in % (rechts).

während das Flachland auch bei Warmluftzufuhr in der Höhe meist in bodennaher Kaltluft verbleibt.

Die Abb. 64 bis 68 stellen die Ergebnisse der 80-jährig zeitlich gleitenden Analysen der Wintermittel dar. Es bietet sich ein insgesamt sehr einheitliches Bild mit konstant starkem NAO-Einfluss und den nur in bestimmten Zeitintervallen berücksichtigten anderen Einflüssen. So können die anthropogenen Treibhausgase trotz sehr hoher Gesamtvarianz in den jüngsten Zeitfenstern an allen Stationen Varianz erklären, was offenbar im Zusammenhang mit den positiven Trends in den Wintermitteln seit Ende der Achtziger Jahre steht. Auch dem Vulkanismus wird für bestimmte Abschnitte Varianz zugeordnet. Im Gegensatz zum Sommermittel ist die Korrelation für die Wintermittel jedoch gegenteilig, so dass also eher kühle Winter auf starke Vulkaneruptionen folgen. Beim Vergleich mit den Vulkanismus-Signalen, die sich aus den saisonalen Untersuchungen der Gebietsmittel für Europa ergeben, zeigen sich teilweise widersprüchliche Ergebnisse. Es ist also anzumerken, dass insbesondere bei den saisonalen Analysen der Einzelzeitreihen aufgrund der geringen zeitlichen und der fehlenden räumlichen Mittelung der Zielgröße gefundene Zusammenhänge zum Vulkanismus als unzuverlässig anzusehen sind.

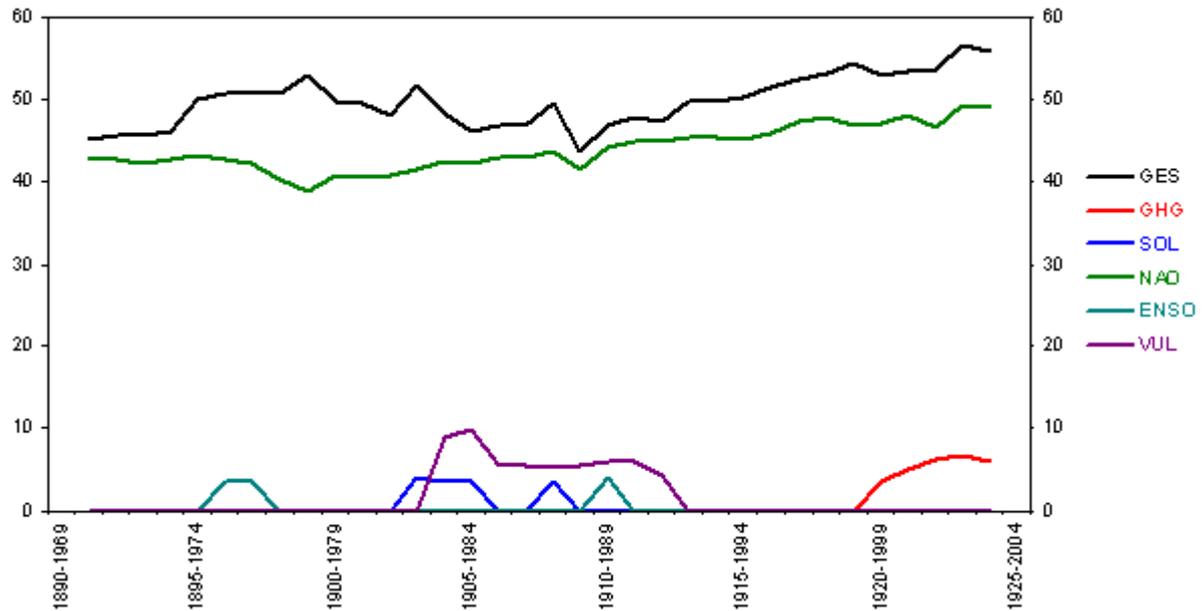


Abb. 64: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Wintermittel Hamburg 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

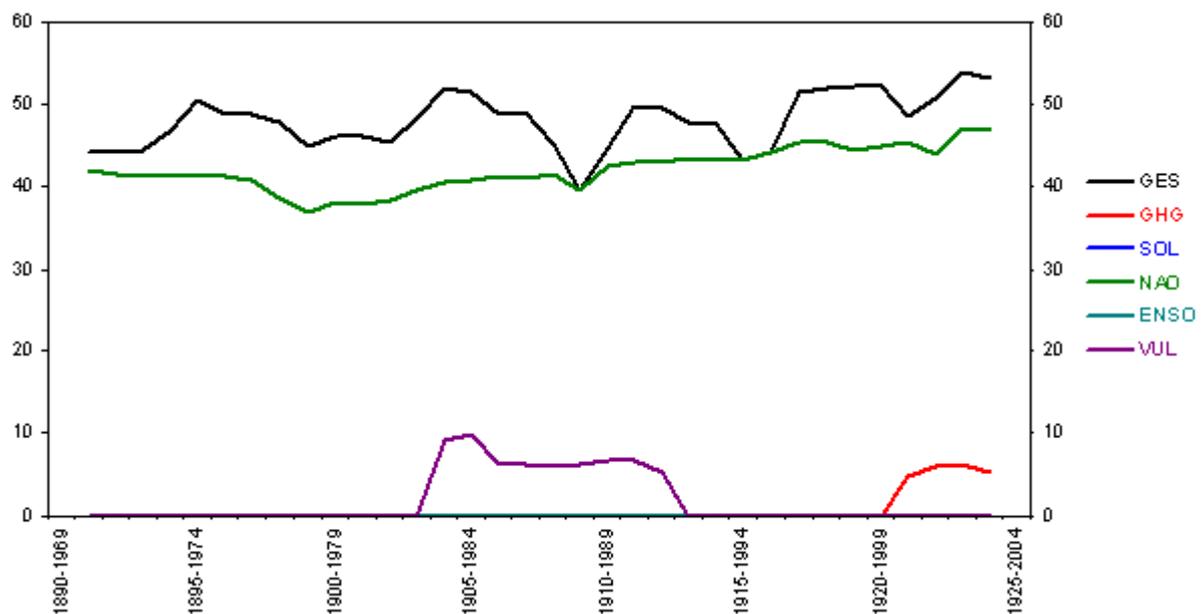


Abb. 65: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Wintermittel Potsdam 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

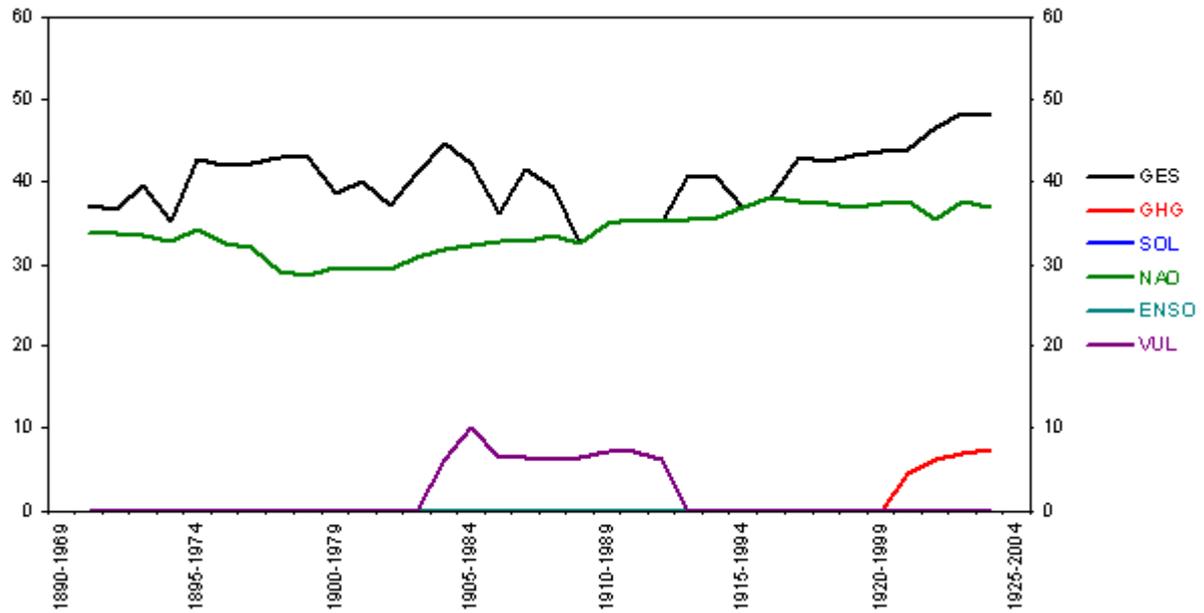


Abb. 66: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Wintermittel Geisenheim 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

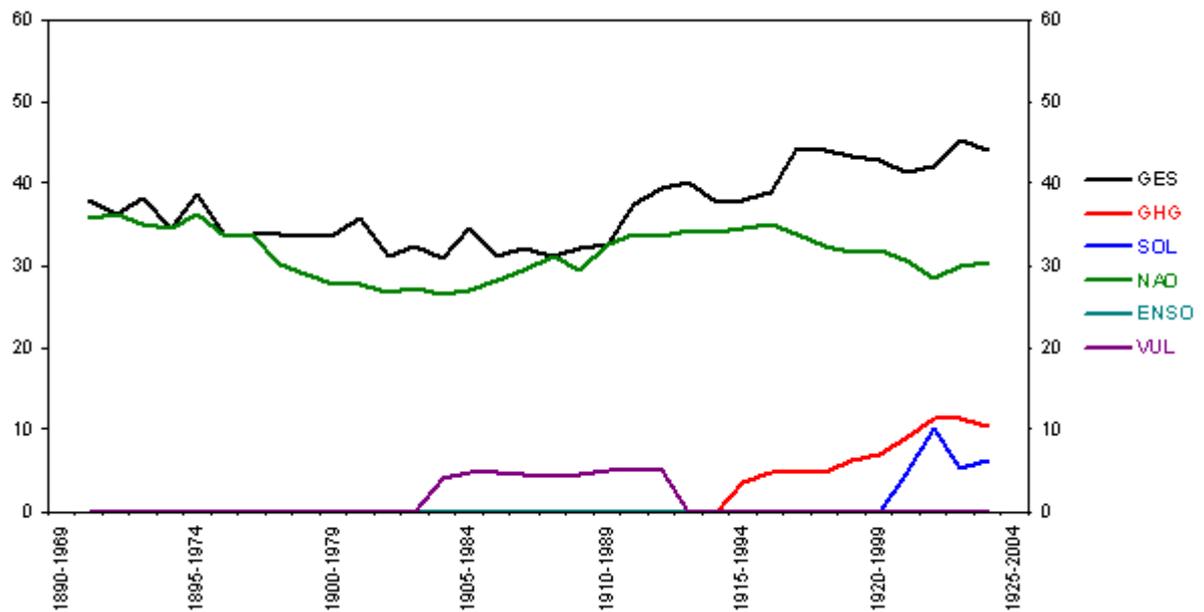


Abb. 67: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Wintermittel Hohenpeißenberg 1891-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

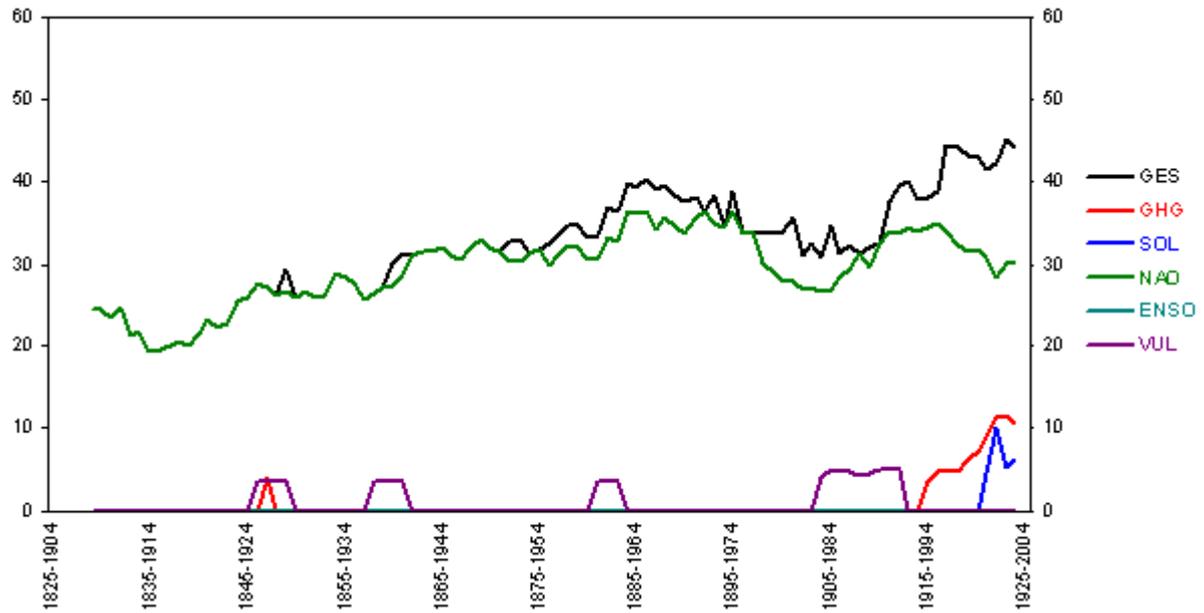


Abb. 68: Verlauf der durch die verschiedenen Einflüsse am Temperatur-Wintermittel Hohenpeißenberg 1829-2003 erklärten Varianzen für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

## 5. Bewertung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, mittels einer statistischen Untersuchung den Einfluss wichtiger klimarelevanter Prozesse auf die bodennahen Lufttemperaturen zu erfassen. Im Vordergrund stand dabei die Separierung natürlicher Einflüsse vom anthropogen verursachten Zusatz-Treibhauseffekt. Mit einer zeitlich gleitenden Analyse wurde untersucht, ob vor dem Hintergrund einer immer schneller anwachsenden Konzentration anthropogener Treibhausgase in der Atmosphäre eine Bedeutungsverschiebung unter den verschiedenen Einflüssen zu beobachten ist.

Insbesondere bei den Zeitreihen der globalen Temperatur-Gebietsmittel, die aufgrund der großräumigen Mittelung relativ geringe stochastische Variabilitäten aufweisen, lässt sich ein starker anthropogener Einfluss gut nachweisen. Innerhalb der letzten rund 25 Jahre steigt das Gewicht der anthropogenen Treibhausgase deutlich an, während die solaren Strahlungsschwankungen als wichtigster natürlicher Einfluss gleichzeitig deutlich an Bedeutung verlieren. Somit deutet sich in den jungen Zeitfenstern eine zunehmende Dominanz der anthropogenen Treibhausgase gegenüber den betrachteten natürlichen Einflüssen an. Vor dem Hintergrund eines prognostizierten starken Anstieges der Emissionen von Treibhausgasen aus anthropogenen Quellen (vgl. [6]) muss erwartet werden, dass sich das zugehörige Temperatur-Signal immer weiter von der erfassten natürlichen Temperatur-Variabilität abhebt, der Temperatur-Verlauf also immer deutlicher anthropogen geprägt wird.

Als ein wichtiges Problem bei den Berechnungen hat sich die Kovarianz zwischen den Zeitreihen der solaren und der anthropogenen Einflussgröße erwiesen. Aufgrund ähnlicher Trendkomponenten in beiden Reihen gelingt es im Rahmen der multiplen Regressionsanalyse nicht, die zugehörigen Temperatur-Signale vollständig voneinander zu trennen. Somit fällt es schwer, die Bedeutung der solaren Strahlungsvariabilitäten quantitativ richtig einzuschätzen. Nimmt man den berechneten Strahlungsantrieb als Maßstab ( $+0,3 \text{ Wm}^{-2}$  gegenüber  $+2,4 \text{ Wm}^{-2}$  durch die anthropogenen Treibhausgase; vgl. Tab. 1, Kap. 1.5), dann erscheinen die

maximalen, über alle Gebiete gemittelten Temperatur-Signale durch den solaren Einfluss von +0,16 K (gegenüber +0,68 K anthropogenes Signal, beide Werte berechnet für die globalen Gebietsmittel 1881-2003) noch überschätzt.

Ein ungelöstes Problem ist die fehlende Berücksichtigung des Einflusses durch troposphärisches Sulfat in den Regressionsanalysen. Ähnliche Untersuchungen unter Verwendung zugehöriger Einfluss-Zeitreihen (vgl. [19]) erbrachten leider keine plausiblen Resultate. Eine besondere Schwierigkeit liegt dabei in der kurzen atmosphärischen Verweildauer dieser Aerosole und ihrem Einfluss auf die Wolkenbildung, weshalb die Erstellung geeigneter Zeitreihen problematisch ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] W. E. Arntz und E. Fahrbach. El Niño – Klimaexperiment der Natur: die physikalischen Ursachen und biologischen Folgen. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin, 1991.
- [2] R. S. Bradley. Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary. Second Edition. Academic Press, San Diego, London, Boston, 1999.
- [3] R. J. Charlson et al. Perturbation of the Northern Hemisphere Radiative Balance by Backscattering from Anthropogenic Sulfate Aerosols. *Tellus*, 43A-B, 152-163, 1991.
- [4] M. Denhard, J. Grieser, M. Klein und C.-D. Schönwiese. Statistische und deterministische Abschätzung vulkanischer Einflüsse auf das globale Klima. Berichte d. Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt am Main, Nr. 101, 1997.
- [5] J. Grieser und C.-D. Schönwiese. Parametrization of Spatio-temporal Patterns of Volcanic Aerosol Induced Stratospheric Optical Depth and its Climate Radiative Forcing. *Atmósfera*, 12: 111-133, 1998.
- [6] J.T. Houghton et al., Hrsg. IPCC, 2001 : Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001.
- [7] J. W. Hurrell. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science*, 269: 676-679, 1995.
- [8] P. D. Jones et al. Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature timeseries. *J. Geophys. Res.*, 106: 3371-3380, 2001.
- [9] P. D. Jones, T. Jónsson und D. Wheeler. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South West Iceland. *International Journal of Climatology*, 17: 1433-1450, 1997.
- [10] J. Lean. Evolution of the Sun's spectral Irradiance Since the Maunder Minimum. *Geophys. Res. Lett.*, 27(16):2425-2428, 2000.
- [11] Oak Ridge University. Carbone Dioxide Information Analysis Center, USA. <http://cdiac.esd.ornl.gov>
- [12] W. Roedel. Physik unserer Umwelt – Die Atmosphäre. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.

- [13] C. F. Ropelewski und P. D. Jones. An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review*, 115: 2161-2165, 1987.
- [14] R. Schlittgen und B. H. J. Streitberg. *Zeitreihenanalyse*. R. Ouldenbourg Verlag, München, 5. Auflage, 1994.
- [15] C.-D. Schönwiese. Das „Treibhaus“-Problem: Emissionen und Klimaeffekte. *Berichte d. Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt am Main*, 1994.
- [16] C.-D. Schönwiese. *Klimatologie*. UTB, Stuttgart, 2003.
- [17] C.-D. Schönwiese. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 3. Auflage, 2000.
- [18] C.-D. Schönwiese, R. Ullrich und F. Beck. Solare Einflüsse auf die Lufttemperaturen der Erde in den letzten Jahrhunderten. Projektbericht im Auftrag des Deutschen Steinkohlenbergbaus. *Institutsbericht 92, Inst. F. Meteorologie u. Geophysik, Universität Frankfurt*, 1992.
- [19] T. Staeger. *Empirisch-statistische Analyse von Wechselbeziehungen zwischen Klimasystem und Anthroposphäre in neoklimatologischer Zeit*. Dissertation, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 2003, Bericht Nr. 107 des Instituts für Meteorologie und Geophysik.
- [20] T. Staeger. *Statistische Analyse des ENSO- und Vulkanismus-Signals in Klimazeitreihen*. Diplomarbeit, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 1997.
- [21] H. von Storch, S. Güss und M. Heimann. *Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung*. Springer, Berlin, 1999.
- [22] University of Norwich. Climatic Research Unit, UK (England). <http://www.cru.uea.ac.uk>
- [23] A. Werner und C.-D. Schönwiese. A statistical analysis of the North Atlantic Oscillation and it's impact on European temperature. *The Global Atmosphere and Ocean System*, 8(4): 293-306, 2002.
- [24] T. M. L. Wigley. Radiative contribution of different trace gases to the Greenhouse Effect. *Climate Monitor*, 16: 14-28, 1987.

## Anhang A

### Ergänzende Signifikanz- und Residuenanalyse

#### Signifikanz der erklärten Varianzen

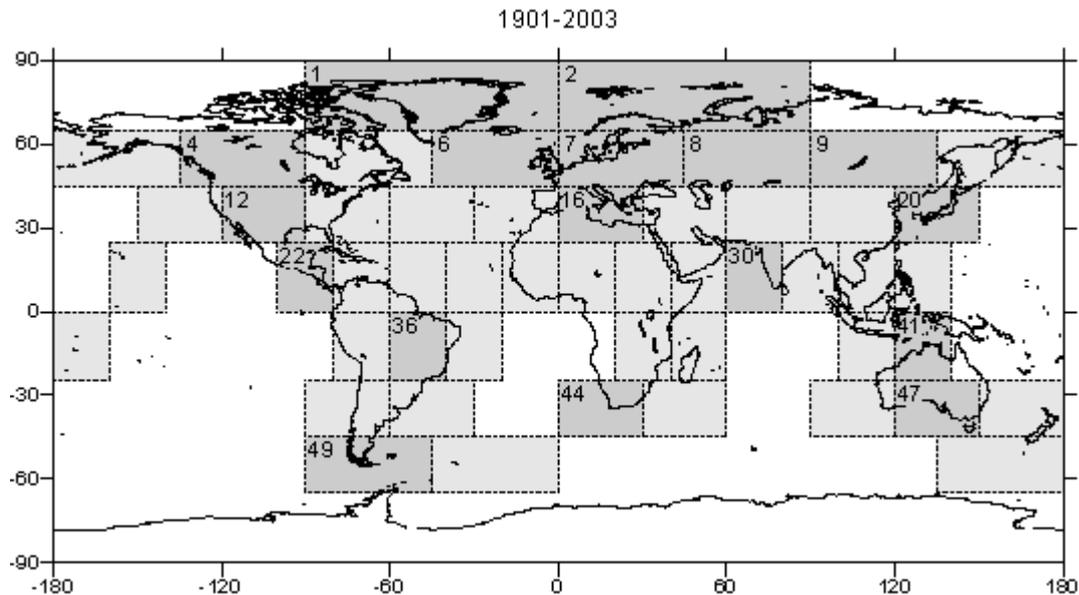
Eine Durchführung der Schrittweisen Regression mit zufallsgenerierten Zeitreihen als Einflussgrößen (vgl. Kap. 2.6) erbrachte für die globalen Gebietsmittel (Jahresmittel 1901-2003) eine mittlere am Gesamtdatenfeld erklärte Varianz von 5,8% bei einer Standardabweichung von 3,1%. Bei einer entsprechenden Untersuchung der Zeitreihe Hohenpeißenberg (Jahresmittel 1891-2003) wurde ein Mittelwert von 4,8% erklärter Varianz bei einer Standardabweichung von 4,6% berechnet. Bei saisonaler Betrachtung ergeben sich für beide Beispiel-Untersuchungen kaum Änderungen in den Resultaten. Aus diesen Ergebnissen folgt, dass erklärte Varianzen von unter 10% (bei Zulassung aller Regressoren) als eher unsignifikant anzusehen sind.

#### Residuen-Analyse

Die in Kap. 2.7 beschriebene Untersuchung der Residuen auf Normalverteilung wurde exemplarisch für die globalen Gebietsmittel (Jahresmittel 1901-2003) und die Zeitreihe Hohenpeißenberg (Jahresmittel 1891-2003) durchgeführt. Für die Gebietsmittel erhält man je nach Gebiet zwischen 21% und 100% Wahrscheinlichkeit für ein normalverteiltes Residuum (im Mittel 77%), die Einzelzeitreihe ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 69% normalverteilt. Damit ist gezeigt, dass sich die Residuen nicht signifikant von einem Zufallsrauschen unterscheiden.

## Anhang B

## Zeitreihen der globalen Gebietsmittel



Liste der präsentierten Gebietszeitreihen:

- |                            |                                   |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1: Grönland                | 20: Japan/ Korea                  |
| 2: Europäische Arktis      | 22: Mittelamerika                 |
| 4: Westkanada              | 30: westliches Indien/ Nordindien |
| 6: Nordatlantik            | 36: Brasilien                     |
| 7: Europa                  | 41: Indonesien/ Nordaustralien    |
| 8: Westrussland            | 44: Südafrika                     |
| 9: Nördliches Zentralasien | 47: Süd-Australien                |
| 12: West-USA               | 49: Feuerland                     |
| 16: Mittelmeer             |                                   |

Auf den folgenden Seiten sind einige der insgesamt 51 Gebietszeitreihen für den Zeitraum 1901-2003 dargestellt. Es werden jeweils das Jahresmittel, das Sommermittel (bezogen auf die Nordhemisphäre, also Mittel der Monate Juni, Juli und August) und das Wintermittel (bezogen auf die Nordhemisphäre, also Mittel der Monate Dezember, Januar und Februar) als Abweichungen vom Mittelwert gezeigt. Zusätzlich sind die vom Modell erfassten Schwankungen eingezeichnet.

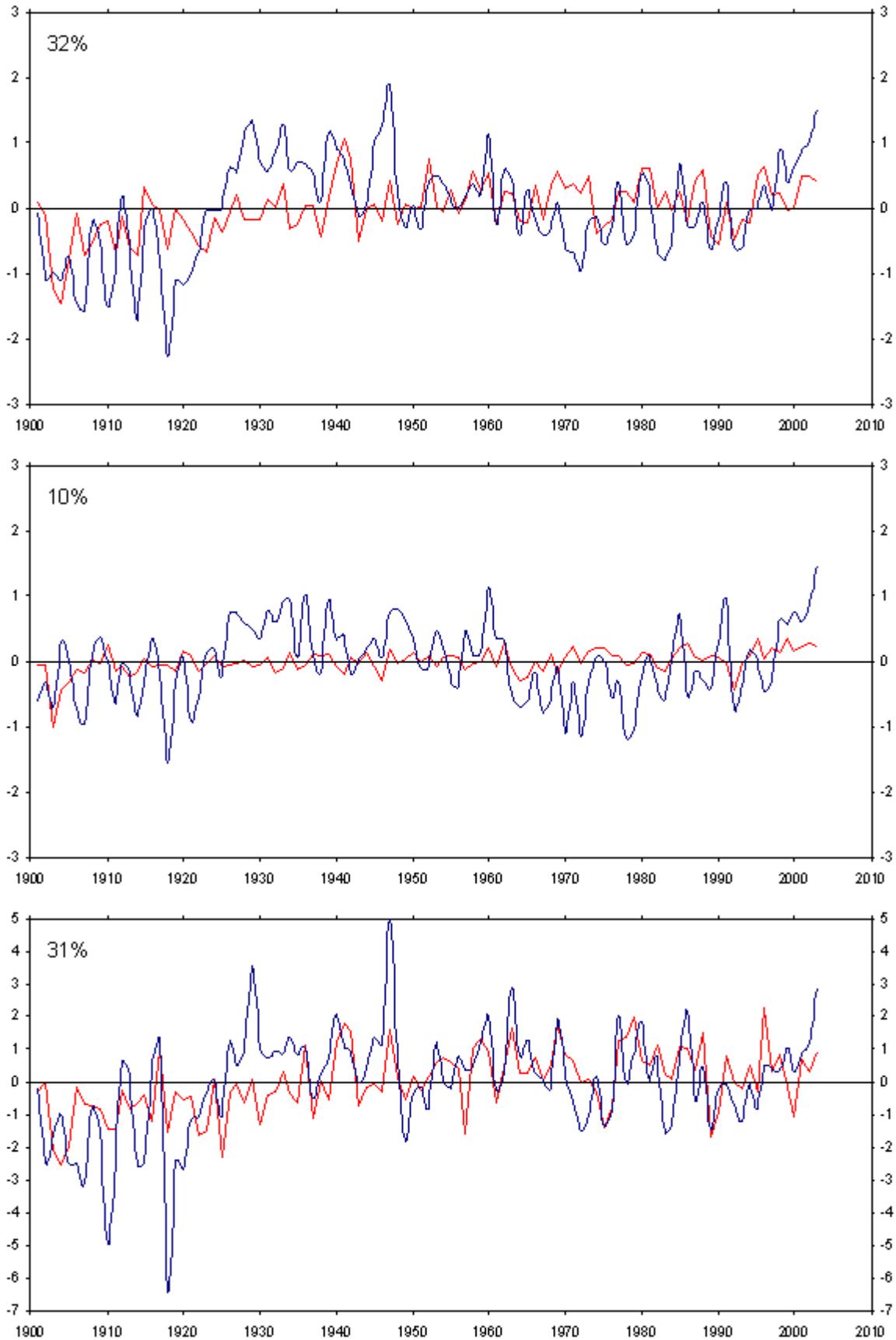


Abb. B1: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 1: Grönland. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

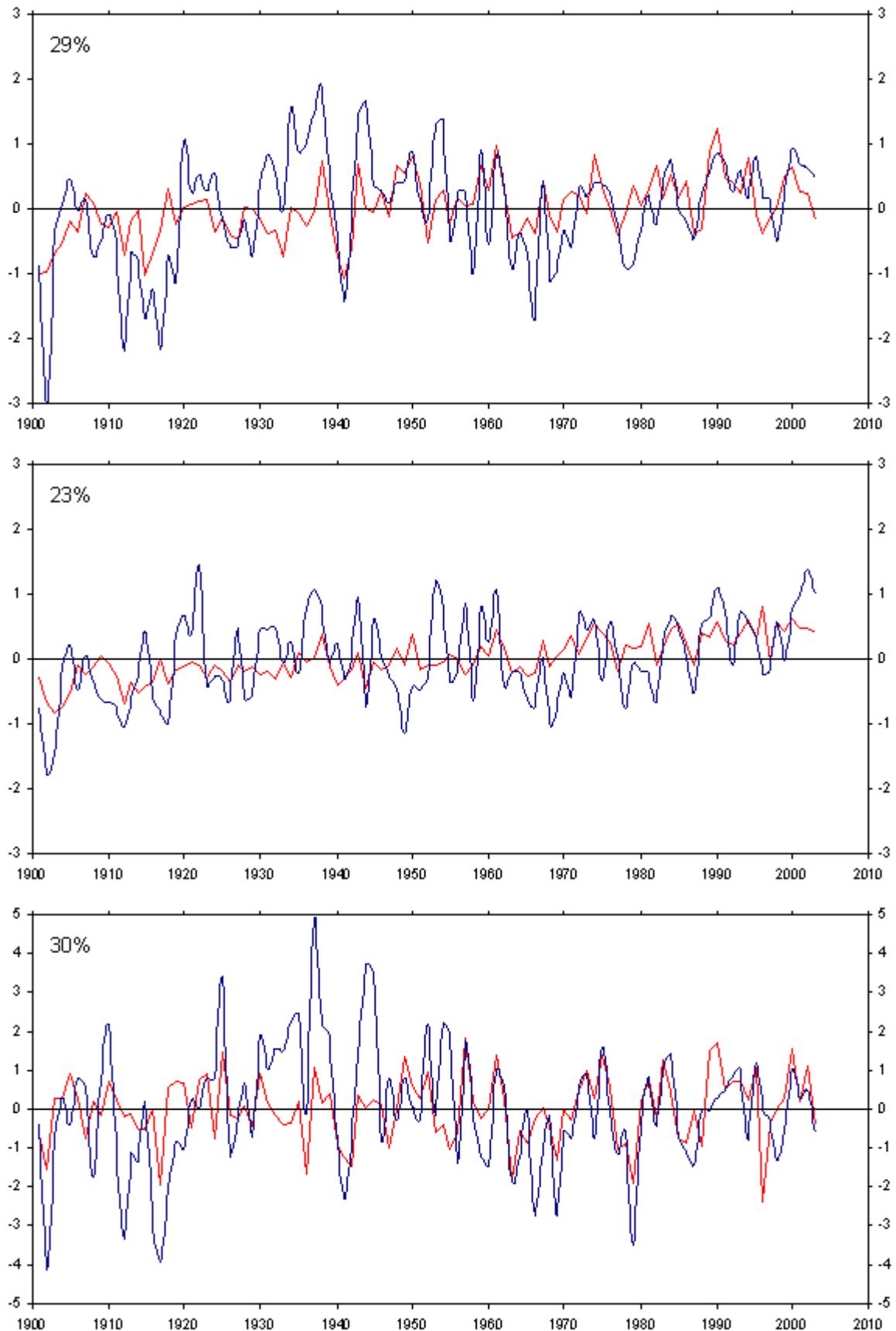


Abb. B2: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 2: Europäische Arktis. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

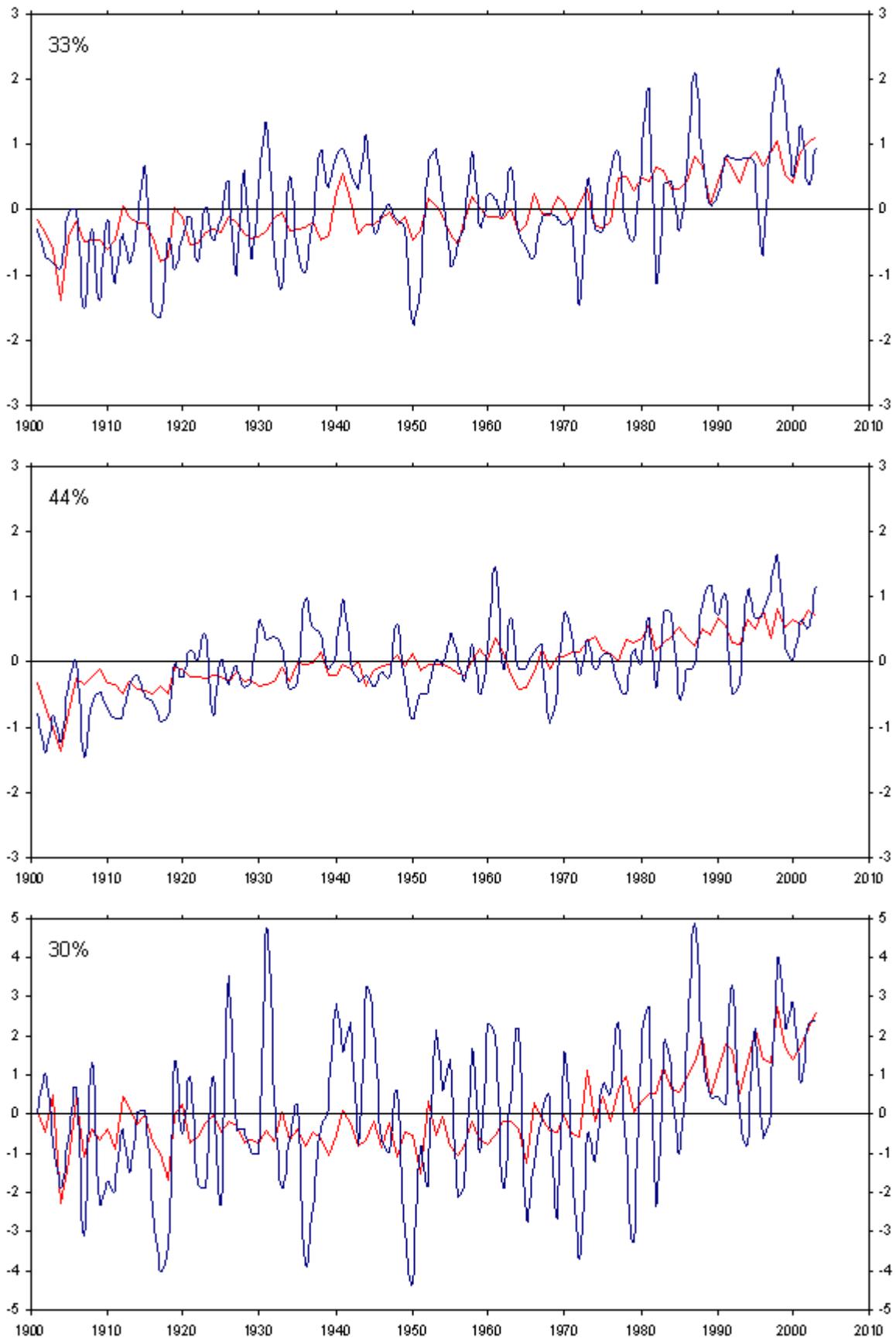


Abb. B3: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 4: Westkanada. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

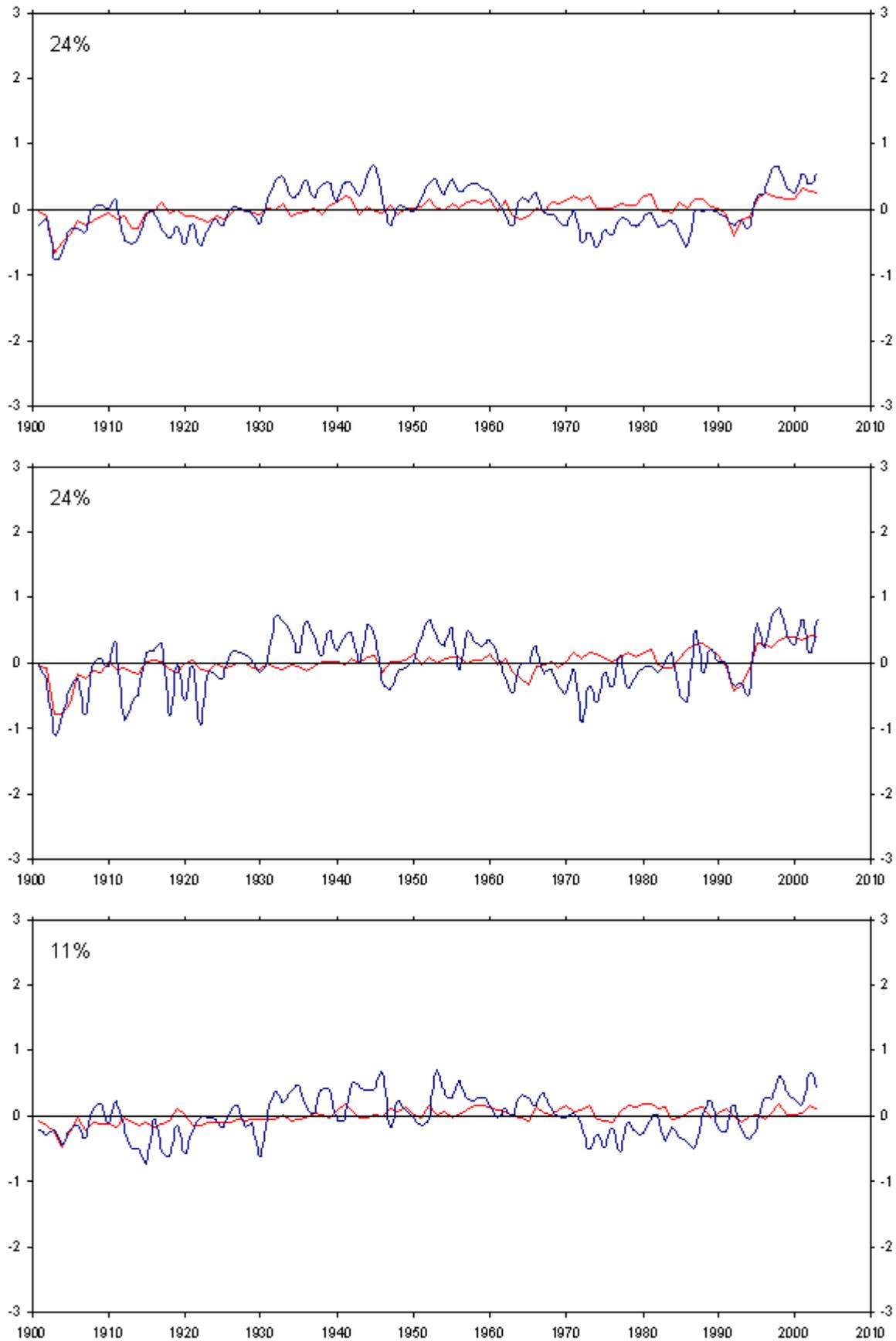


Abb. B4: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 6: Nordatlantik. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

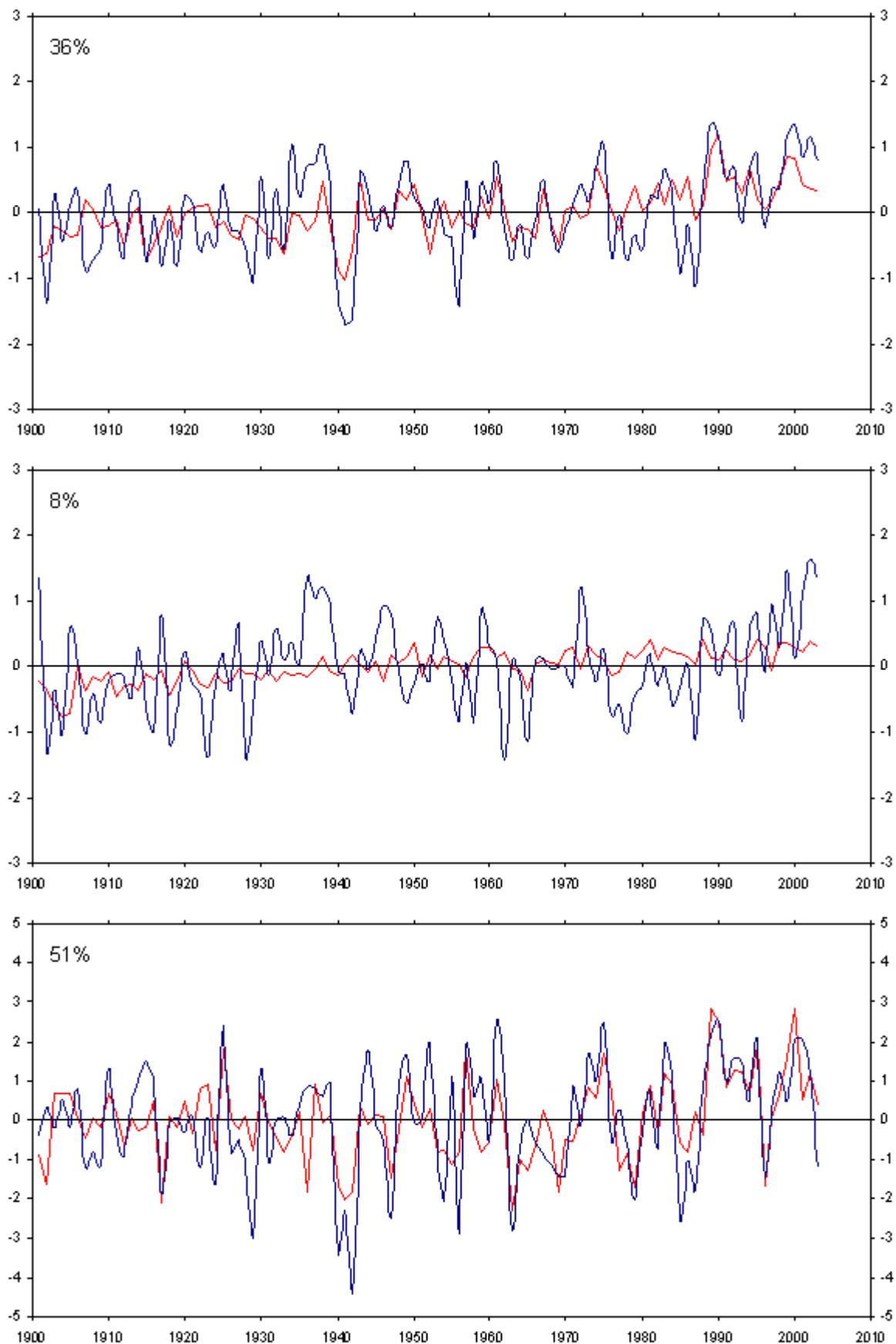


Abb. B5: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 7: Europa. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

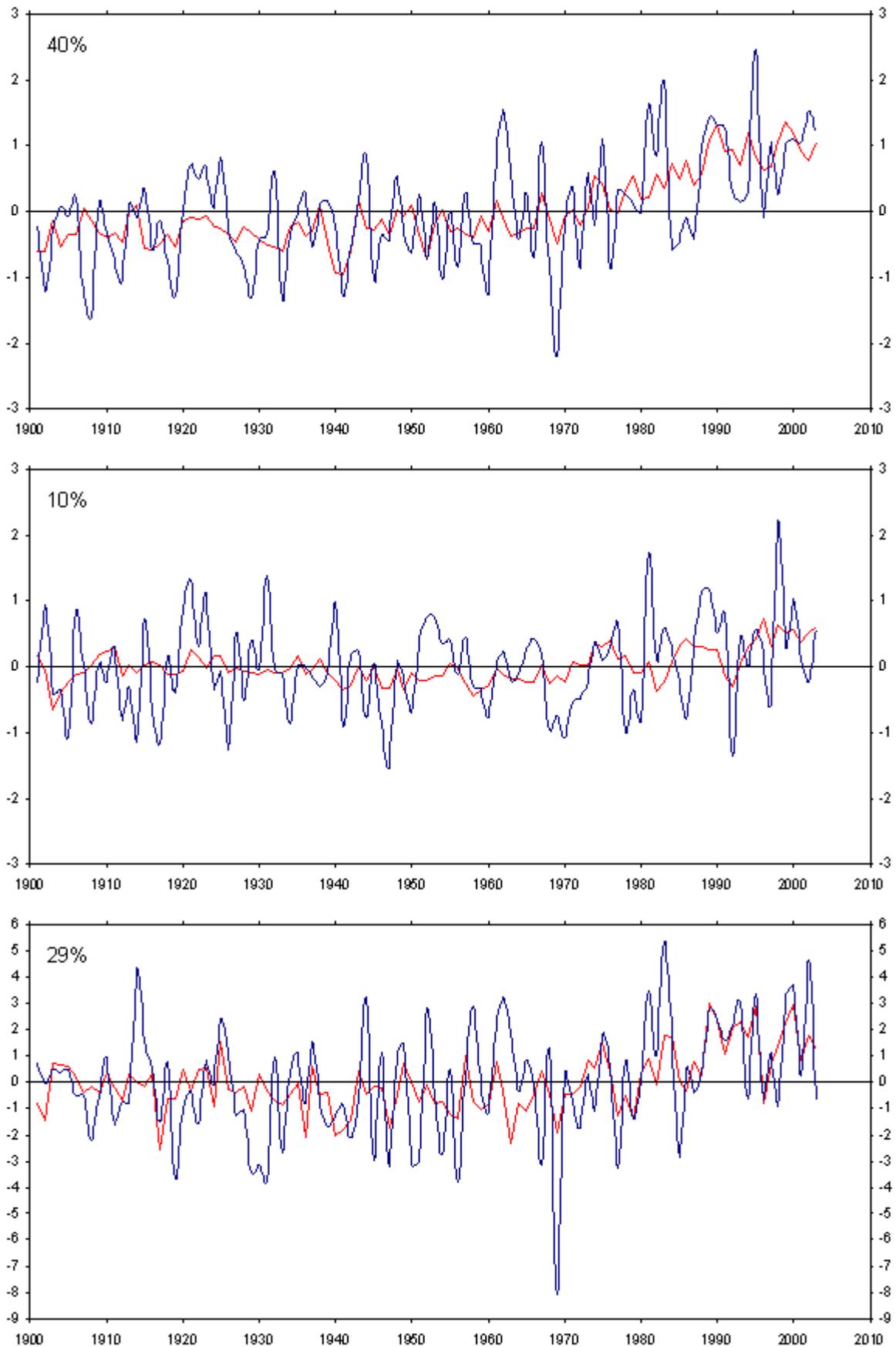


Abb. B6: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 8: Westrusland. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

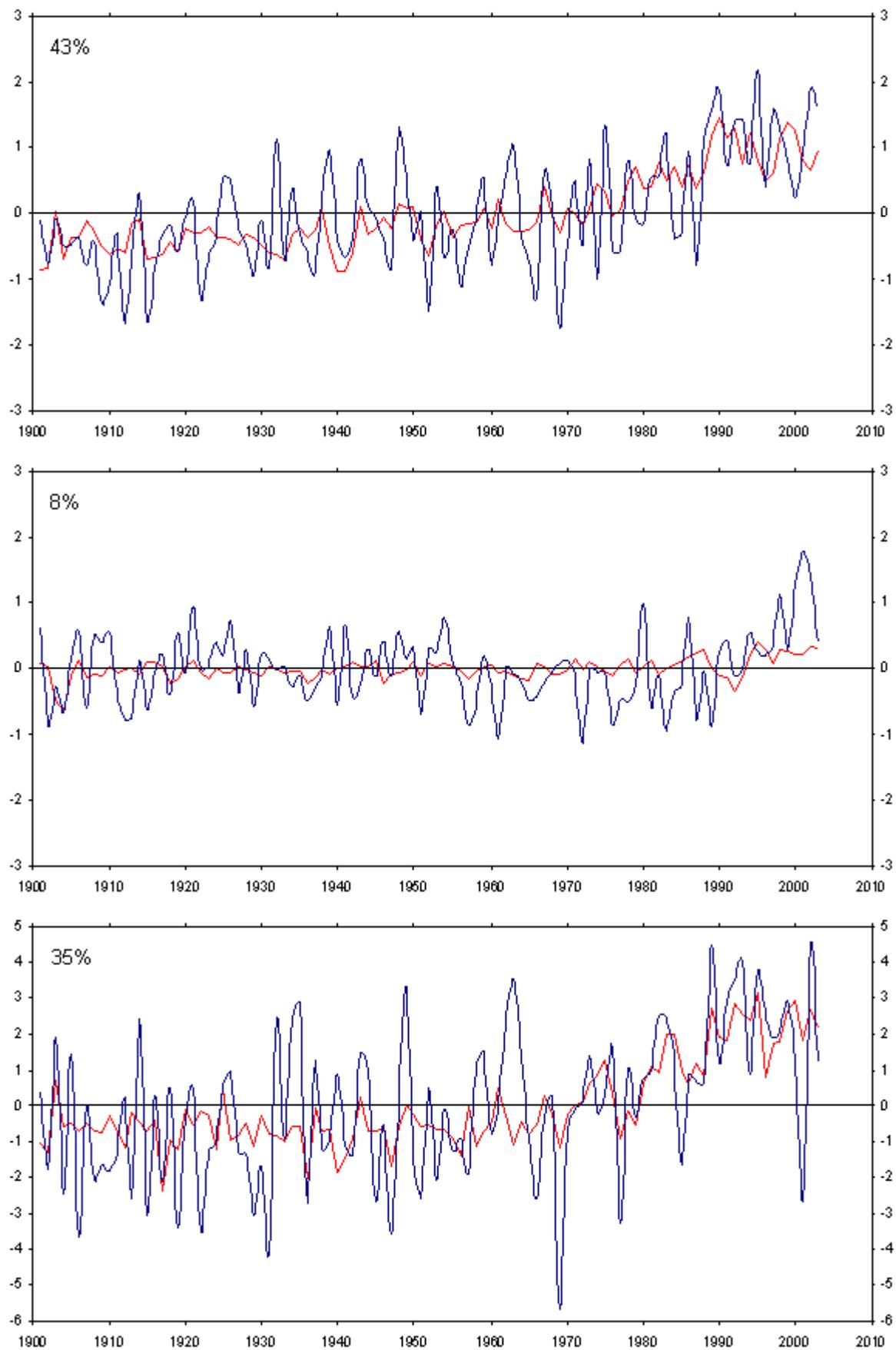


Abb. B7: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 9: nördliches Zentralasien. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

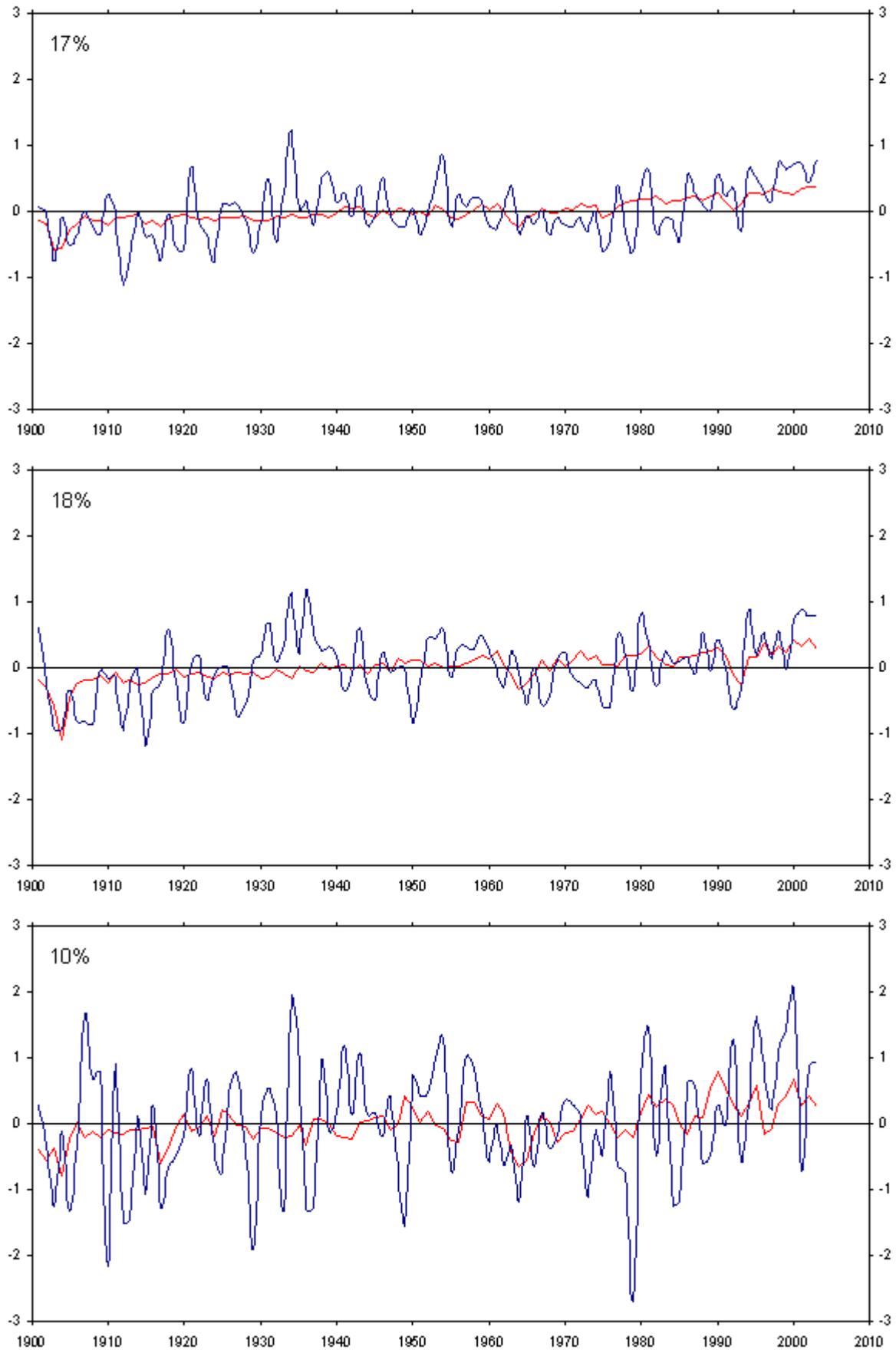


Abb. B8: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 12: West-USA. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

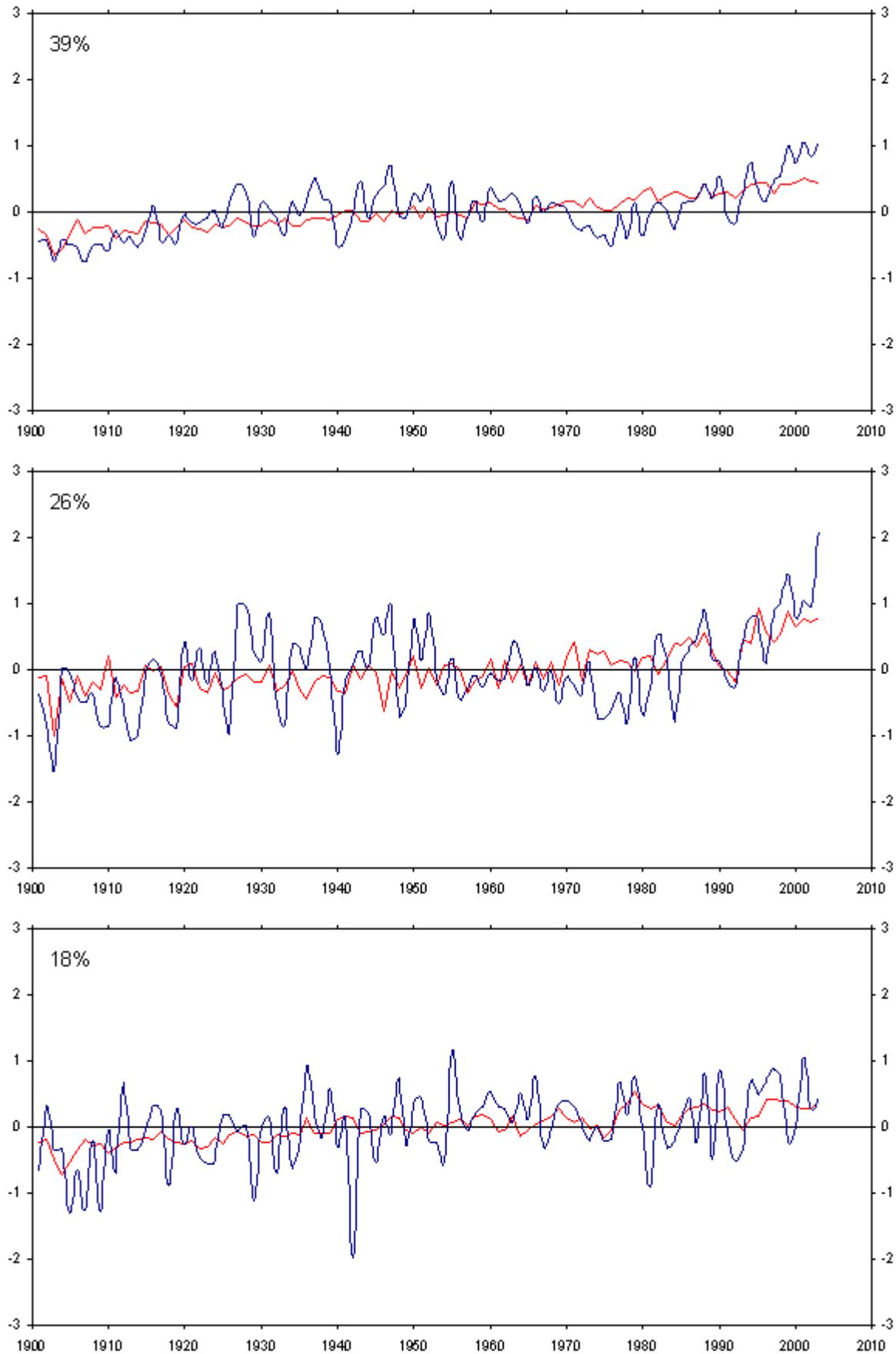


Abb. B9: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 16: Mittelmeer. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

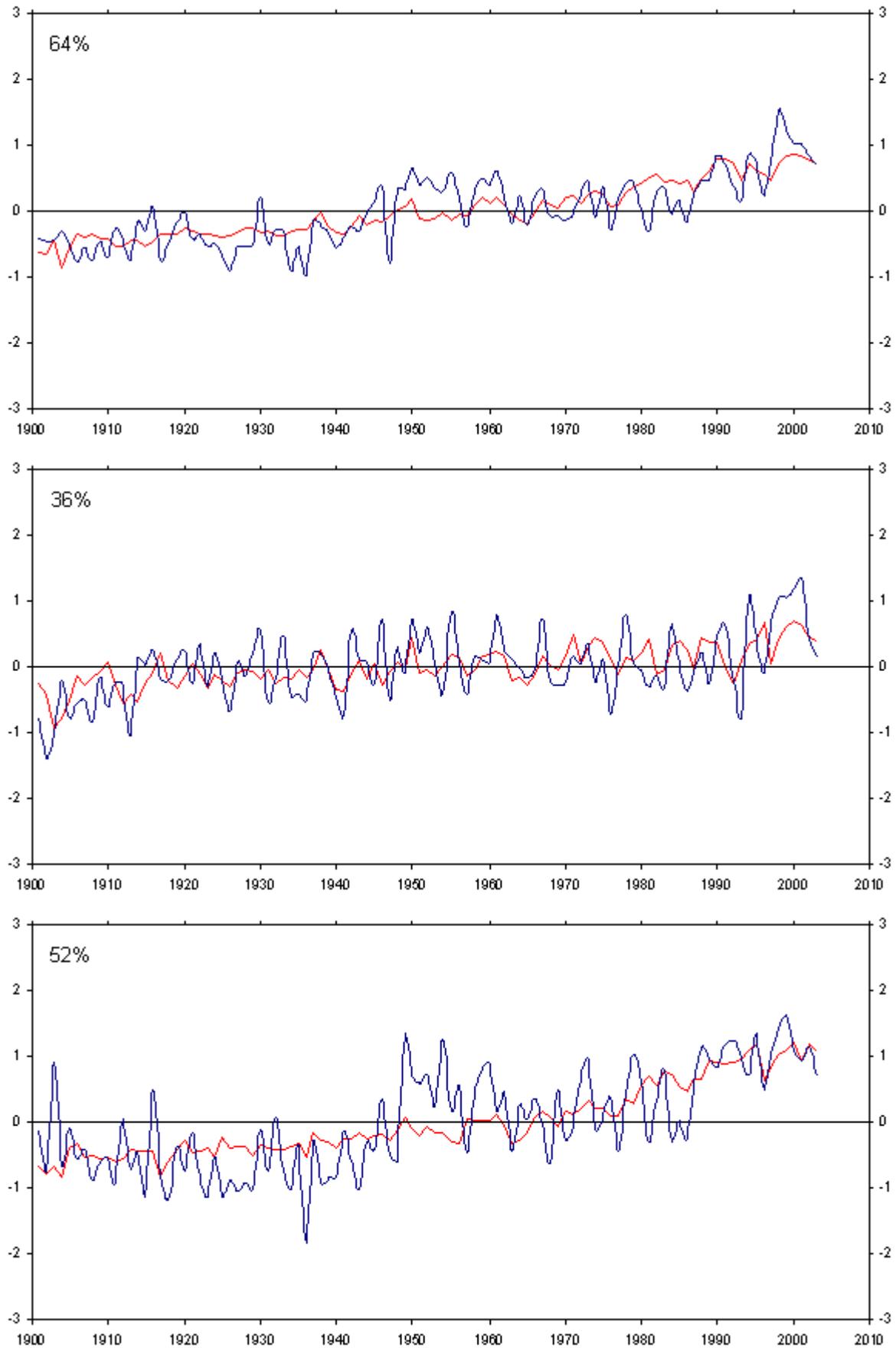


Abb. B10: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 20: Japan/Korea. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

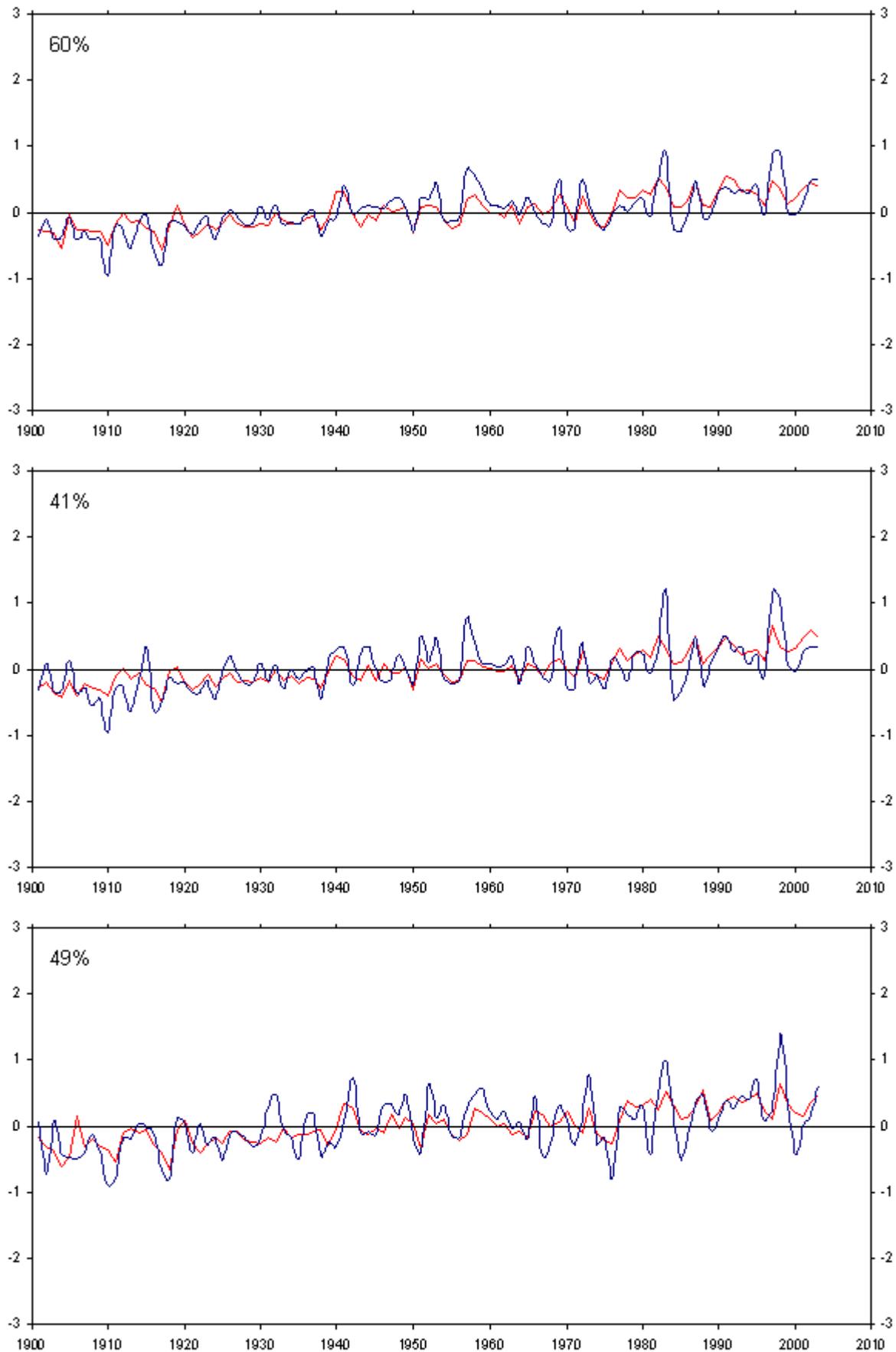


Abb. B11: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 22: Mittelamerika. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

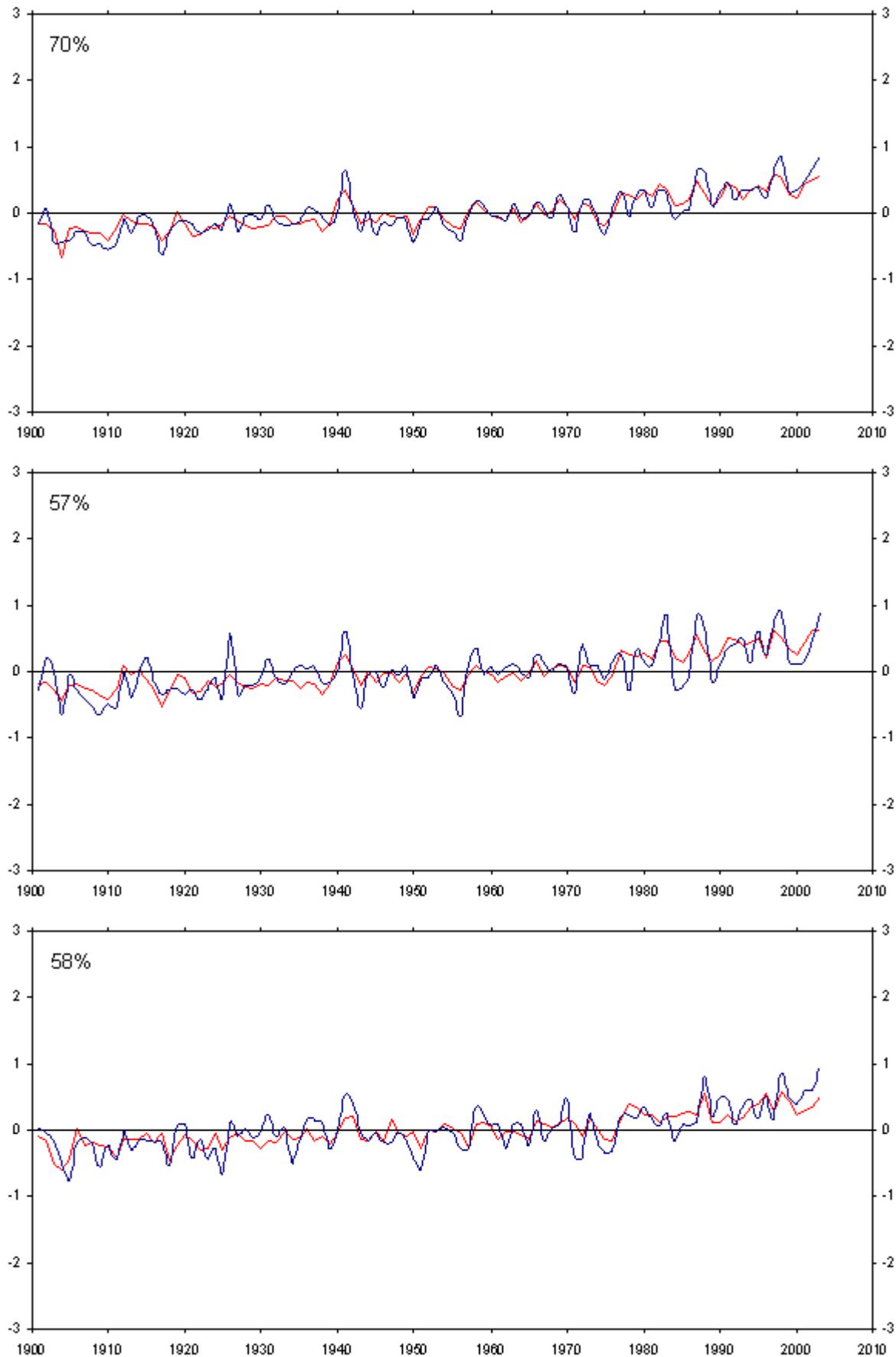


Abb. B12: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 30: westliches Indien/ Nordindik. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

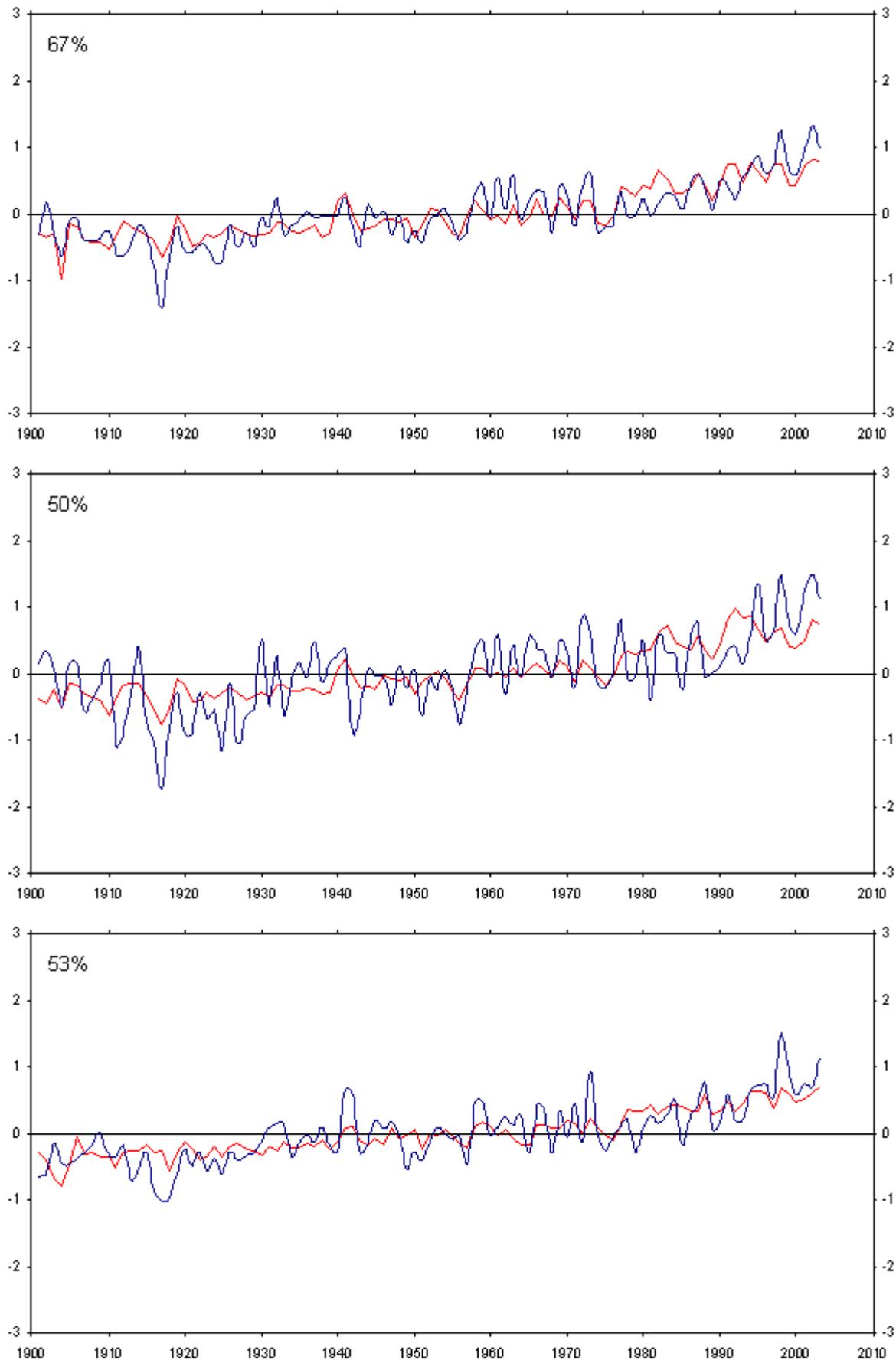


Abb. B13: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 36: Brasilien. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

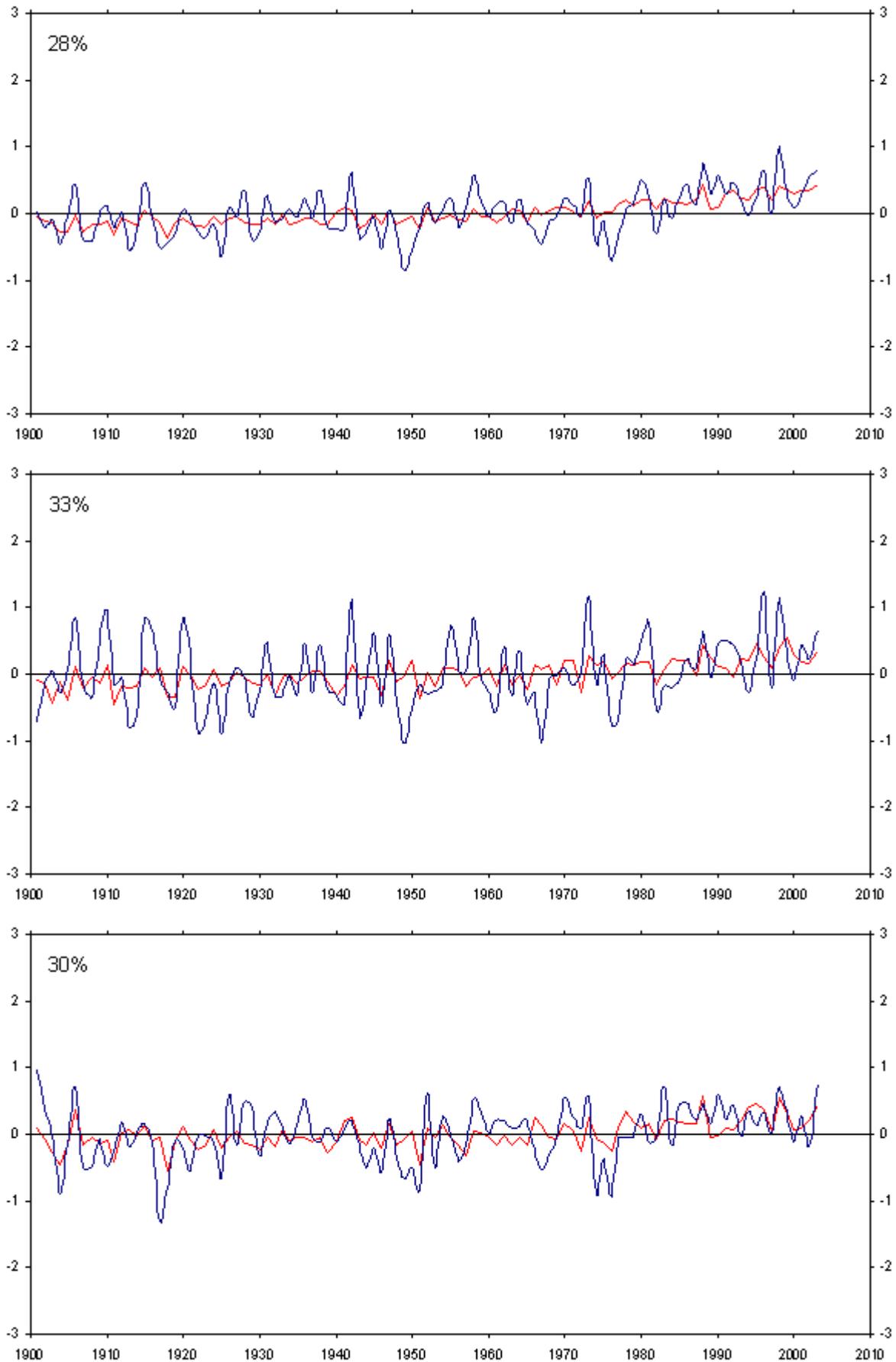


Abb. B14: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 41: Indonesien/Nordaustralien. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

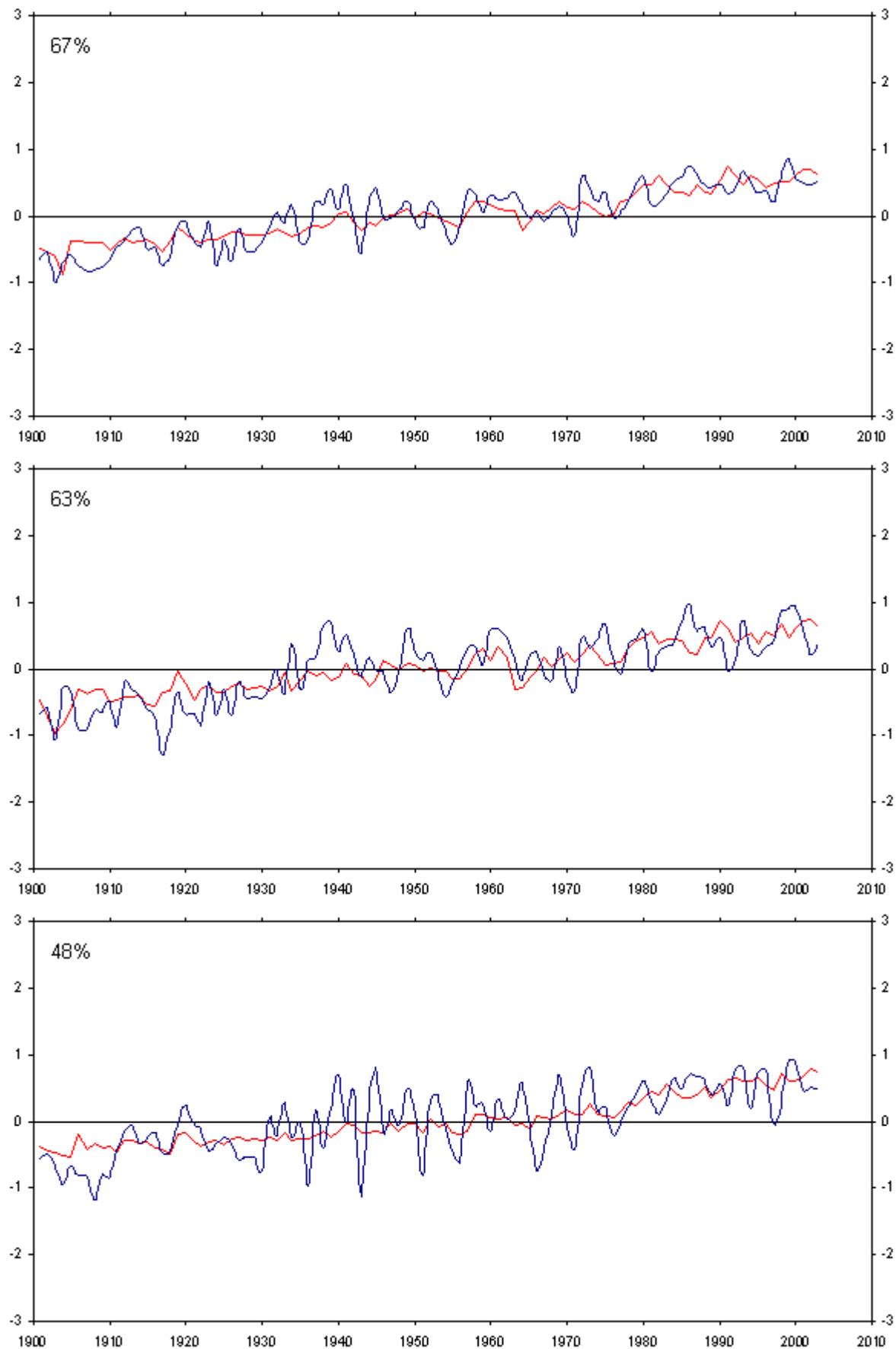


Abb. B15: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 44: Südafrika. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

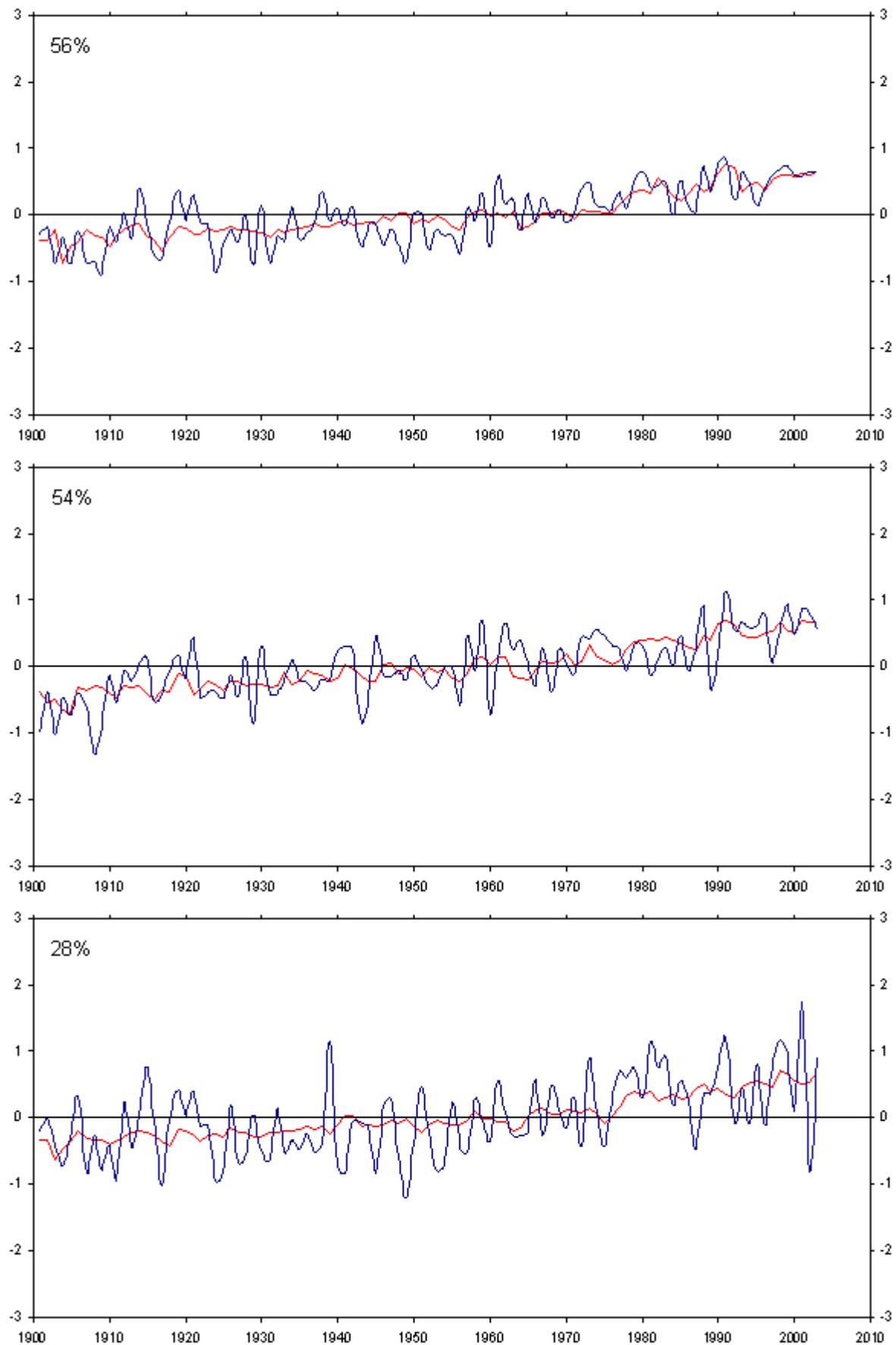


Abb. B16: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 47: Südaustralien. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

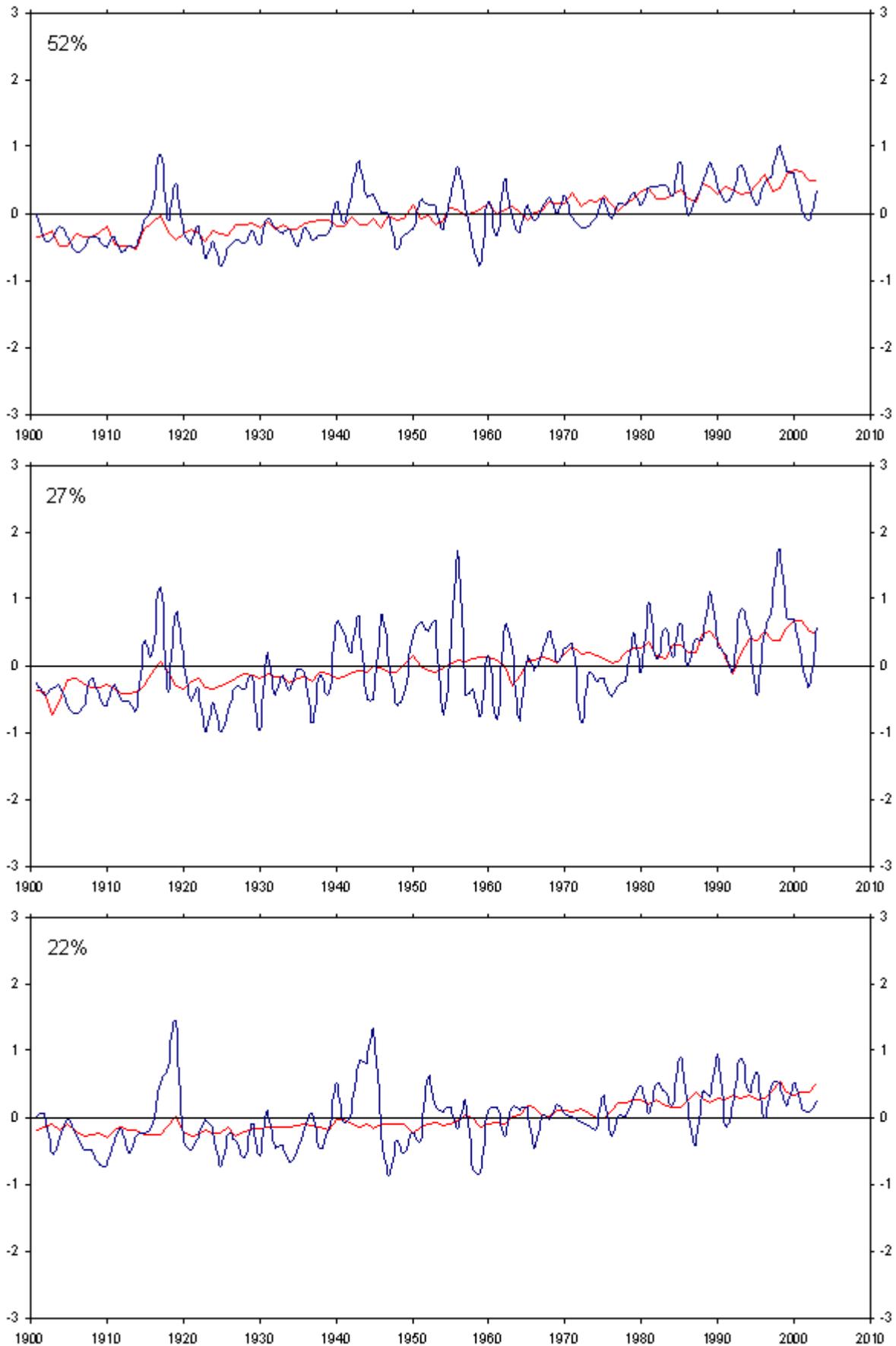
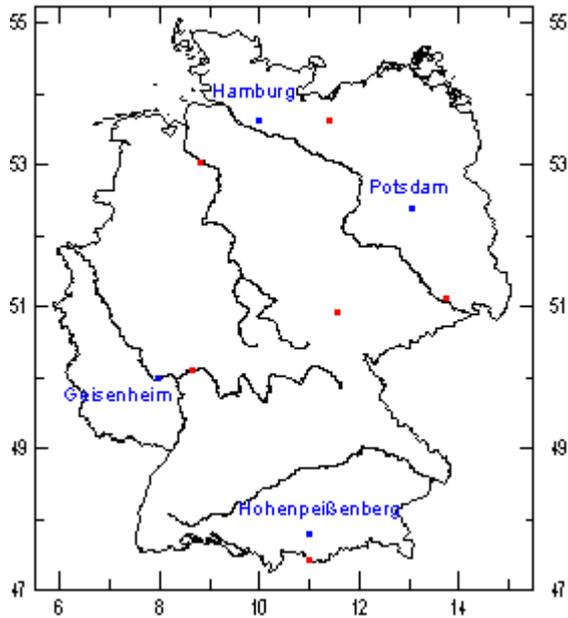


Abb. B17: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1901-2003 im Gebiet 49: Feuerland. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

## Anhang C

## Einzelzeitreihen Deutschland



Auf den folgenden Seiten sind vier der insgesamt zehn analysierten Einzelzeitreihen Deutschlands – namentlich Hamburg, Potsdam, Geisenheim und Hohenpeißenberg – für den Zeitraum 1891-2003 dargestellt. Es werden jeweils das Jahresmittel, das Sommermittel (Mittel der Monate Juni, Juli und August) und das Wintermittel (Mittel der Monate Dezember, Januar und Februar) als Anomalien gezeigt. Zusätzlich sind die vom Modell erfassten Schwankungen eingezeichnet.

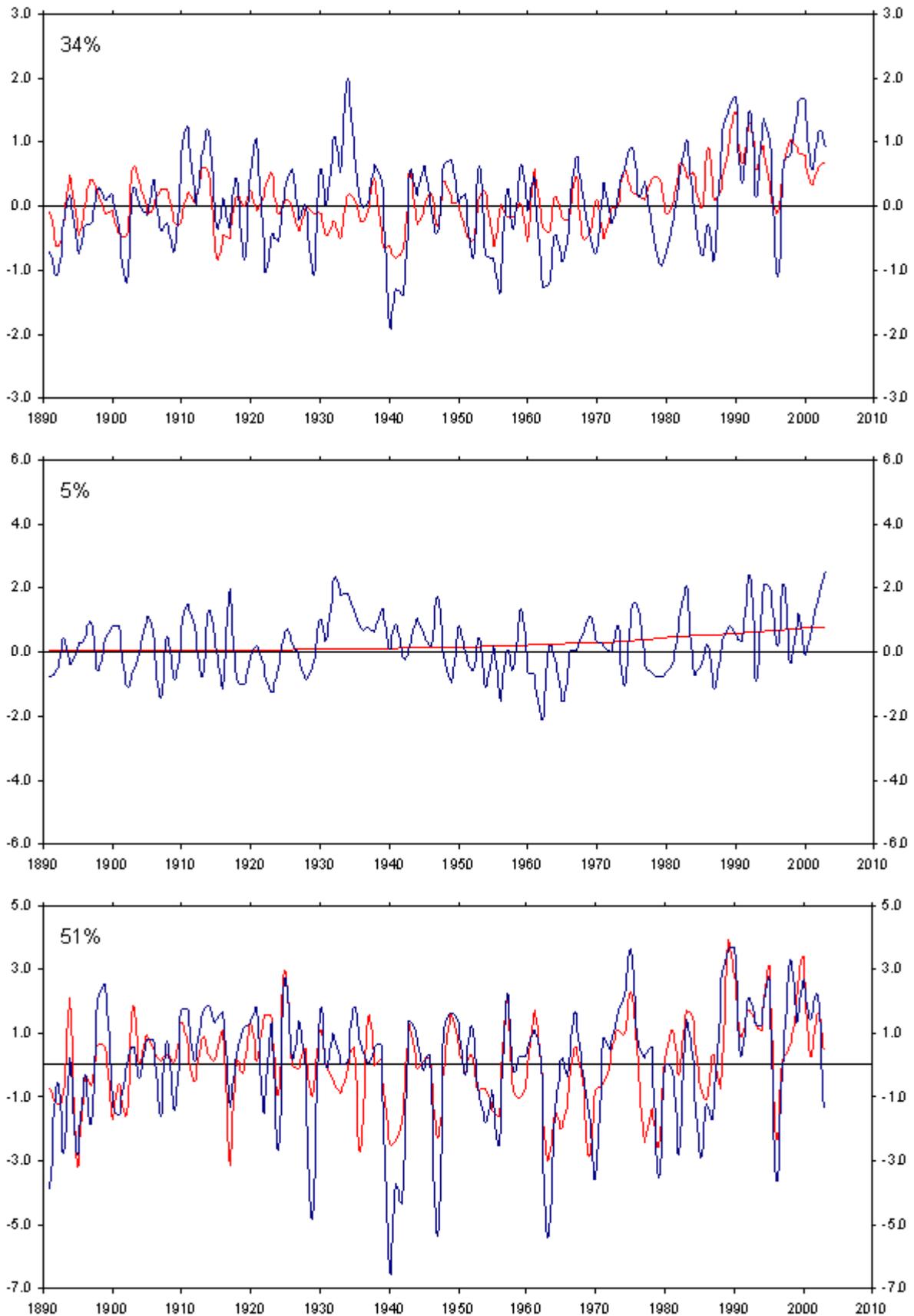


Abb. C1: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1891-2003 an der Station Hamburg. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

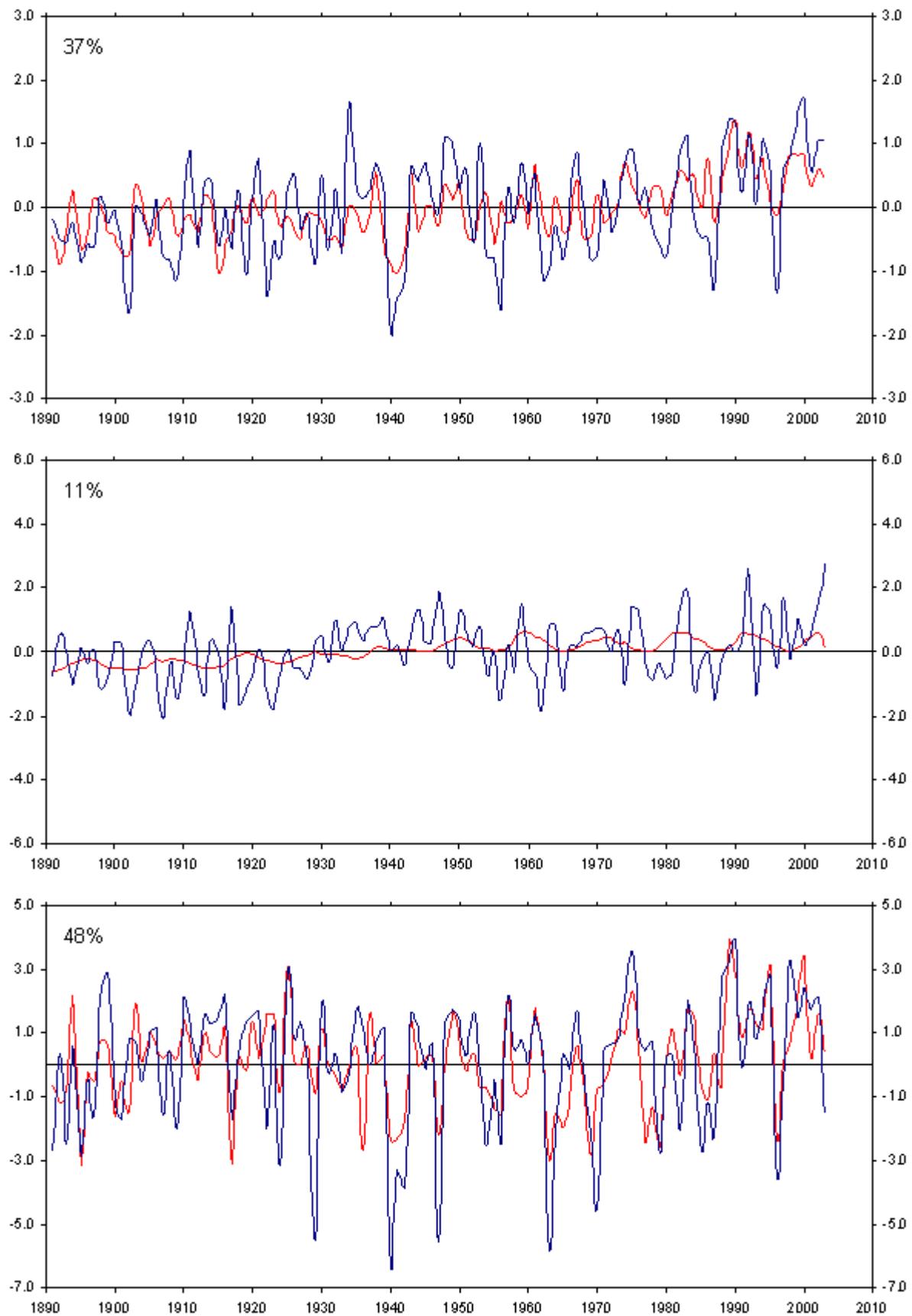


Abb. C2: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1891-2003 an der Station Potsdam. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

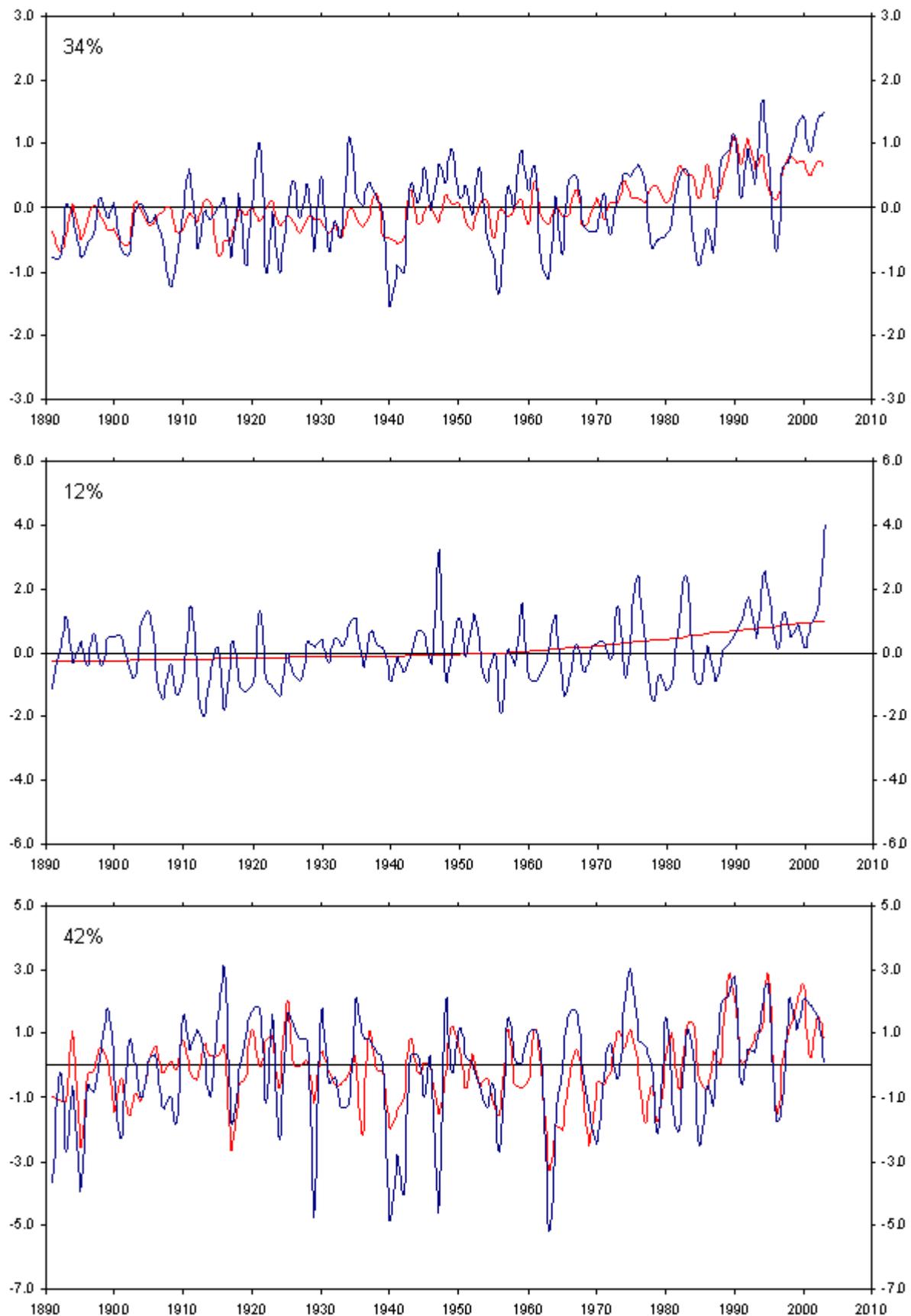


Abb. C3: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1891-2003 an der Station Geisenheim. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

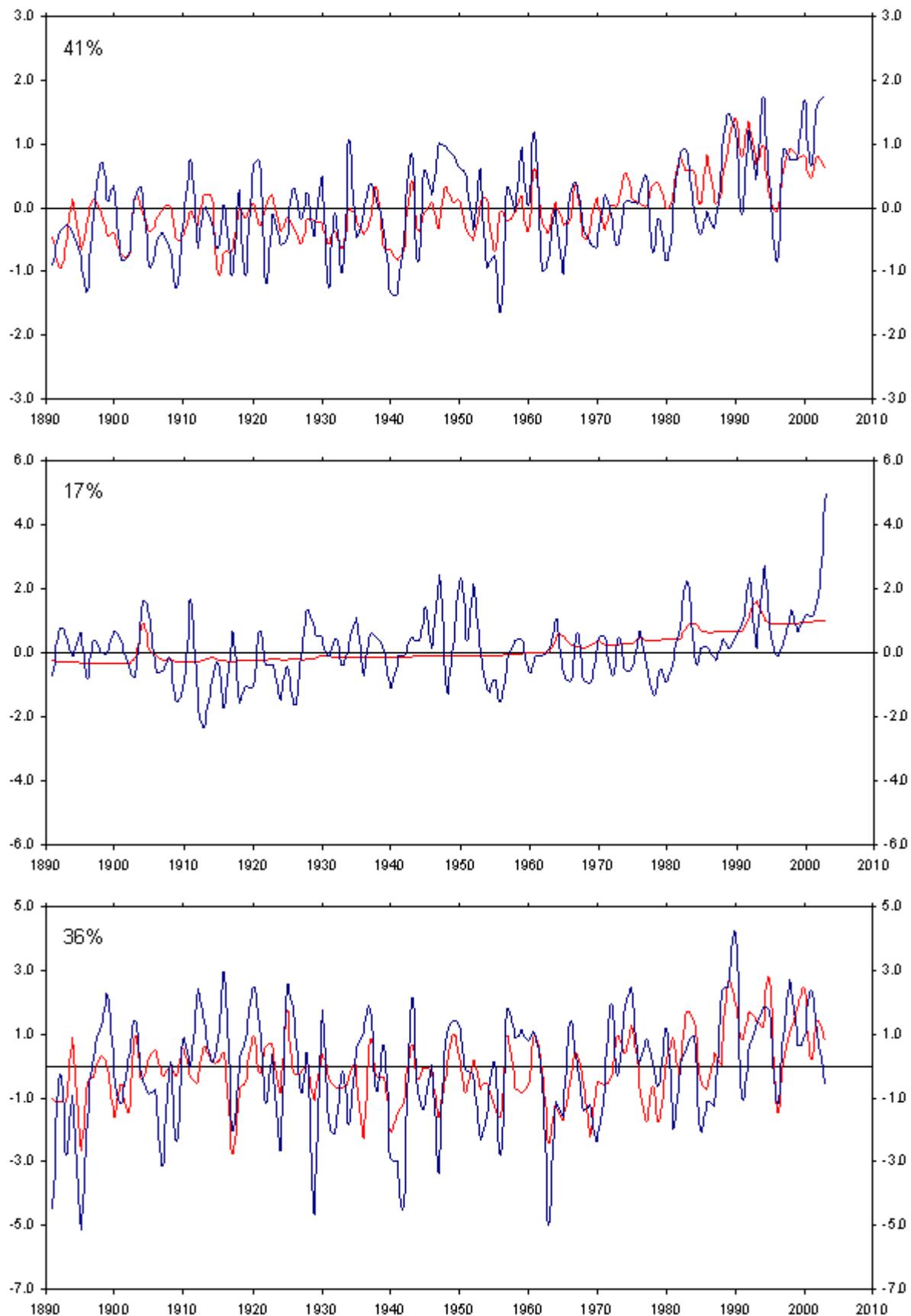


Abb. C4: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels (oben), Sommermittels (Mitte) und Wintermittels (unten) der Temperatur 1891-2003 an der Station Hohenpeißenberg. Jeweils links oben: die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz.

## Anhang D

## Globale Gebietsmittel: Erklärte Varianz

Zur Vervollständigung der Analyse-Ergebnisse der globalen Gebietsmittel sind im Folgenden die durch die einzelnen Einflüsse am Gesamtdatenfeld erklärten Varianzen – im Hauptteil der Arbeit wurden nur der solare und der anthropogene Einfluss gesondert betrachtet – ,sowohl für den jeweiligen Gesamtzeitraum als auch zeitlich gleitend, dargestellt.

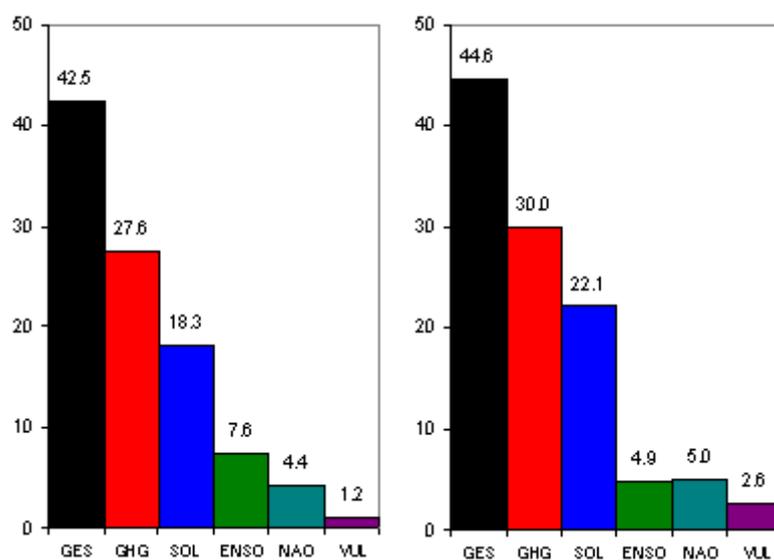


Abb. D1: Erklärte Varianz des Gesamtdatenfeldes der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 (links) und 1881-2003 (rechts) in % bei Beschränkung der Regressoren auf die einzelnen Einflüsse sowie bei Zulassung aller Einflüsse (GES).

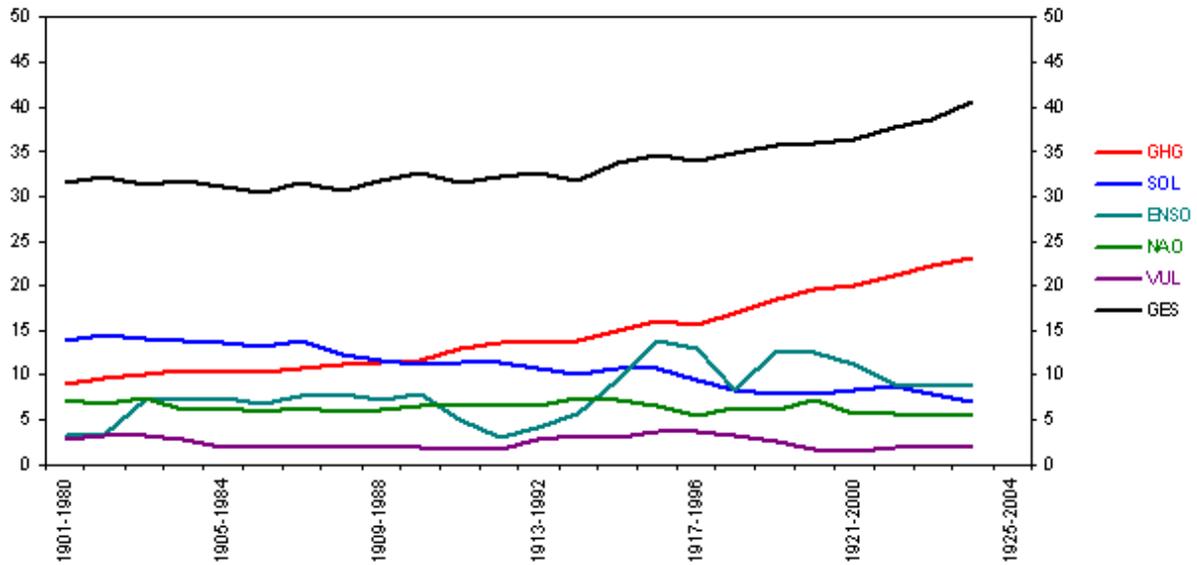


Abb. D2: Verlauf der durch den solaren Einfluss (SOL) und anthropogenen Treibhausgas-Einfluss (GHG) am Gesamtdatenfeld der Temperatur-Jahresmittel 1901-2003 erklärten Varianz für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

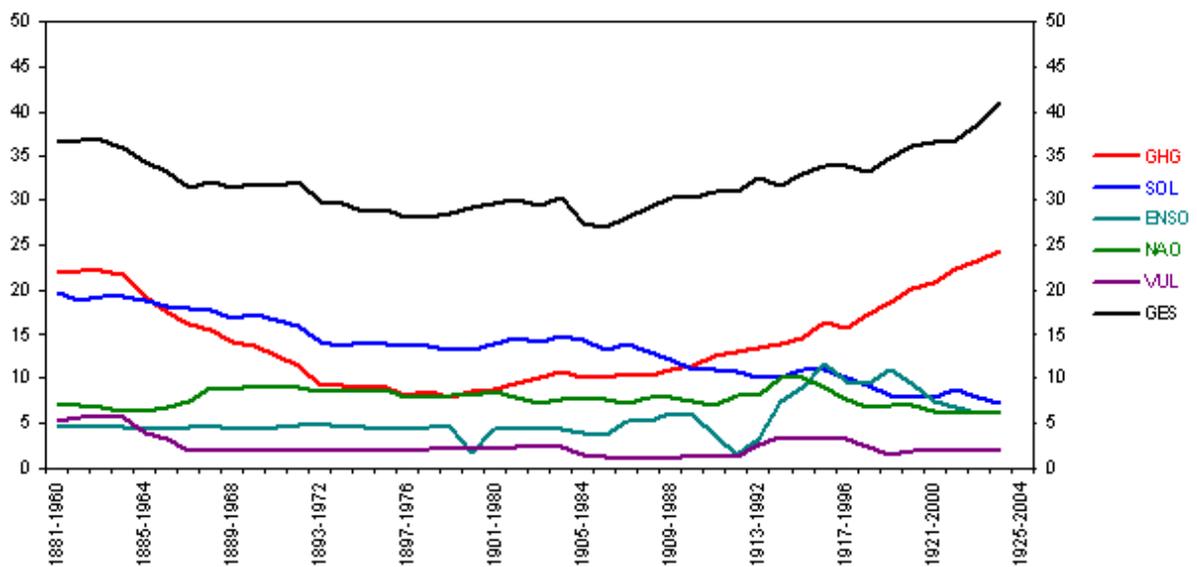


Abb. D2: Verlauf der durch den solaren Einfluss (SOL) und anthropogenen Treibhausgas-Einfluss (GHG) am Gesamtdatenfeld der Temperatur-Jahresmittel 1881-2003 erklärten Varianz für verschiedene 80-jährige Zeitintervalle. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse bei Zulassung aller Regressoren (GES).

## Anhang E

### Globales Mittel und Deutschland-Mittel

Im Rahmen eines Fortgeschrittenen-Praktikums wurden Zeitreihen der bodennahen Lufttemperaturen des globalen Jahresmittels sowie des Deutschland-Jahresmittels mit der Schrittweisen Regression für den Zeitraum 1856-2002 untersucht. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Analysen für den Gesamtzeitraum sowie der 80-jährig zeitlich gleitenden Berechnungen dargestellt.

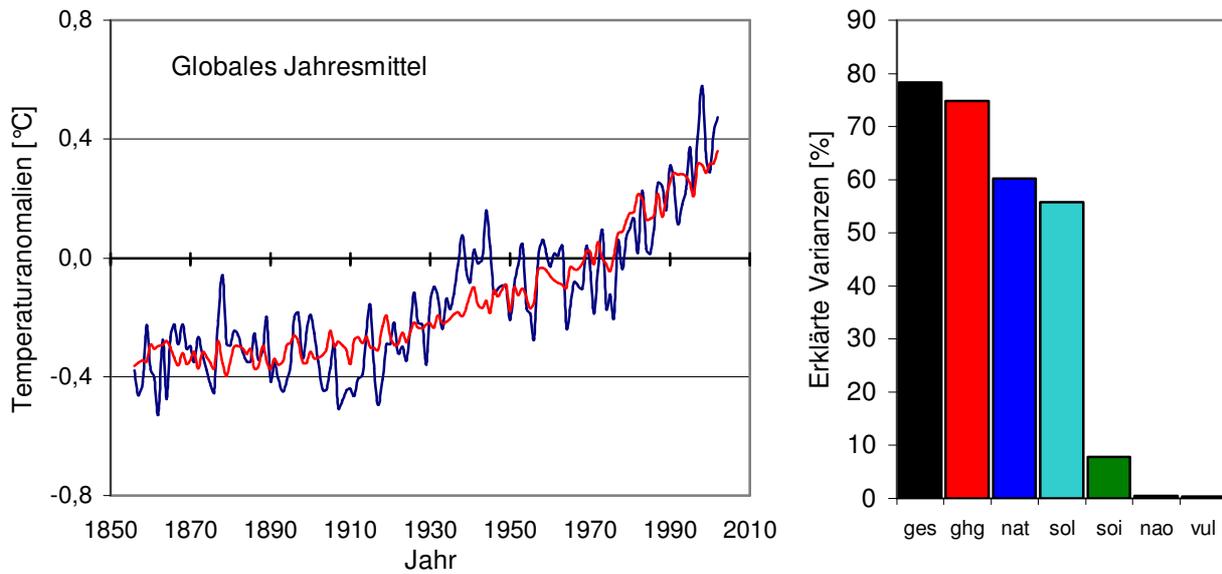


Abb. E1: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels der Temperatur des globalen Mittels (oben) für den Zeitraum 1856-2002. Jeweils rechts: die durch die einzelnen Einflüsse erklärte Varianz. Dabei bedeuten: GES: Berücksichtigung aller Einflüsse, GHG: anthropogene Treibhausgase, NAT: alle natürlichen Einflüsse, SOL: solare Strahlungsschwankungen, SOI: El-Niño-Southern Oscillation, NAO: Nordatlantik-Oszillation, VUL: Vulkanismus.

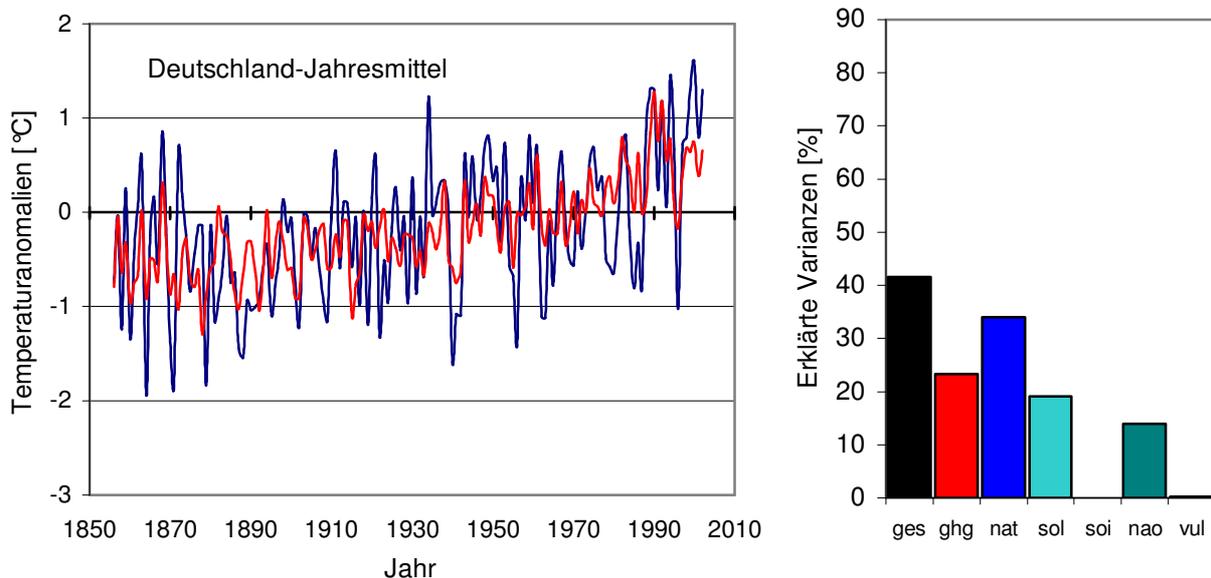


Abb. E2: Erklärte Anomalien (rot) und gemessene Anomalien (blau) des Jahresmittels der Temperatur des Deutschland-Mittels für den Zeitraum 1856-2002. Jeweils rechts: die durch die einzelnen Einflüsse erklärte Varianz (Abkürzungen: siehe Abb. D1).

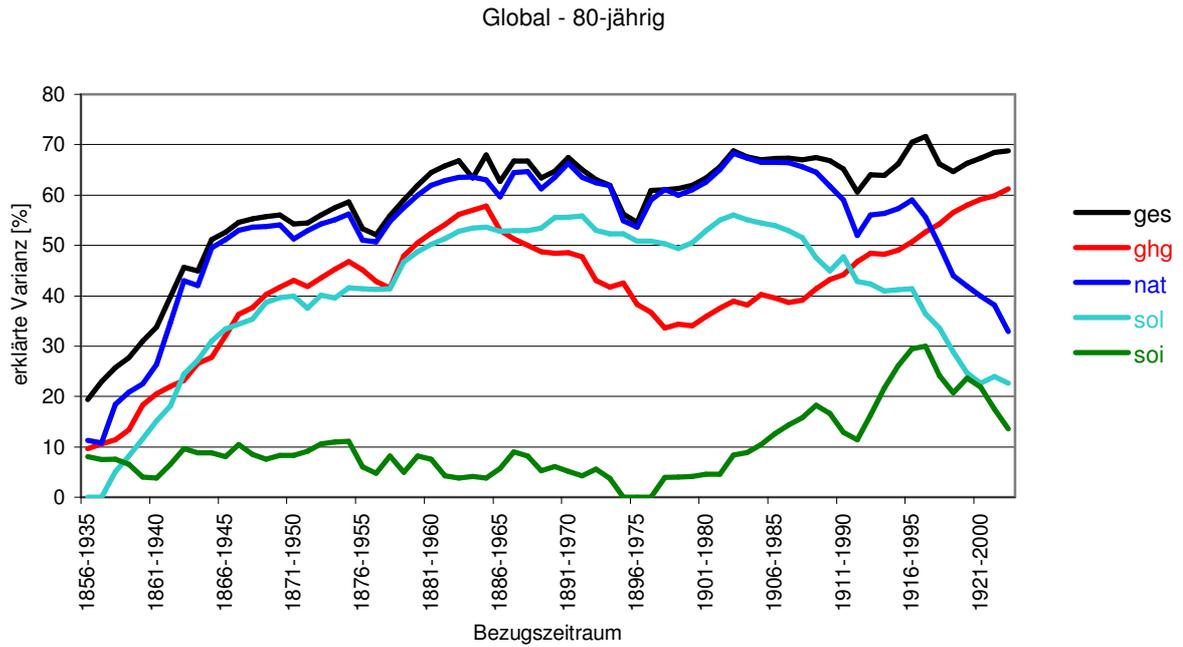


Abb. E3: Die durch die einzelnen Einflussklassen erklärten Varianzen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur bei 80-jährig zeitlich gleitendem Bezugszeitraum (Abkürzungen: siehe Abb. E1).

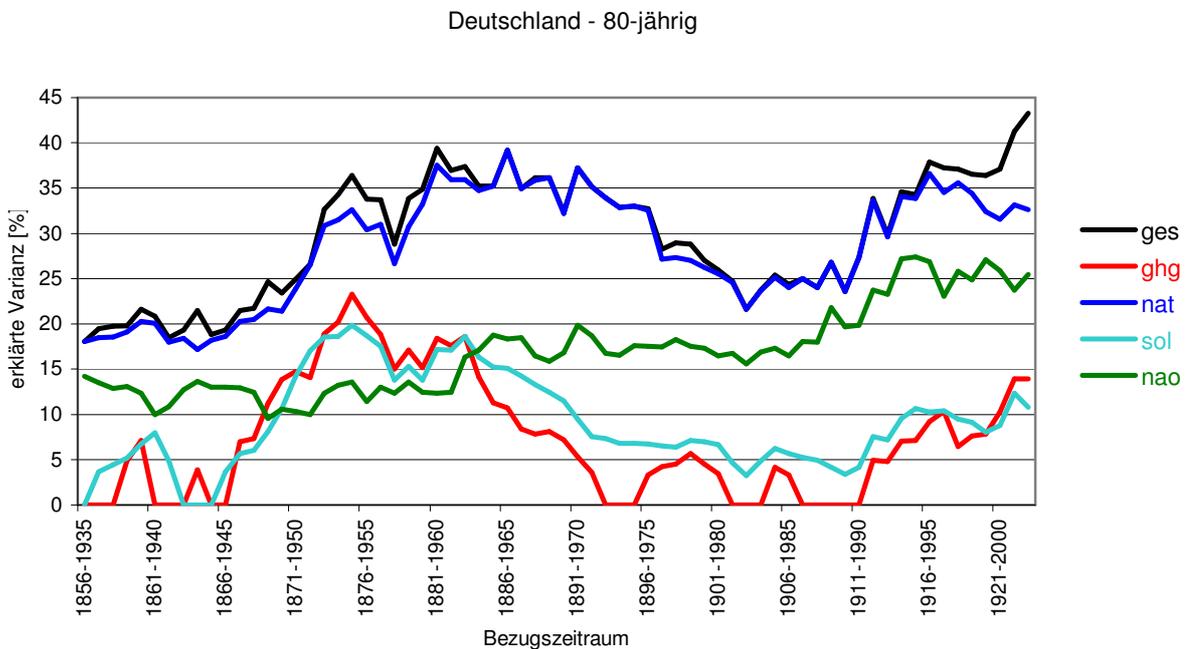


Abb. E4: Die durch die einzelnen Einflussklassen erklärten Varianzen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur bei 80-jährig zeitlich gleitendem Bezugszeitraum (Abkürzungen: siehe Abb. E1).

## Danksagung

Auf dem langen Weg bis zur Fertigstellung dieser Arbeit standen mir zahlreiche Personen mit Rat und Tat zur Seite.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr. C.-D. Schönwiese, der mir die Möglichkeit gegeben hat, dieses interessante Thema zu bearbeiten und mit seinen Anregungen sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Einen besonderen Dank richte ich an Herrn Dr. Tim Staeger, der bei Problemen und Fragestellungen immer zur Verfügung stand und mit seinen Kenntnissen auf den Gebieten der Regressionsanalyse und der FORTRAN-Programmierung eine wichtige Stütze beim Erstellen der Arbeit bildete.

Auch den weiteren Mitgliedern der Arbeitsgruppe sei an dieser Stelle für ihre vielfältige Unterstützung in den vergangenen Monaten gedankt.

Schließlich möchte ich ein spezielles Dankeschön an meine Familie richten, die mir in den Jahren meines Studiums immer unterstützend zur Seite stand.

Sven Brinckmann  
Graf-von-Galen-Straße 4  
64653 Lorsch

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplom-Arbeit mit dem Thema: „Anwendung der Schrittweisen Regression auf Temperatur-Zeitreihen zur Separierung anthropogener und natürlicher Einflüsse“ selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen als Hilfsmittel verwendet habe.

Lorsch, den 20.12. 2005