

**BERICHTE DES INSTITUTS FÜR ATMOSPHERE
UND UMWELT
DER UNIVERSITÄT FRANKFURT/MAIN**

Nr. 3

Christian-D. Schönwiese, Tim Staeger, Heiko Steiner
und Sven Brinckmann

**Analyse der Klimaveränderungen in Hessen
für den Zeitraum 1901 bis 2003**

Abschlussbericht zum INKLIM-Forschungsvorhaben
Nr. 2004.090353876-3 im Auftrag der Hessischen
Landesanstalt für Umwelt und Geologie (HLUG)

2006

Im Eigenverlag des Instituts
Postfach 11 19 32
60054 Frankfurt/Main

Dieses Projekt wurde im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen 2012 (INKLIM 2012), Baustein II, von der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie (HLUG), Auftrag-Nr. 2004.090353876-3 vom 5. August 2004, finanziell gefördert. Dafür sind der Projektleiter und alle beteiligten Mitarbeiter sehr dankbar. Der Abschlussbericht wurde im Juli 2005 vorgelegt und im Dezember 2005 zur Veröffentlichung freigegeben. In der hier vorliegenden Form sind die Abbildungen 3, 6 und 7 aktualisiert worden. Herr Dr. Tim Staeger hat die Berechnungen durchgeführt und wurde dabei von der studentischen Hilfskraft Heiko Steiner unterstützt. In das Kap. 6 sind einige Ergebnisse der Diplomarbeit von Herrn Sven Brinckmann integriert worden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1. Einführung	5
1.1 Hintergrund	5
1.2 Zielsetzung	8
2. Datenbasis	9
3. Trendanalyse	10
3.1 Temperaturtrends	10
3.2 Niederschlagtrends	22
4. Spektrale Varianzanalyse	29
5. Extremwertanalyse	32
5.1 Zeitintervall 1951-2000	32
5.2 Zeitintervall 1901-2003	45
6. Signalanalyse	52
7. Zukunftsperspektiven	56
Literatur	61
Anhang	63

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels und der Diskussion menschlicher Einflussnahme („anthropogener Treibhauseffekt“) ist anhand von Beobachtungsdaten der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags untersucht worden, welche Strukturen die Klimaveränderungen in Hessen erkennen lassen. Dabei umfasst das betrachtete Gebiet den Bereich 49°- 52° Nord / 7°-11° Ost und schließt somit auch Teilgebiete der angrenzenden Bundesländer mit ein. Zeitlich lag der Schwerpunkt der Betrachtung auf dem Intervall 1951-2000, da aus dieser Zeit bei weitem die meisten Daten verfügbar sind (Temperatur 53, Niederschlag 674 Stationen). Darüber hinaus wurden aber auch Untersuchungen für die Zeit 1901 bis 2000 bzw. 2003 sowie für 30-jährige Subintervalle durchgeführt. Die Analysemethodik umfasst die Berechnung linearer Trends, einschließlich ihrer räumlichen Strukturen (Trendkarten), Aufdeckung von Fluktuationen (spektrale Varianzanalyse), Extremwertanalysen und die Diskussion natürlicher bzw. anthropogener Einflussfaktoren (Signalanalyse mittels multipler schrittweiser Regression).

Die aus Tages-, Monats-, jahreszeitlichen und jährlichen Daten gewonnenen Ergebnisse sind überaus vielfältig und heterogen. Für das Flächenmittel Hessen ergibt sich 1951-2000 insgesamt (Jahresdaten) ein Temperaturanstieg von 0,9 °C mit dem Schwerpunkt im Winter (1,6 °C) und der geringsten Erwärmung im Herbst (0,2 °C). 1901-2003 liegen an den erfassten Stationen die jährlichen Erwärmungen bei 0,7 bis 1,8 °C; 30-jährig treten zum Teil auch Abkühlungen auf, insbesondere wenn die regional-jahreszeitlichen bzw. monatlichen Strukturen erfasst werden. Diese Strukturen sind beim Niederschlag noch weit ausgeprägter. Im Flächenmittel Hessen beträgt 1951-2000 der jährliche Niederschlagsanstieg 8,5 %, mit Maxima im Herbst (25 %) und Winter (22 %; Frühling 20%), während im Sommer ein Rückgang um 18 % eingetreten ist (mit Schwerpunkten im Juni und insbesondere August).

Bei den Fluktuationen dominieren mittlere Perioden von ca. 2,2, 3,3, 5,5 und 7,5-8 Jahren, beim Niederschlag auch ca. 4,5 Jahre. Der Sonnenfleckenzyklus spiegelt sich in den analysierten Klimadaten nicht wider. Zusammen mit den Extremwerten sorgen diese Fluktuationen für zeitliche Instabilitäten der Klimatrends, insbesondere wenn relativ kurze (z.B. 30-jährige) Zeitabschnitte betrachtet werden. Die wiederum sehr vielfältigen und unterschiedlichen Ergebnisse der Extremwertanalyse spiegeln bei der Temperatur weitgehend die Trends wider, da sich die Streuung der Daten kaum verändert hat: d.h. Zunahme der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem warmer Ereignisse (insbesondere Frühling, überwiegend auch Sommer und Winter, am wenigsten im Herbst) und Abnahme der Unterschreitungswahrscheinlichkeit extrem kalter Ereignisse (dies im Winter bei den Tagesdaten jedoch sehr uneinheitlich). Beim Niederschlag sind die Abnahme extrem feuchter Monate im Sommer und die Zunahme extrem feuchter Tage im Herbst und Winter am auffälligsten. Langfristig folgen daraus ganz markante Änderungen der Jährlichkeiten. So ist beispielsweise 1901-2001 in Alsfeld die Jährlichkeit eines extrem feuchten Winters von 100 auf 5,6 Jahre zurückgegangen, die entsprechende Jährlichkeit eines extrem feuchten Sommers in Bad Camberg dagegen fast bis zur Unmöglichkeit angestiegen. Bei der Ursachendiskussion lässt sich in den Temperaturdaten ein deutlicher anthropogener Einfluss („Treibhauseffekt“) ausfindig machen. Abschließend wird diskutiert, inwieweit es sinnvoll ist, die beobachteten Trends, im Vergleich mit Modellprojektionen, in die Zukunft zu extrapolieren.

1. Einführung

1.1 Hintergrund

Klimaveränderungen gehören zu den Problemkreisen, die nicht nur in der Wissenschaft, sondern neuerdings auch in der Öffentlichkeit großes Interesse finden, und dies im wesentlichen aus zwei Gründen:

- Die Menschheit (und mit ihr alles Leben auf der Erde) ist von der Gunst des Klimas abhängig. Daher können Klimaveränderungen zu ökologisch bzw. sozioökonomisch ungünstigen Auswirkungen führen. Jede Chance, sich rechtzeitig darauf einzustellen (Anpassungsstrategie), sollte genutzt werden.
- Die Menschheit ist mehr und mehr dazu übergegangen, das Klima auch selbst zu beeinflussen. Daraus erwächst uns eine besondere Verantwortung (Klimaschutz; Vorsorgestrategie).

Zwar gibt es Klimaveränderungen, seit die Erde existiert (siehe z.B. Schönwiese, 2003), zunächst aus rein natürlichen Gründen. In den letzten Jahrtausenden ist jedoch auch der Mensch zu einem zusätzlichen Klimafaktor geworden, und zwar durch die Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften, einschließlich Waldrodungen (neolithische Revolution); das ist deswegen ein klimarelevanter Vorgang, weil dadurch der Stoff- und Energiehaushalt Erdoberfläche-Atmosphäre verändert wird. Im Laufe des Industriezeitalters, d.h. in den letzten 200-100 Jahren, hat die anthropogene Klimabeeinflussung jedoch enorm an Intensität zugenommen und – zumindest was die Klimaeffekte betrifft – ein globales Ausmaß erreicht: Dabei steht mit Recht die zusätzliche Emission klimawirksamer Spurengase (CO_2 , CH_4 , N_2O , FCKW usw.), vor allem aufgrund der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas; einschließlich Verkehr) und weiterer Waldrodungen (jeweils primär CO_2 -Problem), aber auch durch landwirtschaftliche und industrielle Produktion, im Zentrum der Diskussion: anthropogener „Treibhauseffekt“ (IPCC, 2001; Schönwiese, 2003). Allerdings spielen auch die Sulfatpartikelbildung (aufgrund der SO_2 -Emission) und regionale Effekte wie das „Stadtklima“ eine Rolle.

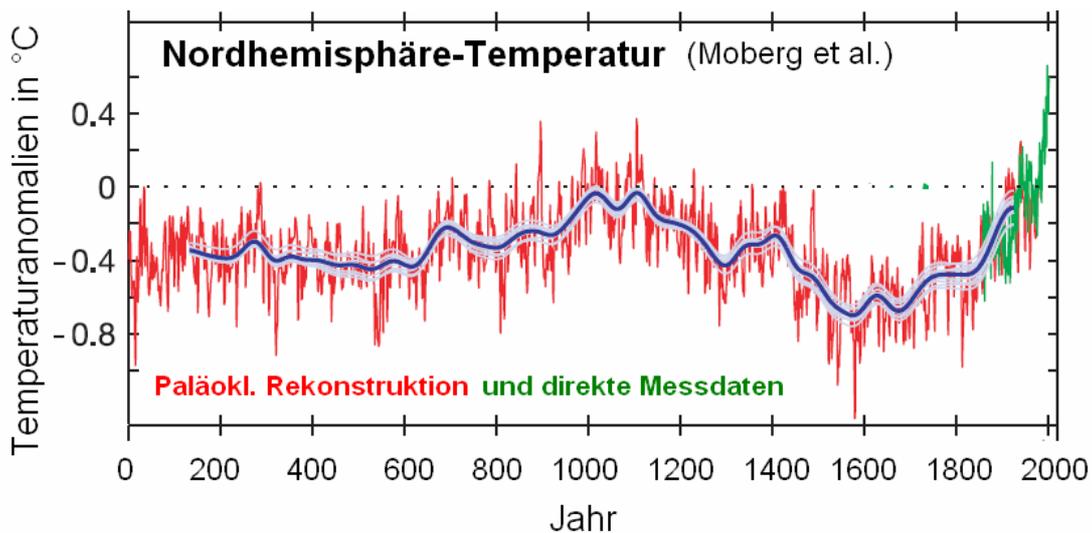


Abb. 1. Jahresanomalien 1-1979 der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur (Referenzintervall 1961-1990) aufgrund indirekter paläoklimatologischer Rekonstruktionen, rote Kurve, und entsprechender direkter Messungen 1856-1998, grüne Kurve; die blaue Kurve ist eine 80-jährige Glättung (Quelle: Moberg et al., 2005; verändert).

Es ist nun tatsächlich auffällig, dass nach der relativ warmen Klimaepoche des Spätmittelalters (mit Maxima um 1000 und 1100) und der darauf folgenden sog. „Kleinen Eiszeit“ ab etwa 1850 eine markante Erwärmung eingesetzt hat, wie sie in Abb. 1 für die nordhemisphärische Mitteltemperatur zu erkennen ist (frühere alternative Kurve, die auch die Unsicherheit der Rekonstruktion angibt, siehe IPCC, 2001). Mit Fokussierung auf die Zeit seit 1856, der Verfügbarkeit hinreichend vieler direkter Messdaten mit annähernd globaler Abdeckung, die in ihrer Verlässlichkeit und Genauigkeit den Paläodaten deutlich überlegen sind, zeigt Abb. 2 bis einschließlich 2004, dass diese Erwärmung nach 1907 eingesetzt hat, zwischen 1944 und 1976 unterbrochen war und danach sich gegenüber 1907-1944 leicht beschleunigt fortgesetzt hat. Der in diesen Daten enthaltene lineare Trend (1856-2000: 0,6 °C; 1901-2000: 0,7 °C) wird meist als Indiz für den „globalen Klimawandel“ angesehen, obwohl er – wie gesagt – zeitweise unterbrochen war und von diversen Fluktuationen und Anomalien (hier der Daten einzelner Jahre, z.B. relativ kalte Jahre 1956, 1976; relativ warme Jahre 1944, 1990 und das bisherige Maximum 1998) überlagert ist.

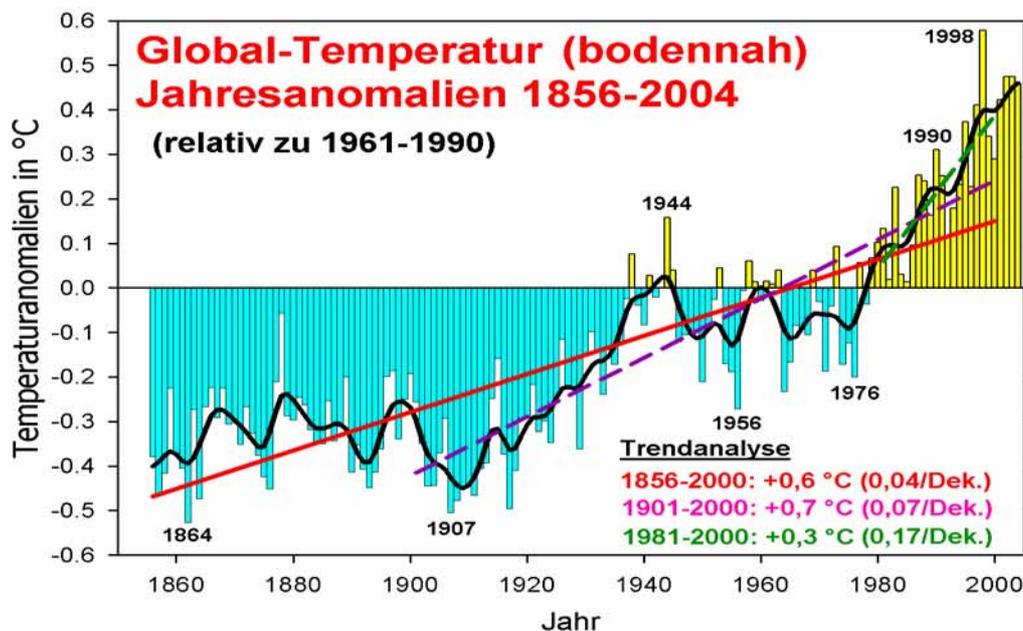


Abb. 2. Jahresanomalien 1856-2004 der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur (Referenzintervall 1961-1990), Säulen, 10-jährig geglättete Daten, schwarze Kurve, und lineare Trends für die angegebenen Zeitintervalle (Dek. = Dekade; Datenquelle: Jones, 1999, 2005; Analyse: Schönwiese).

Nach weitgehendem wissenschaftlichen Konsens, wie er sich in einer Vielzahl (physikalisch und somit ursächlich orientierter) Klimamodellrechnungen manifestiert, gilt der relativ langfristige Erwärmungstrend zumindest für die letzten Jahrzehnte als anthropogen dominiert (IPCC, 2001). Genauer gesagt: Seit ca. 1850 wird in etwa 1 °C Erwärmung dem anthropogenen „Treibhauseffekt“ zugeschrieben, die Differenz zum tatsächlich beobachteten geringeren Trend der (wiederum im globalen Mittel) kühlenden Sulfatpartikelwirkung und die überlagerten Fluktuationen/Anomalien (möglicherweise einschließlich relativ geringer Trendanteile) spiegeln die natürliche Klimavariabilität wider. Im Rahmen der Signalanalyse (Ursachendiskussion, Kap. 6), ist darauf zurückzukommen.

Doch ist im folgenden zunächst ein anderes Faktum wichtig: Bei näherer Betrachtung zeigt sich nämlich, dass es außer den zeitlichen auch sehr ausgeprägte räumliche Strukturen gibt, die zudem jahreszeitlich bzw. monatlich unterschiedlich sind. Als Beispiel ist in Abb. 3 eine globale Temperatur-Trendkarte 1901-2000 wiedergegeben, die offenbar auch regional begrenzte Abkühlungstrends enthält, dies jedoch nicht in der Region Deutschland. Allerdings sind solche Trends und somit auch Trendkarten zeitlich nicht stabil; d.h. je nach betrachtetem Zeitintervall sind die Trendstrukturen unterschiedlich, was zu weiteren Komplikationen führt.

Temperaturtrends 1901-2000 (Jahreswerte)

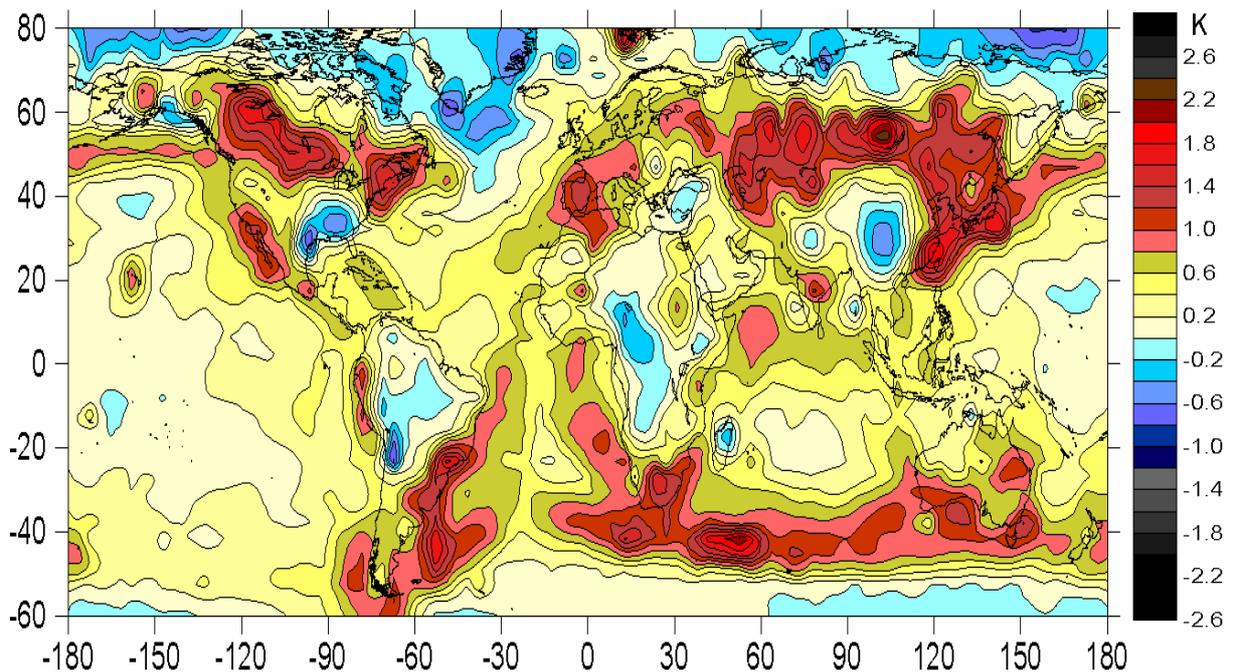


Abb. 3. Globalkarte beobachteter linearer Trends 1901-2000 der Jahreswerte der bodennahen Lufttemperatur in °C in einer 5° x 5° - Auflösung (Datenquelle: Jones et al., 2005; Analyse: Schönwiese).

Ohne auf solche globalen Aspekte hier weiter eingehen zu können, sollen zum Abschluss dieser Hintergrunddarstellung noch die in Deutschland beobachteten Trends der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags, jahreszeitlich aufgeschlüsselt und für verschiedene Zeitintervalle, zusammengestellt sein, siehe Tab. 1. Offenbar zeigt sich 1901-2000 eine in etwa in allen Jahreszeiten gleichmäßige Erwärmung um rund 1 °C, die sich in den letzten beiden Jahrzehnten (ähnlich wie im globalen Mittel) erheblich verstärkt hat, insbesondere im Winter; im Herbst ist sie dagegen zum Stillstand gekommen. Die Niederschlagstrends weisen überwiegend Zunahmen auf, die sich ebenfalls in den letzten Jahrzehnten am meisten im Winter verstärkt haben, während im Sommer, mit Ausnahme der letzten Jahrzehnte, ein leichter (1951-2000 jedoch erheblicher) Rückgang eingetreten ist. (Weitere Details derartiger Trendanalysen für Deutschland bzw. Europa siehe Rapp und Schönwiese, 1996; Schönwiese und Rapp, 1997; Rapp, 2000; Schönwiese, 2002, 2003; Schönwiese und Janoschitz, 2005.)

Tab. 1. Übersicht der beobachteten Klimatrends in °C, Flächenmittel Deutschland (Datenquelle: Rapp, 2000; DWD, 2002; Analyse: Rapp, 2000; Schönwiese, 2003, Schönwiese und Janoschitz, 2005). Frühling: März bis Mai; Sommer: Juni bis August; Herbst: September bis November; Winter: Dezember des Vorjahres, Januar und Februar. Bei der Temperatur sind Zunahmen rot und Abnahmen blau markiert, beim Niederschlag Zunahmen grün und Abnahmen violett (dies auch im folgenden).

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur , 1901 – 2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
1951 – 2000	+ 1,4 °C	+ 0,9 °C	+ 0,2 °C	+ 1,6 °C	+ 1,0 °C
1961 – 1990	+ 0,8 °C	+ 0,4 °C	0	+ 1,7 °C	+ 0,7 °C
1971 – 2000	+ 1,7 °C	+ 0,9 °C	+ 0,7 °C	+ 0,7 °C	+ 1,0 °C
1981 – 2000	+ 1,3 °C	+ 0,7 °C	- 0,1 °C	+ 2,3 °C	+ 1,1 °C
Niederschlag , 1901 – 2000	+ 13 %	- 3 %	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
1951 – 2000	+ 14 %	- 16 %	+ 18 %	+ 19 %	+ 6 %
1961 – 1990	- 9 %	- 8 %	+ 10 %	+ 20 %	+ 3 %
1971 – 2000	+ 13 %	+ 4 %	+ 14 %	+ 34 %	+ 16 %

Die Wahl der Zeitintervalle in Tab. 1 folgt zum Teil den internationalen (Weltmeteorologische Organisation, WMO, bzw. deren Vorläuferorganisation, Internationale Meteorologische Organisation, IMO) Festlegungen der „Klimanormalwerte“ (CLINOs = climate normals), die für die 30-jährigen Zeitintervalle 1931-1960 und neuerdings 1961-1990 angegeben werden sollen. Beim Vergleich der Trendwerte sollte auf ein einheitliches Zeitintervall umgerechnet werden, z.B. pro Dekade (10 Jahre; danach beträgt beispielsweise der jährliche Temperaturtrend 1901-2000 → 0,1 °C/Dekade; 1981-2000 → 0,55 °C/Dekade; vgl. auch Abb. 2). Auffällig ist sicherlich bereits hier, wie unterschiedlich selbst innerhalb einer relativ kleinen Region wie Deutschland die Trendwerte je nach Jahreszeit bzw. betrachtetem Zeitintervall sind. Entsprechende Hinweise zur Trendstabilität folgen in Kap. 3.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des „Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen 2012“ (INKLIM 2012) wurde nun eine Analyse der Beobachtungsdaten der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags für das 20. Jahrhundert durchgeführt. Dafür wurde die Region 49°-52° Nord / 7°-11° Ost ausgewählt (näheres siehe Kap. 2), die außer Hessen auch Teile der angrenzenden Bundesländer umfasst. Zeitlich lag der Schwerpunkt auf dem Intervall 1951-2000, aus dem bei weitem die meisten Daten verfügbar sind. Davon ausgehend wurden aber auch die längeren Datenreihen 1901-2000 untersucht sowie teilweise Ergänzungen bis zum Jahr 2003 vorgenommen.

Vor dem Hintergrund des globalen bzw. in Deutschland beobachteten Klimawandels (Kap. 1.1) dient das Projekt, über das hier berichtet wird, im einzelnen der Beantwortung folgender Fragen:

- Wie sehen die Trends der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags in Hessen aus, einschließlich der jahreszeitlichen bzw. monatlichen Besonderheiten? Gibt es dabei regional unterschiedliche Strukturen? Dazu werden lineare Trendanalysen durchgeführt und die Ergebnisse in Tabellen sowie einer Vielzahl von Trendkarten für unterschiedliche Zeitintervalle festgehalten (Kap. 3).
- Gibt es außer diesen Trends besondere Auffälligkeiten, insbesondere den Trends überlagerte Fluktuationen? Diese Frage wird anhand einer spektralen Varianzanalyse einiger ausgewählter langer Datenreihen beantwortet (Kap. 4).
- Sind die Trends bzw. andere Auffälligkeiten mit einem Wandel des Extremwertverhaltens verbunden? Dazu werden Ergebnisse vorgelegt, die mit Hilfe einer neu entwickelten Methodik gewonnen wurden. Diese Methode gestattet es, an den einzelnen Messstationen die zeitliche Entwicklung der Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit bestimmter Schwellenwerte bzw. der sog. Jährlichkeit von Extremereignissen anzugeben (Kap. 5).
- Gibt es Hinweise auf anthropogene Einflüsse? Diese sog. Signalanalyse, die versucht, in den Klimadaten und insbesondere Trends die anthropogenen Anteile (Signale) von den natürlichen zu trennen, wird sinnvollerweise vor allem global durchgeführt (IPCC, 2001; Grieser et al., 2000; Schönwiese, 2003). Trotzdem soll hier der Versuch unternommen werden, zumindest die Temperaturvariationen in Hessen auch dahingehend zu untersuchen (Kap. 6).
- Inwieweit ist es sinnvoll, beobachtete Klimatrends in die Zukunft zu extrapolieren? Diese Diskussion wird abschließend im Vergleich mit einem Parallelprojekt durchgeführt, das auf Szenarien- und Klimamodell-gestützten Zukunftsprojektionen beruht (und somit, im Gegensatz zu rein statistischen Trendanalysen, auch die Verursachung von Klimaänderungen explizit beinhaltet; Kap. 7).

Die insgesamt sehr umfangreichen und heterogenen Ergebnisse sind in diesem Bericht nur in einer Übersicht und daher nicht vollständig vorgestellt und diskutiert. Bezüglich weiterer Details sei daher auf die begleitenden CD-Informationen hingewiesen, insbesondere was die monatlichen Karten der Trend- und Extremwertanalyse betrifft.

2. Datenbasis

Schwerpunkt der Datenbasis sind Tageswerte der Temperatur und des Niederschlags 1951-2000 im Bereich 49°- 52° Nord / 7°- 11° Ost. Dieser Bereich umfasst ganz Hessen, aber auch Teile der angrenzenden Bundesländer, siehe Abb. 4. Erfasst werden dabei 53 Stationen, von denen die Tagesmittelwerte, täglichen Maxima sowie täglichen Minima der bodennahen Lufttemperatur vorliegen, sowie 674 Stationen mit täglichen Niederschlagssummen. Sofern Monats- bzw. jahreszeitliche bzw. Jahresdaten analysiert worden sind, gehen sie aus diesen Daten durch Mittelung (Temperatur) bzw. Summierung (Niederschlag) hervor.

Entsprechende Datenreihen, die den säkularen Zeitraum 1901-2000 umfassen, liegen leider nur in sehr viel geringerer Zahl und generell als Monatsdaten vor, siehe Abb. 5 und Anhang A.3 (vgl. auch Tab. 3 und 5). Dies sind aus dem oben genannten Bereich bei der Temperatur 4 Stationen (davon 3 Stationen in Hessen) und beim Niederschlag 10 Stationen (davon 6 Stationen in Hessen). Schließlich erfolgte noch eine Aktualisierung bis einschließlich 2003, die aber nicht flächendeckend, sondern derzeit nur für einzelne Stationen möglich war.

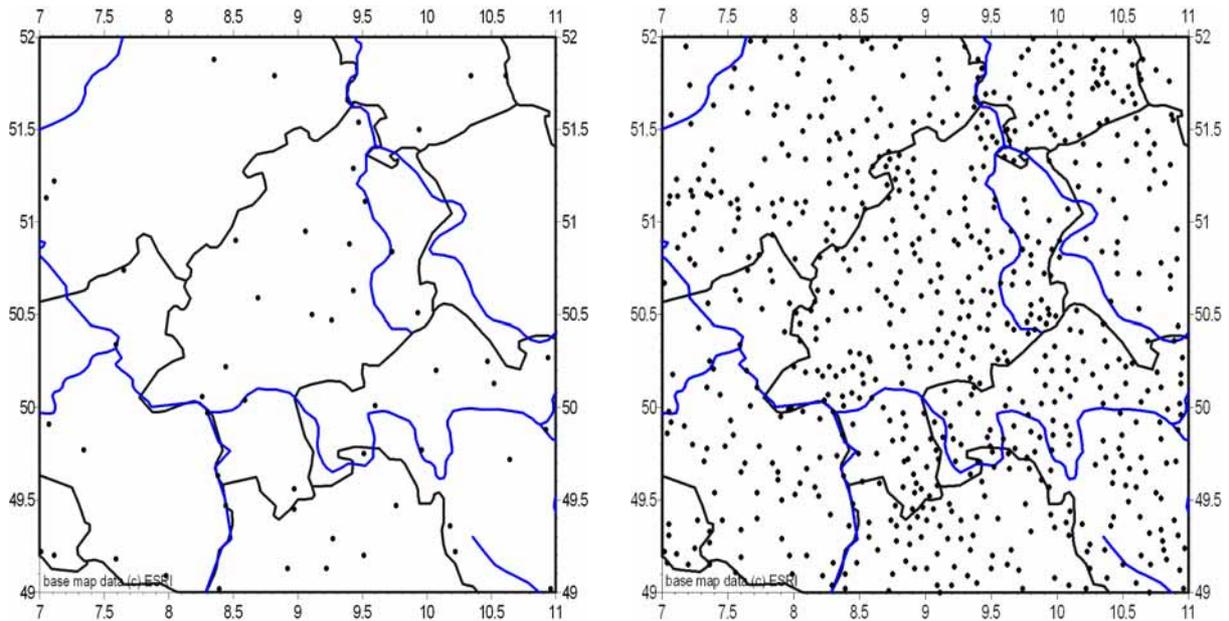


Abb. 4 (oben). Stationskarte der Daten 1951-2000, links Temperatur (53 Stationen), rechts Niederschlag (674 Stationen); Landesgrenzen schwarz, ausgewählte Flüsse blau).

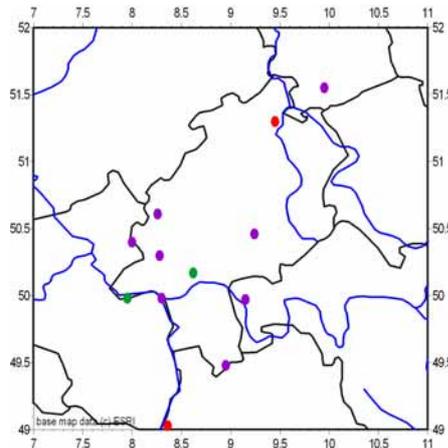


Abb. 5 (links). Stationskarte der Daten 1901-2000; rot Temperatur, violett Niederschlag, grün beides (vgl. dazu auch Anhang A.3).

3. Trendanalyse

3.1 Temperaturtrends

Als einführende Hintergrundinformation zur Trendanalyse ist in Abb. 6 die Zeitreihe der Jahreswerte 1826-2005 der bodennahen Lufttemperatur in Frankfurt/Main (Stadt) gezeigt. Sie weist eine wesentlich stärkere interannuäre (Jahr-zu-Jahr-) Variabilität als die Globaltemperatur (vgl. Abb. 2) auf (da räumliche Mittelung die Klimavarianz reduziert) und ist mit dieser nur mäßig korreliert ($r = 0,57$, entsprechend 33 % gemeinsamer Varianz). Doch ist der Erwärmungstrend 1901-2000 auch hier deutlich zu sehen, wobei der Trendwert mit $1,1\text{ °C}$ etwas höher als im globalen Mittel ($0,7\text{ °C}$), aber fast identisch mit dem des Flächenmittels Deutschland ($1,0\text{ °C}$; vgl. Tab. 1) ist. Für 1826-2005 beträgt er sogar $1,8\text{ °C}$, da die Erwärmung in Frankfurt bereits erheblich vor 1900 begonnen hat. Zudem handelt es sich offenbar, deutlicher als bei der Globaltemperatur, um einen linearen Trend. Eine Unterteilung in unterschiedliche Zeitabschnitte zeigt jedoch, dass sich dabei sehr unterschiedliche Trendwerte ergeben, mit einem (ähnlich der Globaltemperatur) sehr hohen Wert für 1981-2000: $1,5\text{ °C}$ (dies würde hypothetisch einem 100-jährigen Trend von $7,5\text{ °C}$ entsprechen).

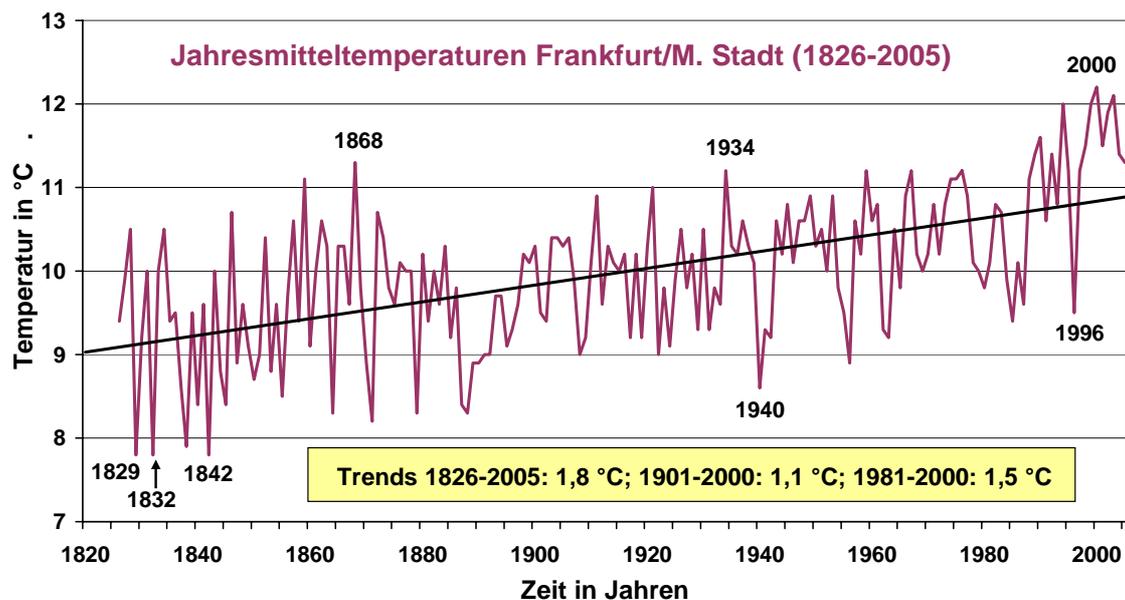


Abb. 6. Jahresmittelwerte 1826 - 2005 der bodennahen Lufttemperatur in Frankfurt/Main mit Angabe einiger relativer warmer bzw. kalter Jahre und Trendanalyse (vgl. dazu auch Tab. 3; Datenquellen: Ziegler und König, 1896; Mollwo, 1958; Giesel, 1988; Deutscher Wetterdienst; Brinckmann, 2005; Analyse: Schönwiese).

Es stellt sich somit das Problem der zeitlichen Trendstabilität bzw. -instabilität, das anhand des Beispiels der Frankfurter Temperaturreihe im folgenden näher diskutiert werden soll. Zu diesem Zweck sind in Abb. 7 und 8 die Sommer- und Winterdaten-Zeitreihen zusammengestellt. Im Vergleich zu den Jahreswerten (Abb. 6) ist, über jeweils das gesamte Zeitintervall gerechnet, der winterliche Erwärmungstrend deutlich höher und der sommerliche geringer, wobei schon optisch Fluktuationen auffallen (insbesondere im Sommer), von denen vermutet werden kann, dass sie sich auf die Berechnung der Trendwerte auswirken, und zwar umso mehr, je kürzer das dabei jeweils betrachtete Zeitintervall ist.

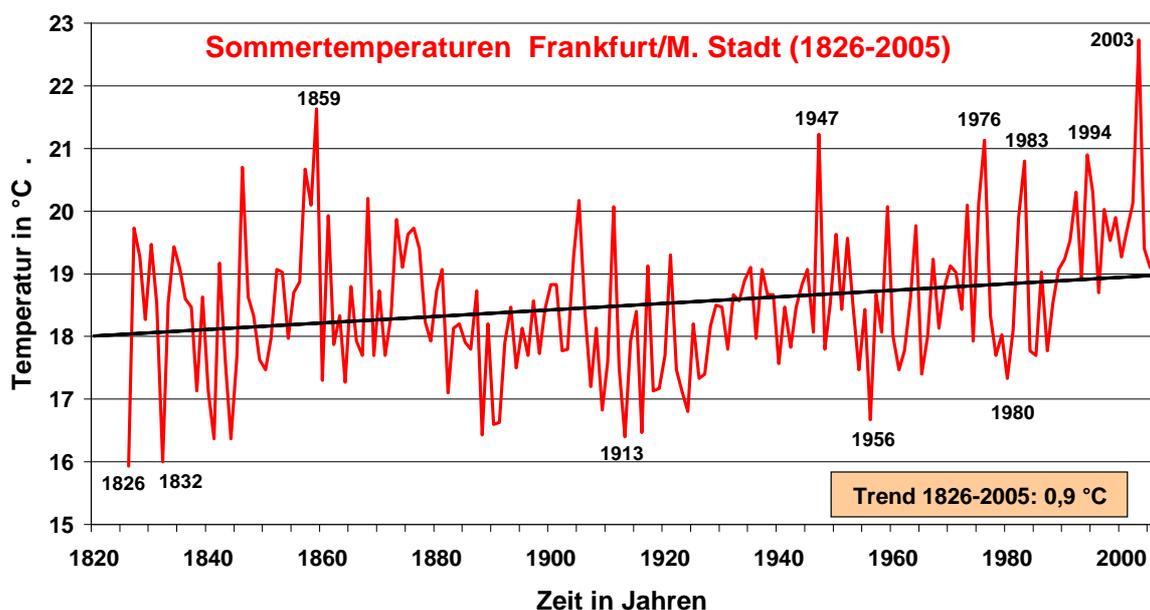


Abb. 7. Ähnlich Abb. 6, jedoch Sommer (Juni-August).

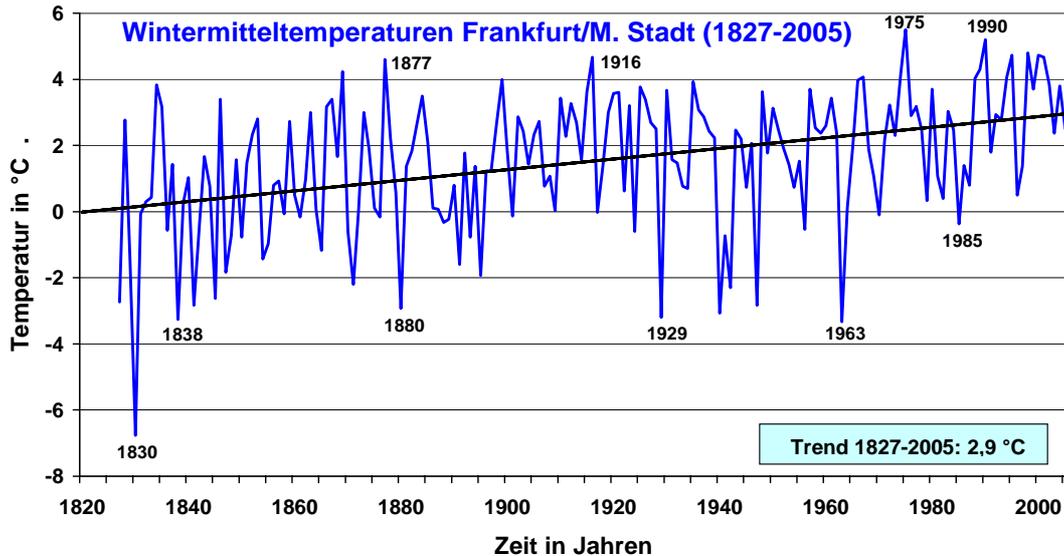


Abb. 8. Ähnlich Abb. 6, jedoch Winter (Dezember des Vorjahres bis Februar) 1827-2005.

Von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) werden 30-Jahre-Zeitintervalle für vergleichende statistische Klimadaten-Analysen empfohlen (sog. Klimanormalwerte, CLINOs, von engl. climate normals), und zwar derzeit 1961-1990, früher 1931-1960. Es liegt daher nahe, sich auch bei Trendberechnungen daran zu orientieren. Um zu einer Analyse der Trendstabilität/-instabilität zu kommen, wurden nun allerdings für die in Abb. 7 und 8 dargestellten Daten 30-jährige Trends schrittweise übergreifend berechnet, d.h. 1826-1855, 1827-1856, usw. bis 1974-2003, analog dazu zusätzlich 50- und 100-jährige Trends. Die Ergebnisse sind in Abb. 9a für die Sommerdaten (vgl. Abb. 7) und in Abb. 9b für die Winterdaten (vgl. Abb. 8) gezeigt.

Dabei stellt sich heraus, dass keiner dieser Trends zeitlich invariant ist, jedoch die 100-jährigen Trends am wenigsten fluktuieren. Sie zeigen im Sommer, siehe Abb. 9a, grüne Kurve, systematisch einen Übergang von einer Abkühlung (negative Trends) zu einer Erwärmung (positive Trends), die mit dem jüngsten Zeitintervall (1904-2003, siehe Intervallmitte 1953/54 auf der Abszisse) ihr Maximum erreicht (fast 2 °C). Die 50-jährigen Trends (rote Kurve) weisen dagegen eine deutliche, wenn auch relativ langfristige Fluktuation auf, um allerdings im letzten Zeitintervall einen ähnlich hohen Maximalwert zu erreichen. Dies gilt auch für die 30-jährigen Trends (blaue Kurve); doch treten dabei ausgeprägte Fluktuationen auf, so dass in diesem Fall die geringste Trendstabilität vorliegt. Daraus ist zu folgern, dass bei Trendberechnungen möglichst große Zeitintervalle bevorzugt werden sollten. Aufgrund der verfügbaren Datenbasis sind das hier zwar nur 50-jährige Trends, die aber teilweise, für einzelne Stationen, durch 100-jährige abgestützt werden.

Im Winter, siehe Abb. 9b, hat sich der 100-jährige Trend, ausgehend von relativ hohen Werten, in etwa ab der Intervallmitte 1900 (d.h. Trend 1851-1950 und spätere) annähernd bei Trendamplituden von rund 1 °C stabilisiert, während sowohl die 50- als wiederum verstärkt die 30-jährigen Trends stark variieren. Da die Winterdaten stärker streuen als die Sommerdaten, was bereits aus dem Vergleich von Abb. 7 mit 8 ersichtlich ist, aber in den unteren Teilen von Abb. 9a und 9b besonders deutlich wird, ist die Trendstabilität im Winter wesentlich geringer als im Sommer.

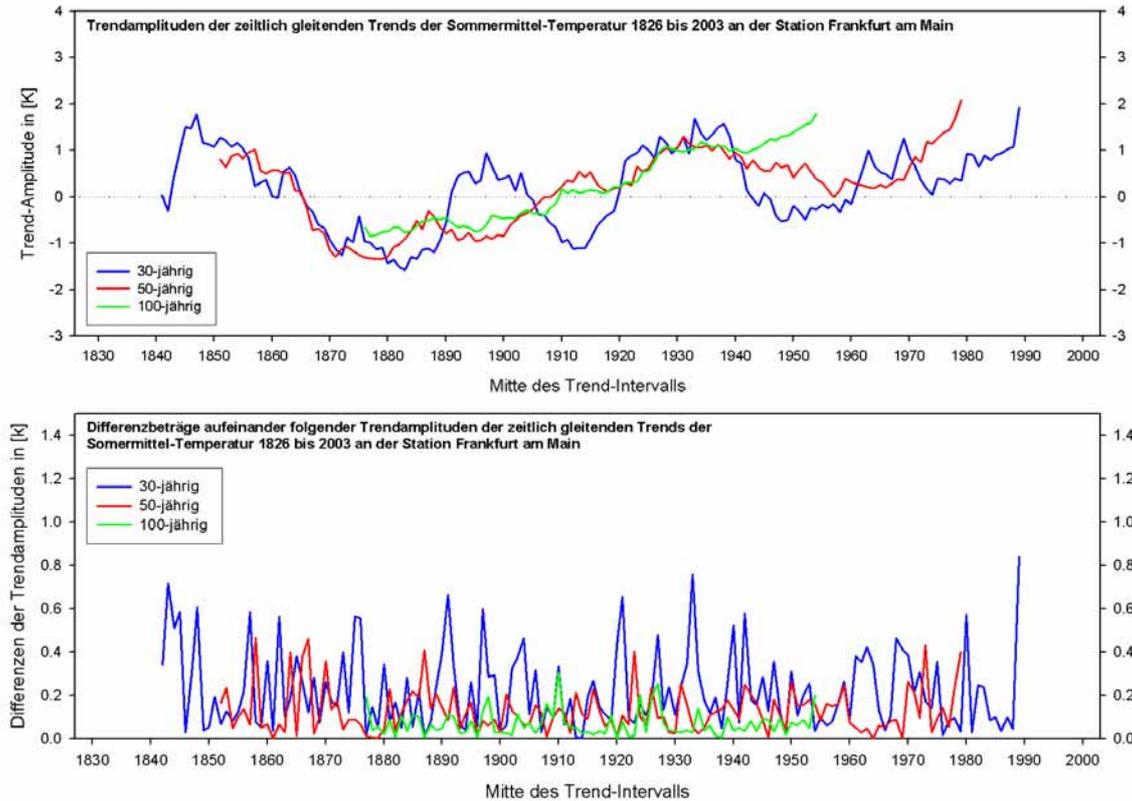


Abb. 9a. Oben: Trendamplituden (lineare Trendwerte), wie sie sich bei der zeitlich gleitenden Analyse (Zeitschritt 1 Jahr) bei den angegebenen Zeitintervall-Längen für die Sommertemperatur Frankfurt (vgl. Abb. 7) ergeben; unten: zugehörige Differenzbeträge der Trendamplituden von einem Zeitschritt zum nächsten (Analyse: Staeger).

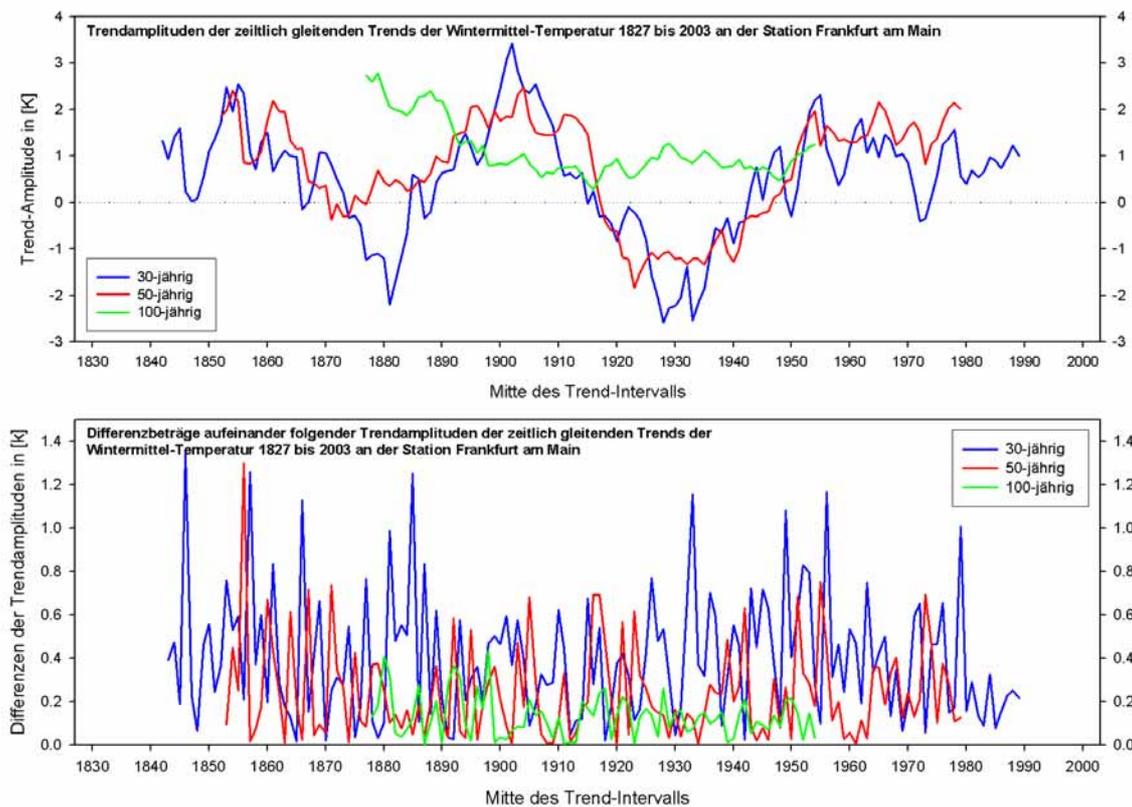


Abb. 9b. Ähnlich Abb. 9a, jedoch Winter.

Diese Betrachtungen sollen schließlich durch eine Analyse abgerundet werden, bei denen die Länge der Zeitintervalle (sog. Fensterbreite, in Abb. 9 → 30 bzw. 50 bzw. 100 Jahre) schrittweise um 1 Jahr verändert worden ist, beginnend mit 10 Jahren. Abb. 10 zeigt dazu die Mittelwerte der Differenzbeträge für alle 10-jährig übergreifenden Trends (d.h. 1826-1835, 1827-1836, usw. bis 1994-2003), 11-jährig usw. bis 100-jährig, im unteren Bildteil die zugehörigen Standardabweichungen, alles jeweils für Winter und Sommer). Danach nimmt die Trendstabilität mit der Fensterbreite systematisch zu, ohne dass sich irgendwo ein deutlicher Sprung ergeben würde. Ab grob 50 Jahren Fensterbreite ist das Ergebnis aber einigermaßen befriedigend, und dies wiederum im Sommer besser (rote Säulen) als im Winter (darüber hinausragende blaue Säulen). Andere Autoren (z.B. Rapp, 2000; Analyse der Deutschland-Mitteltemperatur) kommen mit Hilfe anderer Methoden zu durchaus ähnlichen Ergebnissen.

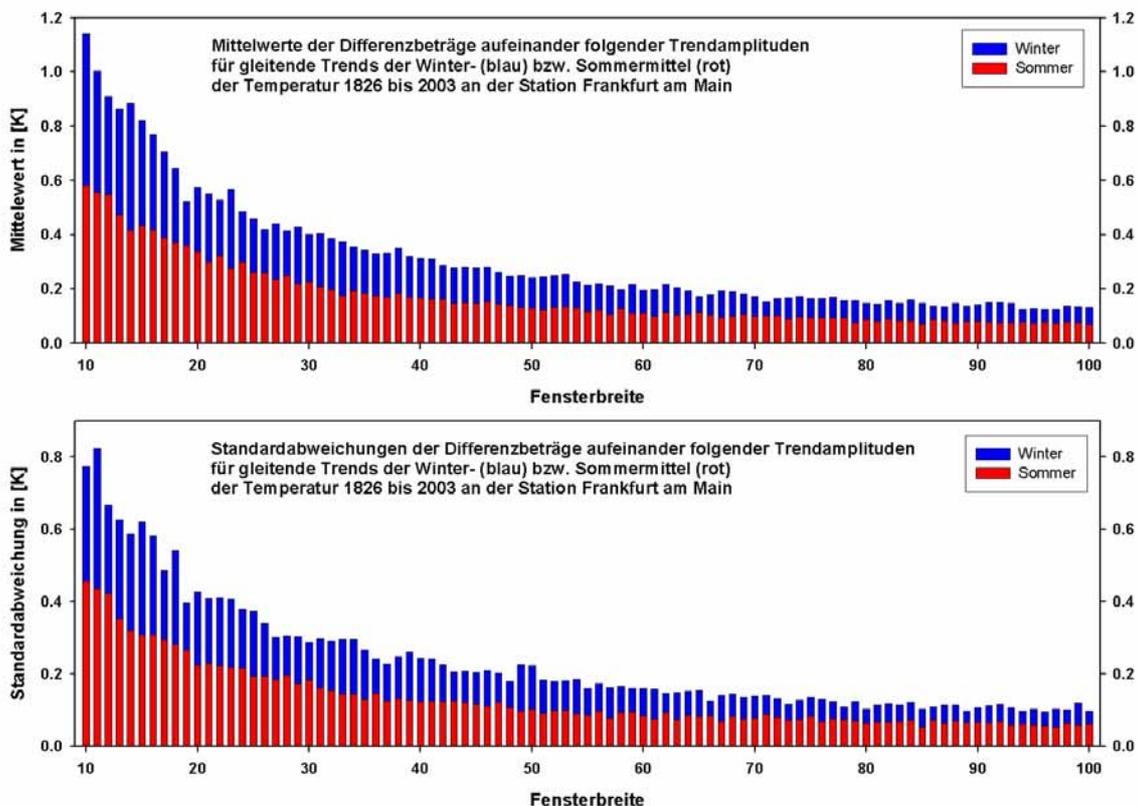


Abb. 10. Oben: Mittelwerte der Differenzbeträge der übergreifenden Trends bei von 10 bis 100 Jahre variierender Fensterbreite; unten: entsprechende Standardabweichungen (Analyse: Staeger).

Bleibt anzumerken, dass Trends nicht nur aufgrund von Fluktuationen der zugrunde liegenden Daten variieren, sondern auch sehr empfindlich auf relative Extremwerte reagieren, die in der Nähe des Beginns bzw. Endes des jeweils verwendeten Zeitintervalls liegen, dies wiederum umso stärker, je kleiner die Fensterbreite ist. Diese Empfindlichkeit erklärt sich aus der Methode der kleinsten Quadrate, auf der lineare Trendberechnungen beruhen: Die Gleichung der Trendgeraden wird so bestimmt, dass die quadratischen Abweichungen der Einzelwerte davon ein Minimum annehmen. Aus diesem Grund besitzen für verschiedene Jahreszeiten bzw. Monate errechnete Trends auch keine Additivitätseigenschaft; d.h. der Jahrestrend ist nicht der arithmetische Mittelwert der Jahreszeitentrends (mit dem

zusätzlichen Effekt, dass in den Wintertrend jeweils der Dezember des Vorjahres eingeht) bzw. nicht der arithmetische Mittelwert der monatlichen Trends.

Wie die bisherigen Zeitreihen-Beispiele (Abb. 2, 6, 7, 8) zeigen, sind Klimatrends relativ häufig linear. Obwohl zum Teil auch nicht-lineare Trends den Daten besser gerecht werden, wäre es problematisch, bei flächenbezogenen Analysen lineare mit nicht-linearen Trends zu vergleichen. Aus diesem Grund werden im folgenden ausschließlich lineare Trends betrachtet. Bei den Einzelreihen (Stationen) ist die Signifikanz der Trends mit Hilfe des weithin gebräuchlichen Mann-Kendall-Trendtest (siehe z.B. Rapp und Schönwiese, 1996; Schönwiese und Rapp, 1997; Rapp, 2000), geprüft worden. Allerdings ist dabei hier nur vermerkt, ob die 90%-Signifikanzgrenze überschritten wird. Ist dies nicht der Fall, existiert der Trend trotzdem, wird aber von Fluktuationen bzw. Anomalien relativ stark überlagert. Hinsichtlich der bei Klimazeitreihen stets auftretenden Homogenitäts- und Repräsentanzprobleme sei ebenfalls auf die oben angegebene Literatur verwiesen.

Nun soll der Schritt zur Betrachtung des Flächenmittels Hessen (einschließlich angrenzender Regionen, vgl. Abb. 4) erfolgen. Dazu bringt Tab. 2 zunächst einen Überblick, nämlich die Jahreszeiten- und den Jahrestrend der Temperatur. Eine entsprechende Übersicht für die Monatswerte ist im Anhang A.1 enthalten. Daran schließt sich eine Langzeitbetrachtung für ausgewählte Stationen an. Schließlich erfolgt in Auswahl die Diskussion der umfangreichen Befunde zu den regionalen Strukturen der Temperaturänderungen in Hessen. Die Niederschlagstrends werden in Kap. 3.2 vorgestellt und diskutiert.

Tab. 2. Lineare Temperaturtrends in °C, Hessen (Flächenmittel 49°-52° N / 7°-11° O).

Temperaturtrends, °C	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Mittelwerte					
1951-2000	1,1	1,0	0,2	1,6	0,9
1951-1980	-0,4	0	-0,2	1,2	0,03
1961-1990	0,6	0,6	0,1	1,4	0,1
1971-2000	1,6	0,9	0,8	0,7	1,0
Minimumwerte					
1951-2000	1,5	1,0	0,7	1,7	1,2
1951-1980	0,4	0,2	0,2	1,5	0,5
1961-1990	0,6	0,9	0,5	1,6	0,9
1971-2000	1,6	0,8	1,1	0,5	1,0
Maximumwerte					
1951-2000	0,9	1,2	-0,1	1,7	0,9
1951-1980	-1,0	-0,1	-0,5	1,0	-0,2
1961-1990	0,6	0,3	-0,3	1,5	0,5
1971-2000	1,8	1,1	0,5	1,0	1,1

Bei den Temperaturtrends der jährlichen Mittelwerte (Tab. 2, rechte Spalte, oben) ist zuerst festzuhalten, dass der Erwärmung in der Zeitspanne 1951-2000 ca. 0,9 °C beträgt, was fast genau dem Deutschlandtrend (1,0 °C; vgl. Tab. 1) entspricht. Je nach Zeit-Subintervall sind die Trendwerte aber sehr unterschiedlich, 1951-1980 sowie 1961-1990 fast Null und maximal 1971-2000: ca. 1,0 °C (1981-2000 wahrscheinlich sogar noch erheblich höher, vgl. Abb. 6; derartig kurze Zeitintervalle

sollen aber aus den oben diskutierten Gründen im weiteren nicht betrachtet werden). Dabei sind zumeist die Minimumwerte stärker angestiegen als die Maximumwerte (Ausnahme: 1971-2000); 1951-1980 weisen die Maximumwerte sogar einen, wenn auch schwachen, negativen Trend auf.

Das gilt, wieder mit der Ausnahme 1971-2000 (Frühling, Sommer, Winter), überwiegend auch für die jahreszeitlichen Daten, wobei die höchsten ansteigenden Trends der Zeitspanne 1951-2000 in der Winter-Minimum- und -Maximumtemperatur (jeweils 1,7 °C) und der Frühling-Minimumtemperatur (1,5 °C) auftreten. Die Trends der jahreszeitlichen Mittelwerte 1951-2000 zeigen ihr Maximum im Winter (1,6 °C) und ihr Minimum im Herbst (0,2 °C). Bei den 30-jährigen Zeitspannen fällt besonders 1951-1980 mit einigen abnehmenden Trends bei der Mittel- und Maximumtemperatur auf (ausgenommen Winter), was sich auch auf den Jahrestrend auswirkt. Wie bereits diskutiert, sollten bei der Interpretation die 30-jährigen Trendwerte aber nicht zu stark beachtet, sondern die 50-jährigen (1951-2000) bzw. noch längere bevorzugt werden.

Die Trends 1951-2000 der monatlichen Temperaturmittel, siehe Anhang A.1, zeigen ihr Maximum im August (1,9 °C), gefolgt von Januar, Februar (jeweils 1,7 °C), März (1,6 °C) und Mai (1,4°C). Allein im November wurde ein abnehmender Trend festgestellt, der jedoch äußerst gering ist (-0,1 °C); ebenso gering ist der ansteigende Trend im Juni. Das bedeutet, dass die sommerliche Erwärmung einen deutlichen Schwerpunkt im August aufweist, während der Juni fast gar nicht dazu beiträgt; der Juli liegt dabei in etwa in der Mitte. Die winterliche Erwärmung zeigt ihren Schwerpunkt im Januar und Februar; aber auch die Dezember-Erwärmung ist bedeutend. Die herbstlichen Monate zeigen relativ einheitliche Trends nahe dem Null-Wert und im Frühling tragen fast nur März und Mai zur Erwärmung bei.

Bei den Extremwerten, d.h. den Maxima und Minima, wiederum 1951-2000, treten zumeist, aber keinesfalls generell die höheren Trends bei den Minima auf. Spitzenreiter ist der Minimum-Trend im März (2,4 °C), gefolgt von Januar und Februar (jeweils 1,8 °C), Mai (1,6 °) sowie August (1,4 °C). Bei den Maxima ist wiederum der August besonders auffällig, und zwar mit dem sehr hohen Trend von 2,5 °C; ähnlich hohe Werte treten noch im Januar und Februar auf. Die im Anhang A.1 ebenfalls angegebenen 30-jährigen Trends sollen nicht näher diskutiert werden; sie sind im jüngsten Zeitintervall (1971-2000) häufig maximal und 1951-1980 bei den Maximumwerten überwiegend negativ.

Wie bereits erwähnt, stehen für die längere Zeitspanne 1901-2000 bzw. 1901-2003 nur die Daten weniger Stationen zur Verfügung. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, dafür flächenbezogene Analysen durchzuführen. Daher werden die Ergebnisse lediglich in Tabellenform wiedergegeben, und zwar für die Temperatur in Tab. 3; die entsprechende Tabelle für die Monatswerte findet sich im Anhang A.4. Wegen der guten Repräsentanzeigenschaften der Temperatur kann der Vergleich Frankfurt-Geisenheim einen Anhalt für den Stadteinfluss (städtische Wärmeinsel) liefern. Kassel mag für eine nordhessische Station repräsentativ sein, die bereits in Baden-Württemberg liegende Station Karlsruhe für den äußersten Süden Hessens (allerdings mit Verdacht auf einen besonders starken Stadteffekt). Die Trends 1901-2000 bzw. bis 2003 liegen jährlich bei ca. 0,7 bis 1,4 °C Erwärmung (einschließlich Karlsruhe bis 1,8 °C), wobei jahreszeitlich gesehen – im Gegensatz zum Zeitintervall 1951-2000 (vgl. dazu auch Tab. 2) – eher der Sommer als der Winter dominiert. Dies gilt auch für den jüngsten 30-jährigen Zeitabschnitt (1974-2003), wo der

Erwärmungstrend im Sommer und Frühling deutlich größer ist als im Winter und Herbst. Abkühlungstrends treten nur ganz vereinzelt in Erscheinung (Kassel).

Tab. 3. Lineare Temperaturrends in °C, Stationen (Hessen, ergänzt durch Karlsruhe), Langzeitanalyse und Subintervalle; Fettdruck bedeutet Signifikanz > 90%.

Station	Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Frankfurt/M.	1901-2000	1,0	1,5	1,2	1,0	1,1
Geisenheim		0,5	0,9	1,0	0,6	0,8
Kassel		0,6	1,2	0,7	0,2	0,7
Karlsruhe		1,6	1,9	1,7	1,1	1,6
Frankfurt/M.	1901-2003	1,2	1,8	1,3	1,2	1,4
Geisenheim		0,6	1,2	1,0	0,8	0,9
Kassel		0,6	1,4	0,7	0,3	0,7
Karlsruhe		1,8	2,3	1,8	1,3	1,8
Frankfurt/M.	1951-2000	1,1	1,4	0,5	1,8	1,2
Geisenheim		0,8	1,1	0,3	1,4	0,9
Kassel		0,5	0,2	-0,6	0,6	0,2
Karlsruhe		1,3	1,6	0,8	1,8	1,4
Frankfurt/M.	1971-2000	1,5	0,9	0,8	0,7	1,0
Geisenheim		1,4	0,8	0,8	0,7	0,9
Kassel		0,9	-0,1	-0,1	-0,2	0,1
Karlsruhe		1,8	1,5	1,1	1,3	1,4
Frankfurt/M.	1974-2003	1,9	1,9	0,9	1,0	1,4
Geisenheim		1,4	1,7	0,7	0,8	1,1
Kassel		1,2	1,0	-0,2	0,1	0,5
Karlsruhe		2,0	2,3	0,7	1,0	1,5

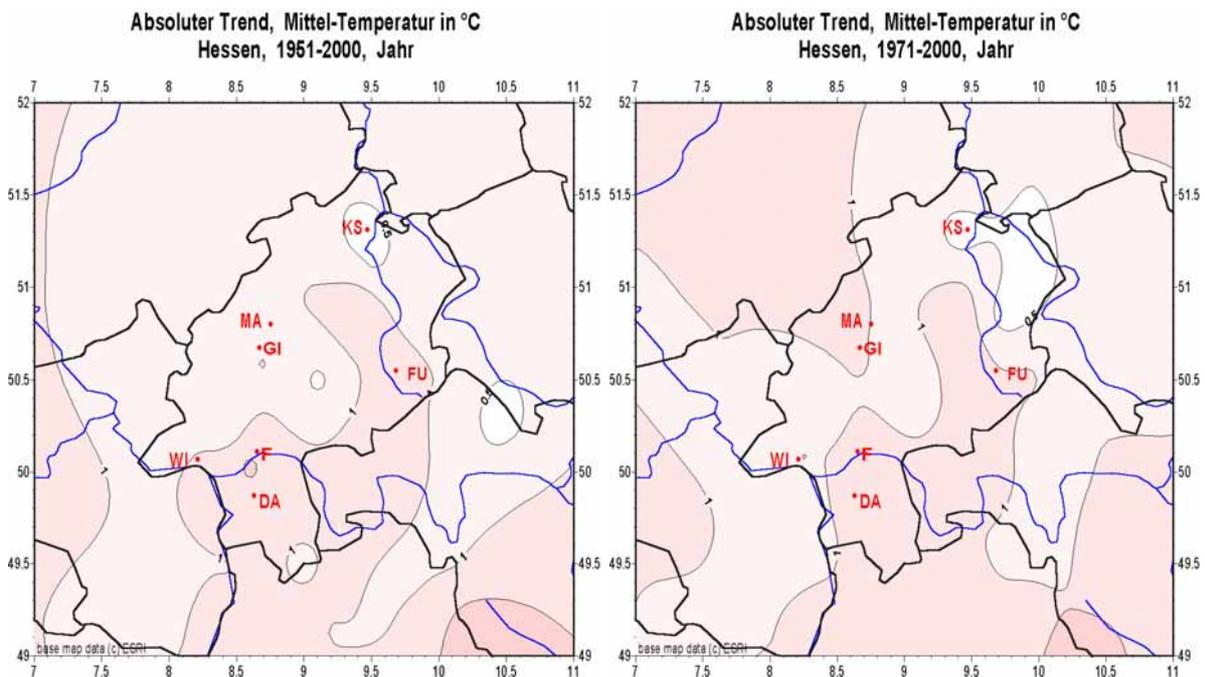


Abb. 11. Räumliche Strukturen der Temperaturrends in °C, Hessen, Jahresmittelwerte 1951-2000 (links) im Vergleich mit 1971-2000 (rechts); weiß/rötlich Zunahme, bläulich Abnahme (hier nicht vorkommend), Isolinienbeschriftung im Abstand 0,5 °C.

Nun zu den räumlichen Strukturen der Temperaturänderungen in Hessen. Für die Zeit ab 1951 liegen genügend Daten vor (vgl. Abb. 4), um diese Strukturen außer in Tabellenform auch mittels Isolinien in Kartenform anschaulich zu machen. Daher wurden für die in Tab. 2 ersichtlichen Zeitintervalle solche Karten für die Jahres-, Jahreszeiten- und Monatsdaten erstellt, und zwar jeweils für die Mittel-, Maximum- und Minimumwerte. Nur ein Teil dieser Ergebnisse kann hier besprochen werden. Die begleitende CD enthält jedoch die vollständigen Kartensätze.

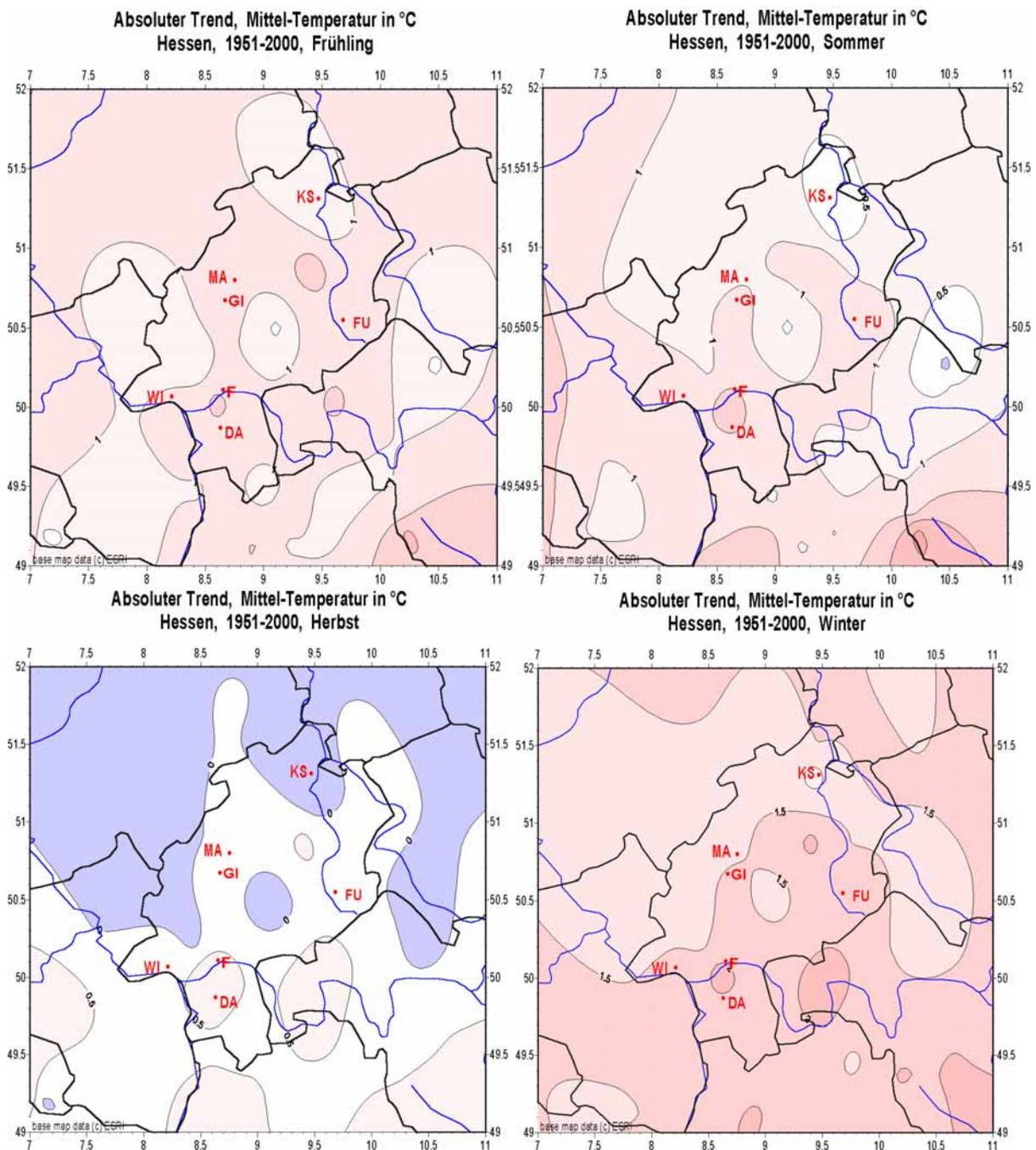


Abb. 12. Räumliche Strukturen der Temperaturtrends in °C, Hessen, 1951-2000, Jahreszeiten (Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 11).

Begonnen werden soll mit den Jahresdaten der Mitteltemperatur. Die entsprechenden Trendkarten sind in Abb. 11 für die Zeitspannen 1951-2000 und 1971-2000 verglichen. Es zeigt sich, dass diese Strukturen und somit die räumlichen Unterschiede nicht allzu ausgeprägt sind, obwohl sich dabei Wertespanssen von unter 0,5 °C bis über 1,5 °C ergeben. Tendenziell liegen die Maxima im Süden, die Minima im Nordosten. Deutlicher sind die jahreszeitlichen Unterschiede, die in Abb. 12 für den einheitlichen Zeitraum 1951-2000 zu sehen sind. Dabei fällt der Herbst mit Abkühlungen in einigen nördlichen und westlichen Landesteilen aus dem Rahmen. Relativ am einheitlichsten stellt sich der Winter dar, mit Erwärmungen von mehr als ca. 1,5 °C in etwa südlich einer Linie Wiesbaden-Marburg-Fulda, nördlich davon darunter (Minimum mit ca. 1 °C wiederum in der Region Kassel, Maximum mit ca. 2 °C in der Region Frankfurt-Darmstadt).

Als Beispiele für die Trends der Extremwerte sind in Abb. 13 die Trendstrukturen des Maximums im Sommer und Minimums im Winter ausgewählt. Dabei treten keine gravierenden Unterschiede gegenüber Abb. 12 auf; es sind lediglich im Sommer die Gebiete mit >1,5 °C und im Winter mit > 2 °C etwas ausgedehnter.

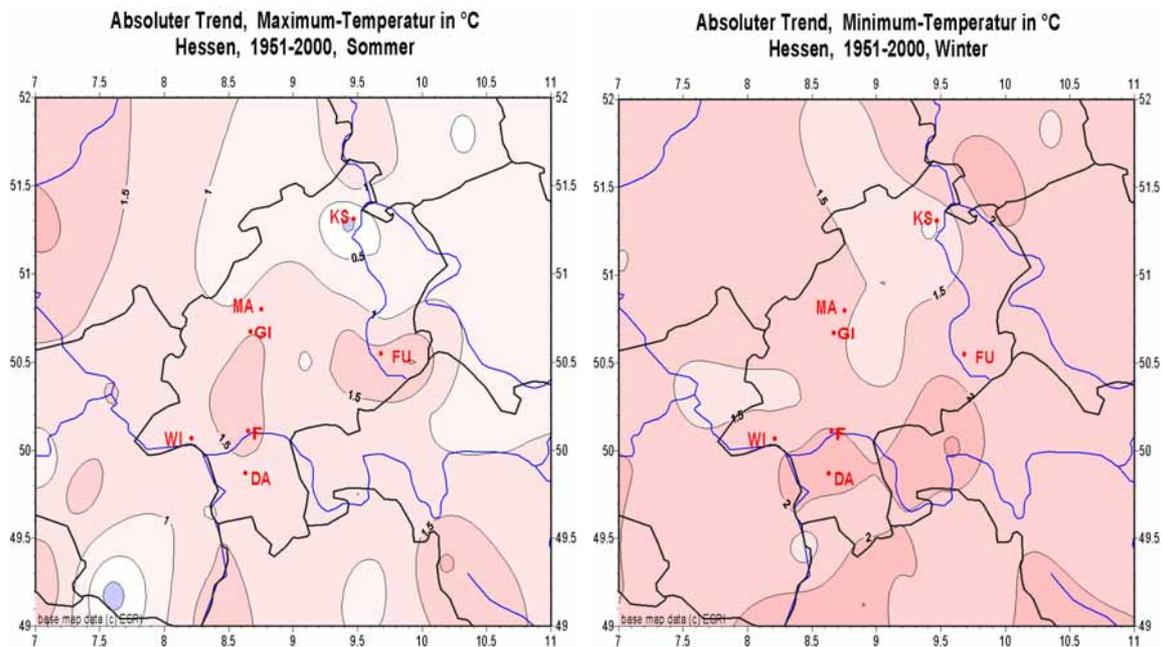


Abb. 13. Ähnlich Abb. 12, jedoch Sommer-Maximumwerte (links) und Winter-Minimumwerte (rechts).

Zum Abschluss der Temperatur-Trendbetrachtungen soll nun noch ein Blick auf die einzelnen Monate geworfen werden, siehe Abb. 14. Ausgewählt ist das Intervall 1951-2000 (hinsichtlich der in Tab. 2 aufgeführten weiteren Zeitintervalle siehe CD). Entsprechend Tab. A.1 (Anhang) treten dabei Monate in Erscheinung, in denen überall in Hessen Erwärmungstrends festzustellen sind: Januar-März, Mai, Juli, August (in diesem Fall besonders starke Erwärmungen, und zwar vor allem im Süden von Hessen) und Dezember. Im April und September gibt es ein Nebeneinander von leichten Erwärmungen und Abkühlungen. Juni und Oktober sind zweigeteilt mit Erwärmungen in südlichen und Abkühlungen in den nördlichen bzw. auch nordwestlichen Landesteilen und allein im November gibt es ausgedehnte Abkühlungen im Norden, Nordwesten und Nordosten.

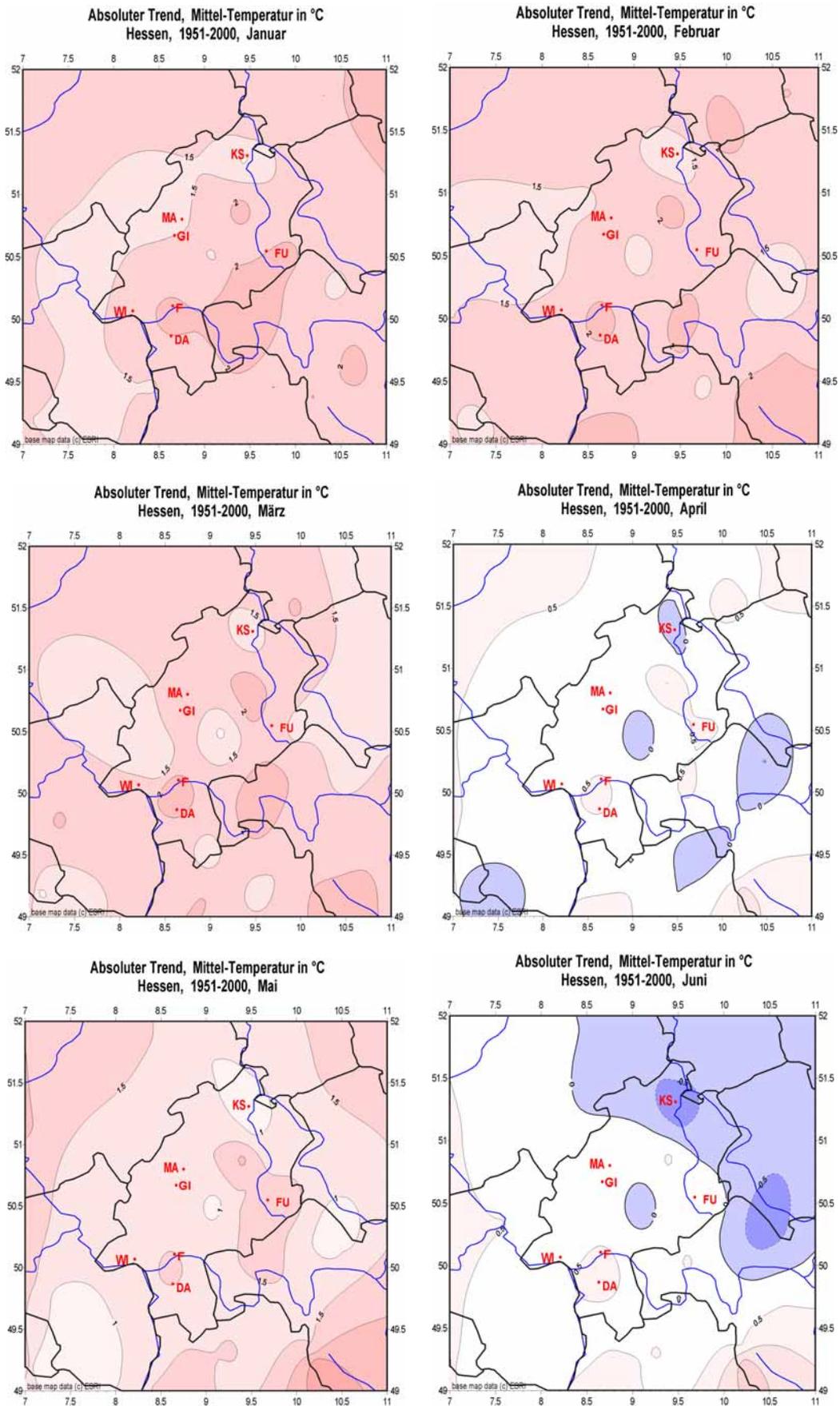


Abb. 14a. Räumliche Strukturen der Temperaturtrends in °C, Hessen, 1951-2000, Monatswerte Januar - Juni (Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 11).

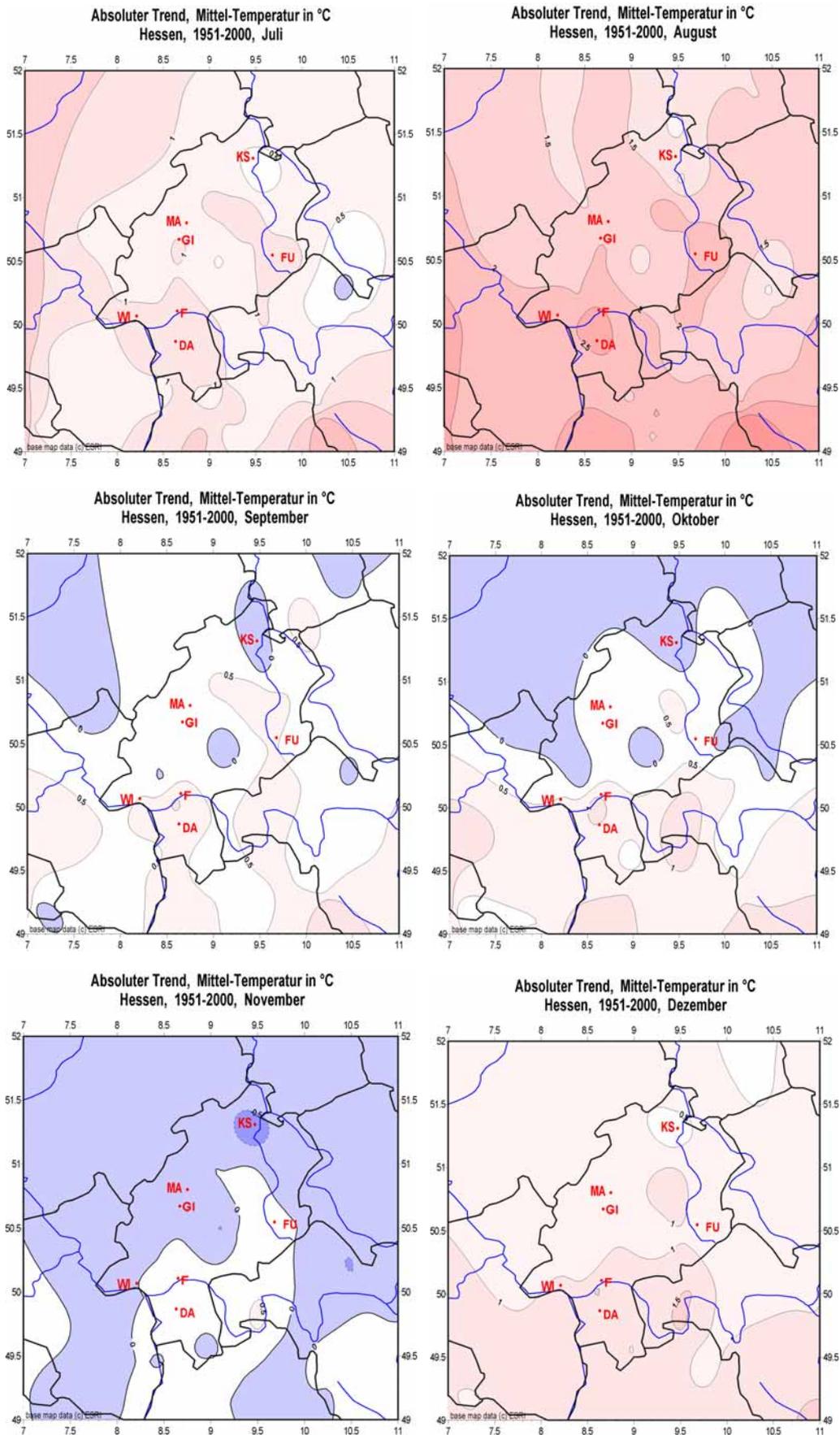


Abb. 14b. Räumliche Strukturen der Temperaturtrends in °C, Hessen, 1951-2000, Monatswerte Juli - Dezember (Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 11).

Als Beispiele für die Trends von Extremwerten sollen hier lediglich die Minima im Juni und die Maxima im August ausgewählt werden; siehe Abb. 15. (Im Januar und Februar sind im Flächenmittel, vgl. Tab. A.1 im Anhang, die Trends der Mittelwerte, Minima und Maxima fast identisch; weitere Extremwert-Trendkarten siehe CD.) Der Vergleich mit den Mittelwerttrends (Abb. 14) zeigt nun, dass im Juni bis auf die Region Kassel die negativen Trends durch positive ersetzt bzw. die positiven etwas größer sind. Im August, der sowieso schon mit besonders hohen Mittelwert-Trends auffällt, sind die Trends der Maxima mit Werten bis über 3 °C noch verstärkt.

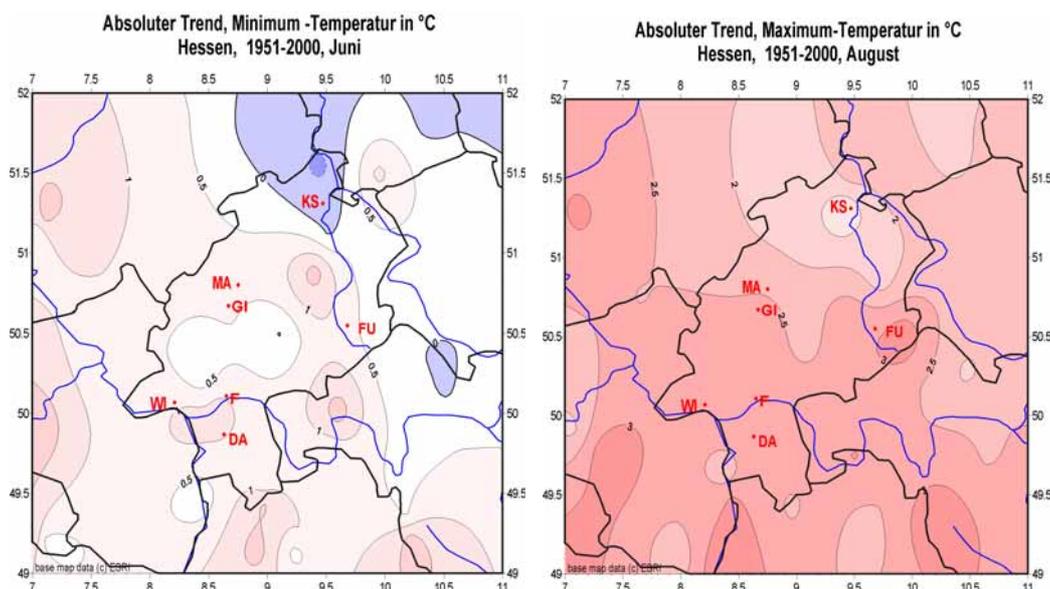


Abb. 15. Ähnlich Abb. 14, jedoch Minimum-Temperatur Juni und Maximum-Temperatur August.

3.2 Niederschlagstrends

Die Jahressummen 1951-2000 des Niederschlags haben im Flächenmittel Hessen, siehe Tab. 4, leicht zugenommen: um 8 - 9 %. Dazu tragen alle Jahreszeiten außer dem Sommer bei (Trendwerte rund 20 - 25 %), der im Gegensatz dazu eine deutliche Abnahme um rund 18 % aufweist. Die betrachteten 30-jährigen Zeitabschnitte zeigen wiederum ein uneinheitliches Verhalten, wobei besonders die Abnahme 1951-1980 (ausgenommen Frühling) sowie die enorme Zunahme im Herbst und auch Winter 1971-2000 bemerkenswert sind. Bei den Prozentwerten ist generell zu beachten, dass es sich um relative Angaben vor dem Hintergrund des mittleren Jahresgangs handelt. Zur Orientierung sind im Anhang A.6 die Niederschlag- und Temperaturjahresgänge ausgewählter Stationen (vgl. Anhang A.3) angegeben.

Tab. 4. Lineare Niederschlagstrends in Prozent, Hessen (Flächenmittel 49°-52° N / 7°-11° O).

Niederschlagstrends, %	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
1951-2000	20,3	-17,8	24,9	22,2	8,5
1951-1980	22,3	-9,8	-6,9	-1,4	-1,2
1961-1990	6,9	-16,2	18,8	21,8	6,3
1971-2000	8,6	0,2	31,5	22,8	18,2

Tab. 5. Lineare Niederschlagstrends in Prozent (in Klammern in mm), Stationen (Hessen, ergänzt durch Göttingen, Eppenrod, Mainz und Aschaffenburg; vgl. Anhang A.3), Langzeitanalyse und Subintervalle; Fettdruck bedeutet Signifikanz > 90%.

Station	Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Göttingen	1901-2000	26 (32)	-8 (-16)	-2 (-4)	18 (22)	6 (36)
Alsfeld		18 (25)	-4 (-8)	9 (14)	16 (20)	8 (52)
Greifenstein		17 (30)	4 (9)	26 (50)	25 (55)	18 (145)
Eppenrod		34 (50)	4 (8)	13 (24)	39 (61)	21 (146)
Bad Camberg		21 (28)	-2 (-5)	13 (19)	26 (31)	12 (75)
Geisenheim		20 (25)	-5 (-11)	3 (5)	1 (1)	4 (22)
Frankfurt/M.		5 (6)	-1 (-2)	2 (3)	12 (13)	4 (21)
Mainz		38 (41)	7 (12)	23 (29)	34 (35)	22 (117)
Eberbach		16 (33)	-8 (-21)	16 (35)	33 (75)	13 (125)
Aschaffenburg		17 (25)	-5 (-11)	9 (15)	14 (20)	7 (48)
Göttingen	1901-2003*)	27 (34)	-10 (-21)	1 (2)	20 (24)	6 (38)
Alsfeld		14 (21)	-9 (-20)	14 (22)	15 (20)	7 (45)
Greifenstein		22 (37)	6 (12)	26 (51)	27 (59)	20 (161)
Eppenrod		34 (49)	3 (6)	16 (30)	34 (54)	20 (140)
Geisenheim		20 (26)	-10 (-21)	5 (8)	4 (5)	3 (19)
Frankfurt/M.		8 (9)	-4 (-6)	6 (8)	15 (16)	5 (27)
Mainz		43 (46)	5 (8)	26 (33)	36 (35)	25 (125)
Eberbach		20 (40)	-12 (-31)	19 (30)	35 (77)	14 (134)
Göttingen	1951-2000	19 (25)	-28 (-67)	14 (19)	12 (17)	-1 (-4)
Alsfeld		16 (23)	-27 (-64)	15 (22)	23 (31)	3 (17)
Greifenstein		25 (42)	-23 (-57)	28 (58)	20 (49)	11 (91)
Eppenrod		19 (32)	-12 (-28)	14 (27)	26 (49)	11 (84)
Bad Camberg		9 (13)	-28 (-66)	13 (19)	2 (3)	-4 (-29)
Geisenheim		11 (16)	-29 (-67)	1 (2)	-1 (-2)	-8 (-51)
Frankfurt/M.		3 (3)	-10 (-17)	17 (21)	1 (2)	2 (11)
Mainz		33 (39)	-18 (-37)	32 (41)	26 (31)	13 (74)
Eberbach		29 (59)	-15 (-41)	28 (61)	20 (55)	13 (124)
Aschaffenburg		16 (24)	-32 (-81)	0,3 (0,4)	-17 (-30)	-11 (-82)
Göttingen	1971-2000	14 (19)	-18 (-36)	23 (30)	17 (23)	8 (48)
Alsfeld		-31 (-61)	-12 (-25)	20 (31)	27 (37)	-2 (-13)
Greifenstein		8 (15)	24 (42)	42 (83)	41 (96)	31 (241)
Eppenrod		10 (17)	6 (11)	13 (25)	33 (63)	17 (128)
Bad Camberg		-2 (-3)	4 (8)	24 (36)	20 (26)	12 (76)
Geisenheim		-10 (-15)	-4 (-7)	28 (39)	19 (24)	7 (40)
Frankfurt/M.		-2 (-3)	8 (12)	35 (40)	35 (35)	17 (81)
Mainz		-5 (-7)	4 (7)	46 (57)	26 (32)	18 (99)
Eberbach		30 (60)	-1 (-3)	23 (54)	23 (65)	22 (199)
Aschaffenburg		2 (3)	-28 (-65)	23 (35)	5 (7)	-0,4 (-3)
Göttingen	1974-2003*)	3 (5)	-15 (-29)	22 (30)	-2 (-4)	-0,5 (-3)
Alsfeld		-8 (-14)	-27 (-59)	30 (45)	-1 (-2)	-5 (-38)
Greifenstein		10 (19)	27 (48)	23 (51)	11 (30)	17 (146)
Eppenrod		-1 (-2)	-14 (-31)	16 (31)	5 (10)	1 (6)
Geisenheim		-19 (-32)	-14 (-25)	23 (33)	-5 (-7)	-6 (-38)
Frankfurt/M.		-2 (-3)	-5 (-7)	34 (41)	5 (6)	5 (29)
Mainz		-6 (-9)	-3 (-5)	35 (47)	7 (10)	6 (35)
Eberbach		16 (36)	-21 (-54)	14 (34)	6 (18)	1 (14)

*) Bei den Stationen Bad Camberg und Aschaffenburg sind die Daten ab 2001 unvollständig

Der Blick auf die prozentualen Niederschlagstrends in den einzelnen Monaten, siehe Tab. A.2 (im Anhang) zeigt erneut, dass sie unterschiedlich zu den jahreszeitlichen Trends beitragen. Bezogen auf 1951-2000 tut dies hinsichtlich der Niederschlagszunahme im Winter vor allem der Dezember (rund 29 %) und mit deutlichem Abstand der Februar, während der Anstieg im Januar eher moderat ist. Der sommerliche Niederschlagsrückgang hat seinen Schwerpunkt im August (- 18 %), gefolgt vom Juni; im Juli gibt es im Hessen-Mittel praktisch keinen Trend. Im Herbst zeigt der Oktober einen sehr starken Anstieg (rund 46 %); September und November folgen mit deutlichem Abstand in etwa gleichauf. Im Frühling fällt enorme Anstieg im März (rund + 62 %) aus dem Rahmen, wobei – wie gesagt – allerdings zu berücksichtigen ist, dass es sich um relative Werte handelt. Im Mai ist der Anstieg fast nicht existent, im April sehr moderat. Die gerade beim Niederschlag bei Zugrundlegung 30-jähriger Intervalle sehr stark variierenden Trends seien hier nur erwähnt.

In Tab. 5 sind für ausgewählte Stationen in Hessen die Langzeittrends des Niederschlags angegeben (ähnlich wie in Tab. 3 bei der Temperatur) und zwar wiederum jahreszeitlich und jährlich für das Langzeitintervall (1901-2000/2003) und einige Subintervalle. Langzeitlich bestätigt sich dabei sowohl der Trend zu leichter Zunahme des Jahresniederschlags als auch zu einem starken Anstieg im Frühling und insbesondere Winter. Im Sommer überwiegen dagegen leichte Abnahmen. Im Herbst zeigen sich fast überall (Ausnahme nur Göttingen) Zunahmen, die jedoch gegenüber dem Frühling bzw. Winter zumeist quantitativ geringer ausfallen.

Im Vergleich dazu ist in der Zeitspanne 1951-2000 vor allem die sommerliche Niederschlagsabnahme enorm verstärkt, die winterliche Zunahme dagegen zumeist abgeschwächt (in Aschaffenburg sogar Trendumkehr). In den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst sind durchweg leichte bis mäßige Zunahmen zu verzeichnen. Insgesamt streuen die Trendwerte in diesem Zeitintervall gegenüber 1901-2000 deutlich mehr, vor allem im Winter und Frühling. Dies gilt, mit der Ausnahme Herbst, in erhöhtem Ausmaß für das noch kürzere Zeitintervall 1971-2000, wo im Frühling und Sommer die Spannen von -31 % bis +30 % bzw. -28 % bis +24 % reichen (im Herbst und Winter dagegen einigermaßen einheitliche Zunahmen), was sich auch auf die Jahreswerte auswirkt: Im Gegensatz zu 1901-2000 treten sowohl 1951-2000 als auch 1971-2000 unterschiedliche Vorzeichen auf, auch wenn insgesamt die Zunahmen bei weitem überwiegen. Die Erweiterung bis zum Jahr 2003 (1901-2003 bzw. 1974-2003) erbringt keine gravierenden Unterschiede.

Eine entsprechende Trendtabelle der Monatswerte findet sich im Anhang (Tab. A.5). Sie soll hier nur kurz diskutiert werden. Auffällig ist dabei vor allem, dass sowohl 1901-2000/2003 als auch 1951-2000 der August durchweg negative Trends zeigt, ab 1951 auch der Juni; andererseits nimmt in den Monaten September bis März der Niederschlag meist zu (1971-2000 im November aber fast überall ab). Im Juni nimmt 1901-2000/2003 der Niederschlag generell zu, bereits ab 1951 dagegen generell ab. Im April und Mai sind die monatlichen Befunde regional sehr unterschiedlich.

Die räumlichen Strukturen der Niederschlagstrends in Hessen, die sich für das Zeitintervall 1951-2000 aufgrund einer Vielzahl von Stationen (vgl. Abb. 4) sehr gut auflösen lassen, erweisen sich bereits bei Jahreswerten als höchst kompliziert; siehe Abb. 16. Zwar überwiegen die Zunahmen deutlich, insbesondere in der jüngeren Zeit (1971-2000); 1951-2000 zeigen sich aber im Nordosten auch kleinere Teilregionen ohne Zunahme bzw. mit Abnahme des Niederschlags. Bei jahreszeitlicher Differen-

zierung, siehe Abb. 17, fällt der Sommer mit fast überall deutlichen Abnahmen auf (10 bis über 30 %, Schwerpunkte im Norden). In den anderen Jahreszeiten zeigen sich fast überall Zunahmen, dies jedoch im großen Wertebereich von 0 - ca. 40 %.

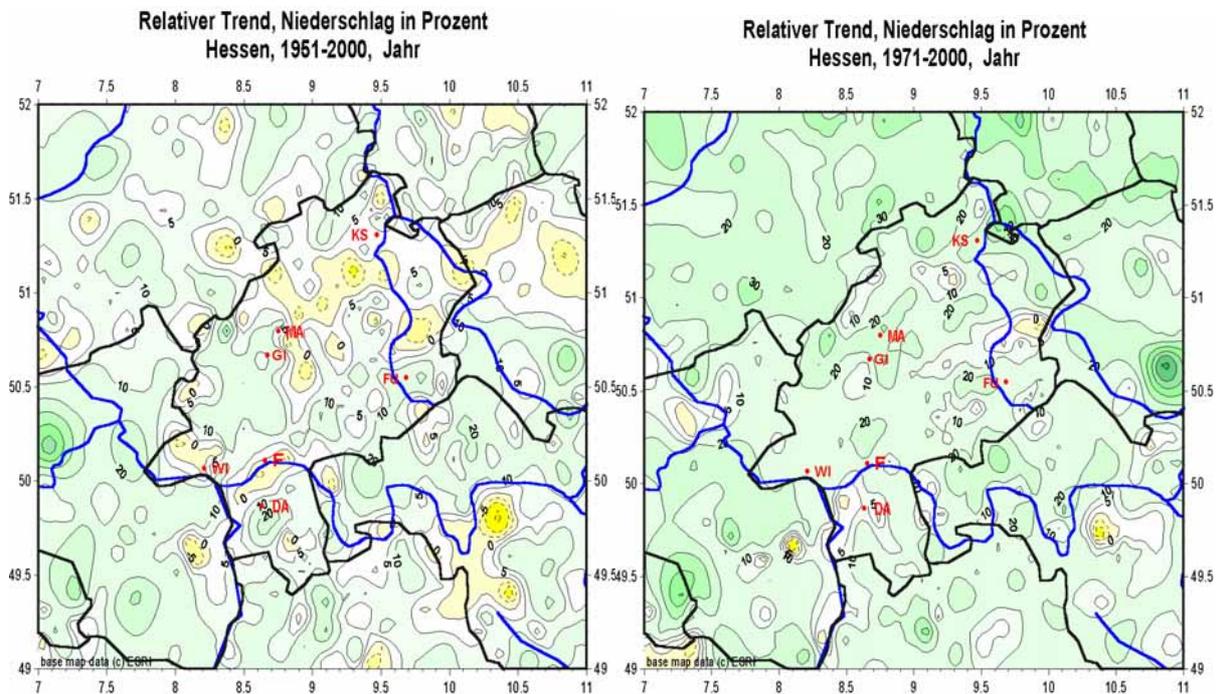


Abb. 16. Räumliche Strukturen der Niederschlagstrends in Prozent, Hessen, Jahressummen, 1951-2000 (links) im Vergleich mit 1971-2000 (rechts); Farbsymbolik: grünlich Zunahme, gelblich Abnahme; Isolinienbeschriftung im Abstand von 10%.

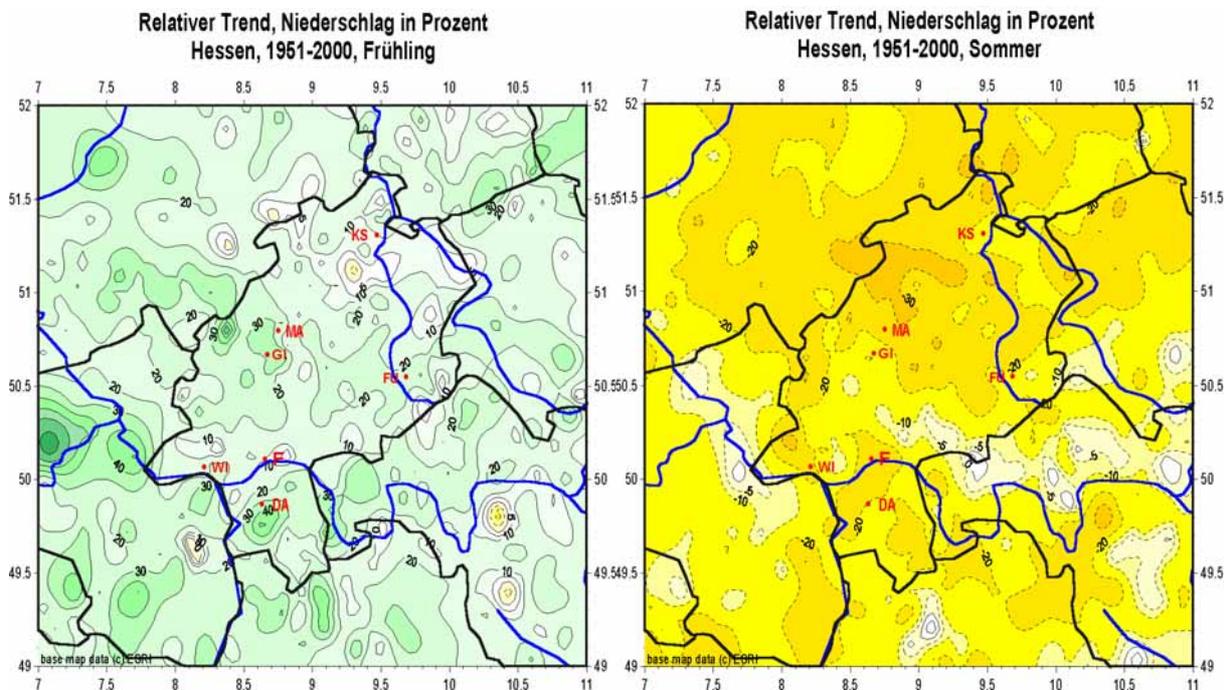


Abb. 17a. Räumliche Strukturen der Niederschlagstrends in Prozent, Hessen, 1951-2000, Frühling und Sommer; Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 16.

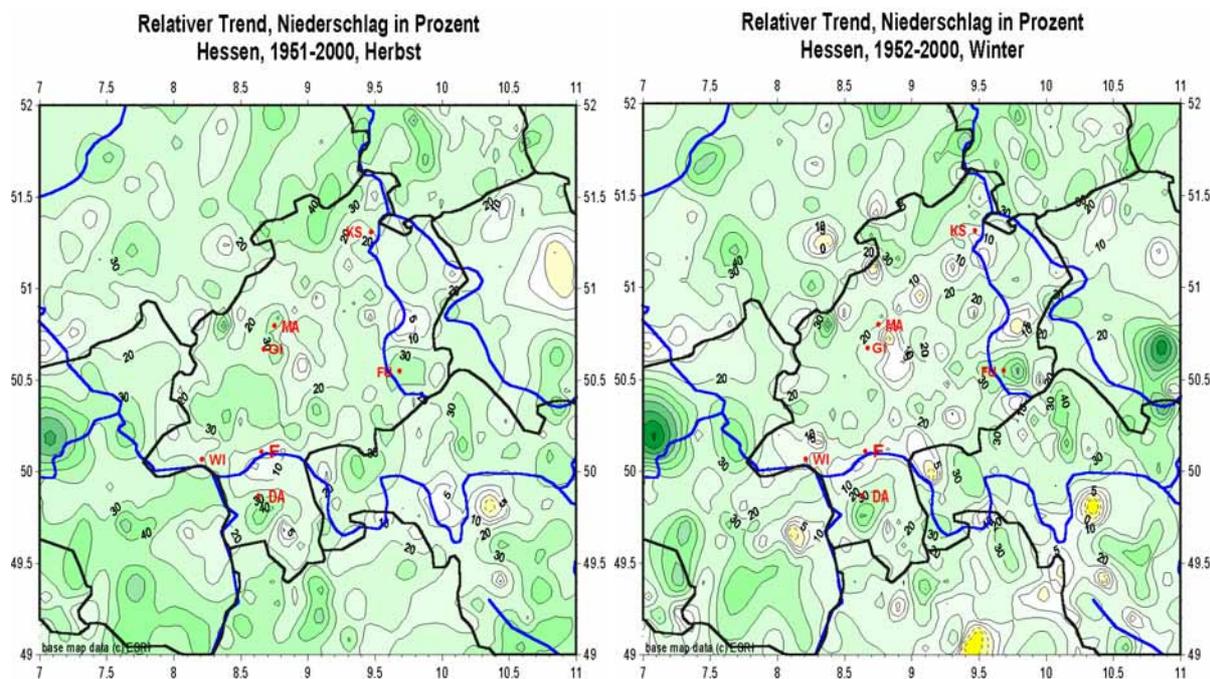


Abb. 17b. Räumliche Strukturen der Niederschlagstrends in Prozent, Hessen, 1951-2000, Herbst und Winter; Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 16.

Die monatlichen Niederschlag-Trendkarten 1951-2000, siehe Abb. 18 (vgl. dazu auch Tab. A.2 im Anhang), lassen sich einteilen in

- (a) fast flächendeckend starke Zunahmen;
- (b) überwiegend flächendeckend beachtlicher Zunahmen;
- (c) unterschiedlich mit ausgeprägtem Nord-Süd-Unterschied;
- (d) unsystematisch unterschiedlich mit überwiegender Zunahme;
- (e) fast flächendeckend beachtliche Abnahme;
- (f) flächendeckend starke Abnahme.

Zum Typ (a) zählt vor allem der März, der auch in Tab. A.2 durch eine starke Zunahme auffällt. Innerhalb Hessens variieren die Zunahmen ungefähr zwischen 30 % und 80 % ohne subregionale Systematik. Ähnliches gilt für den Oktober, wenn auch auf etwas niedrigerem Niveau der beobachteten Trends. Dem Typ (b) folgt der Dezember. Dem Typ (d) sind der Februar, September, November und auf niedrigerem Niveau der Zunahme (Wertespannen in etwa zwischen -10 % und +20 %) auch noch der April zuzurechnen.

Ein ganz krasser Nord-Süd-Unterschied, somit Typ (c), liegt im Juli vor, wo im Norden von Hessen Abnahmen bis ca. 40 % und im Süden Zunahmen bis über 50 % auftreten. Dies ist somit ein typisches Beispiel dafür, dass der Flächenmittel-Trend (mit -0,1 % fast exakt Null; vgl. Tab. A.2) keinesfalls immer aussagekräftig ist und die subregionalen Strukturen zu beachten sind. Ähnlich, wenn auch nicht ganz so krass, ist die Situation im Mai, wo im Flächenmittel ebenfalls so gut wie kein Trend (+1,6 %) resultiert, subregional aber eine Spanne von ca. -20 % bis +40%. Dabei treten die Abnahmen tendenziell wieder im Norden auf, aber auch im westlichen und östlichen Mittelhessen, die Zunahmen vor allem in der Region Darmstadt. Schließlich entspricht der Juni dem Typ (e) und der August dem Typ (f), der sich somit besonders eklatant zu einem trocken-heißen Monat entwickelt hat.

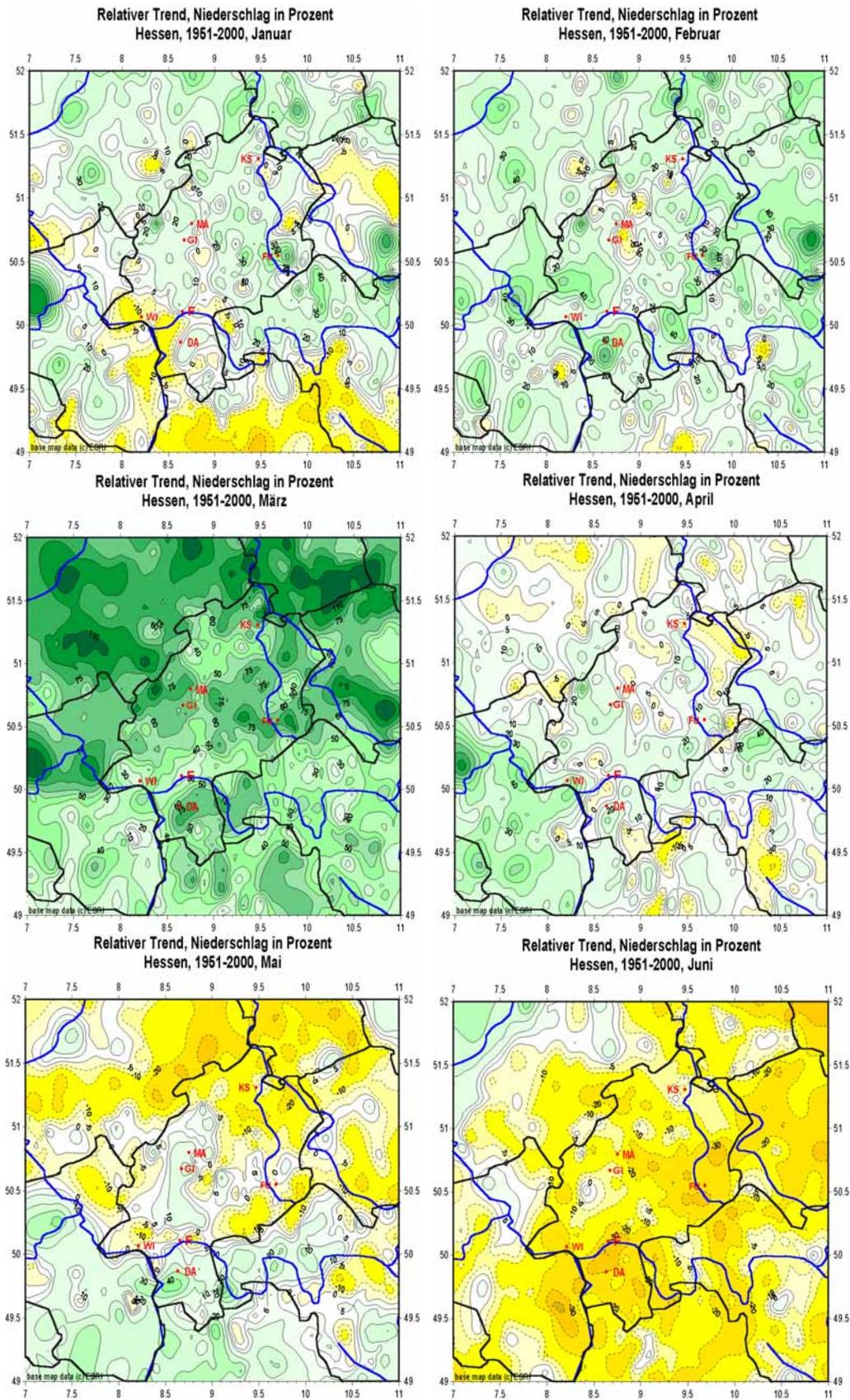


Abb. 18a. Räumliche Strukturen der Niederschlagstrends in Prozent, Hessen, 1951-2000, Monatswerte Januar - Juni (Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 16).

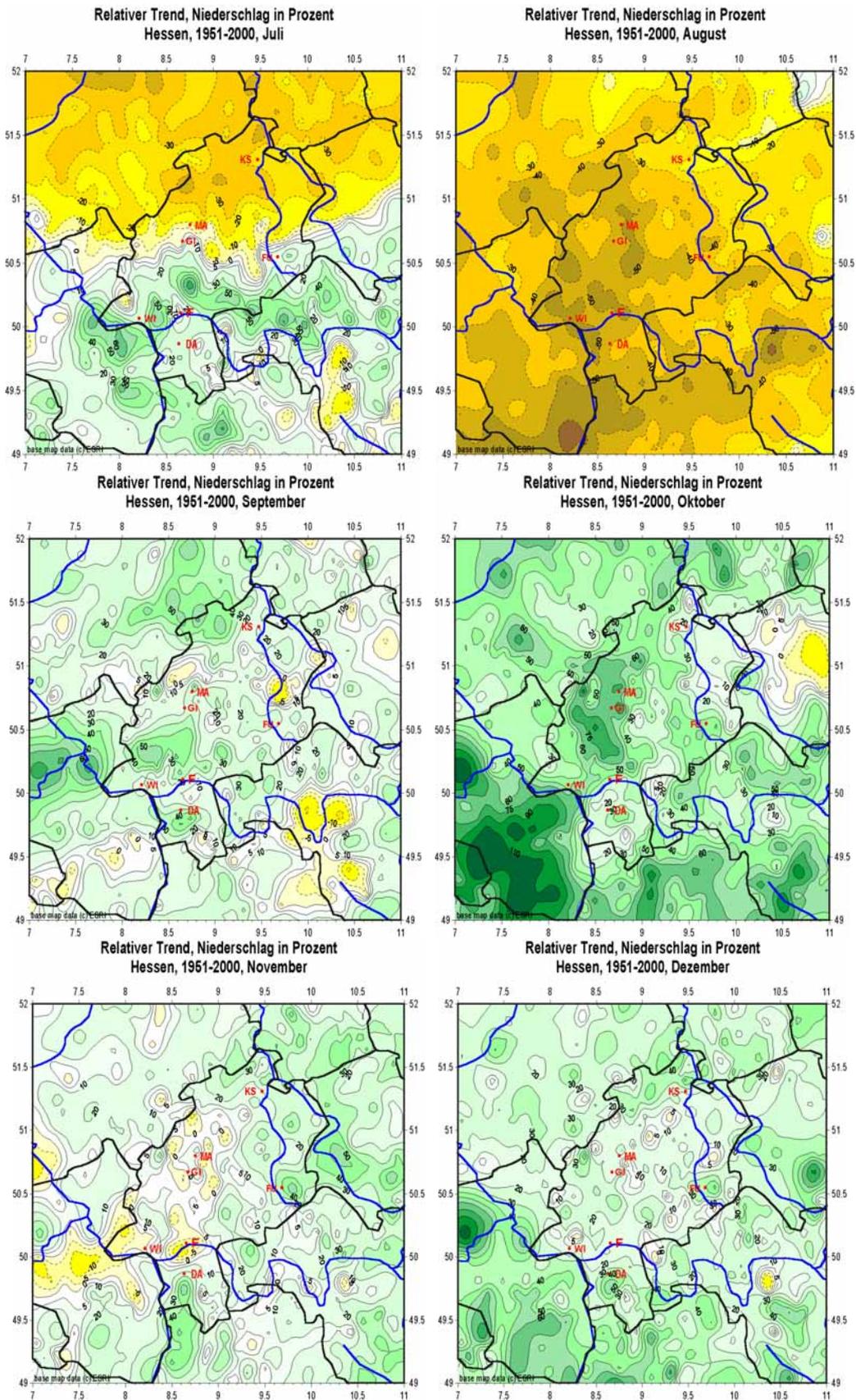


Abb. 18b. Räumliche Strukturen der Niederschlagstrends in Prozent, Hessen, 1951-2000, Monatswerte Juli - Dezember (Farbsymbolik und Isolinien wie in Abb. 16).

4. Spektrale Varianzanalyse

Die spektrale Varianzanalyse dient der Aufschlüsselung der in einer Zeitreihe enthaltenen Varianz auf die Perioden bzw. Frequenzen. Damit wird erfasst, welche Fluktuationen mit welchen mittleren Periodenlängen relativ auffällig in den Klimadaten auftreten und welchen Anteil an der Gesamtvarianz sie dabei jeweils aufweisen. In der graphischen Darstellung des Varianzspektrums wird daher in der Abszisse die Frequenz f bzw. Periode P (mit $P = 1/f$) und in der Ordinate die sog. spektrale Dichte aufgetragen, die proportional zur relativen Varianz ist. Die Struktur des Spektrums – abzüglich der relativen Varianzmaxima spricht man vom Hintergrundspektrum – enthält außerdem eine Information zur Persistenz (Erhaltungsneigung): Verläuft dieses Spektrum annähernd horizontal (sog. weißes Spektrum), ist keine signifikante Persistenz in den Daten enthalten; steigt es dagegen in Richtung größerer Perioden an (sog. rotes Spektrum), ist Persistenz gefunden worden. Je weiter sich nun die relativen Varianzmaxima vom jeweiligen Hintergrundspektrum abheben, umso signifikanter sind die dabei jeweils erfassten Fluktuationen (weitere methodische Details siehe Literatur, z.B. Schönwiese, 2000).

Es gibt nun verschiedene Algorithmen zur spektralen Varianzanalyse. Hier wird die sog. Autokorrelationsspektralanalyse (ASA) verwendet, welche die Perioden der jeweiligen Fluktuationen auch dann identifiziert, wenn sie Phasensprünge aufweisen (dies im Gegensatz zum Periodogramm) und die hinsichtlich der Signifikanztests relativ unproblematisch ist (dies im Gegensatz zur Maximum-Entropie-Spektralanalyse). Es wurden Zeitreihen 1901-2000 der Jahreswerte der Temperatur und des Niederschlags für die in Tab. 3 und 5 ersichtlichen Stationen analysiert. Um die Fluktuationen deutlicher hervortreten zu lassen, sind von den Zeitreihen die Langfristtrends (1901-2000) vorab subtrahiert (detrending). Trotzdem können sich noch rote Hintergrundspektren ergeben. Dieses (weiße oder rote) Hintergrundspektrum („Rauschen“) sowie die Signifikanzgrenzen (confidence levels cl) sind in den folgenden Graphiken jeweils mit eingezeichnet und alle Perioden, welche die cl -Grenze 90 % erreichen oder überschreiten, sind in ihren Zahlenwerten benannt.

Die in Abb. 19 gezeigten Varianzspektren der Temperatur (Jahresmittelwerte 1901-2000) sind in ihrer Struktur recht ähnlich; nur Karlsruhe weicht etwas stärker davon ab. Am signifikantesten ist eine Periodizität von 2,3 Jahren ($cl > 99\%$, in Karlsruhe $cl > 95\%$), die aus der Literatur als „Quasizweijährige Oszillation“ (Quasi-Biennial Oscillation, QBO) bekannt (meist mit 2,2 Jahren, entsprechend etwa 26 Monaten, angegeben) und wahrscheinlich eine stratosphärische Zirkulationserscheinung ist, die von dort allmählich in die untere Atmosphäre propagiert (Labitzke, 1999). Sie zeigt sich in sehr vielen klimatologischen Zeitreihen (vgl. z.B. Schönwiese und Rapp, 1997) und auch in einigen biosphärischen Größen wie z.B. der Weinqualität. Auch der zugehörige „Nebengipfel“ von 2,5-2,6 Jahren ist aus der statistischen Klimatologie bekannt. Die Ursache der gelegentlich, hier nur in den Daten von Karlsruhe auftretende Periodizität von 3,3 Jahren („Nebengipfel“ 3,1 Jahre) ist unbekannt, es sei denn, er steht im Zusammenhang mit dem ENSO-Mechanismus (El Niño / Southern Oscillation), der sich in episodischen Erwärmungen der tropischen Ozeane, insbesondere des tropischen Ostpazifiks, zeigt (El-Niño-Ereignisse, EN), gekoppelt mit typischen Luftdruckschwankungen der Südhemisphäre (SO).

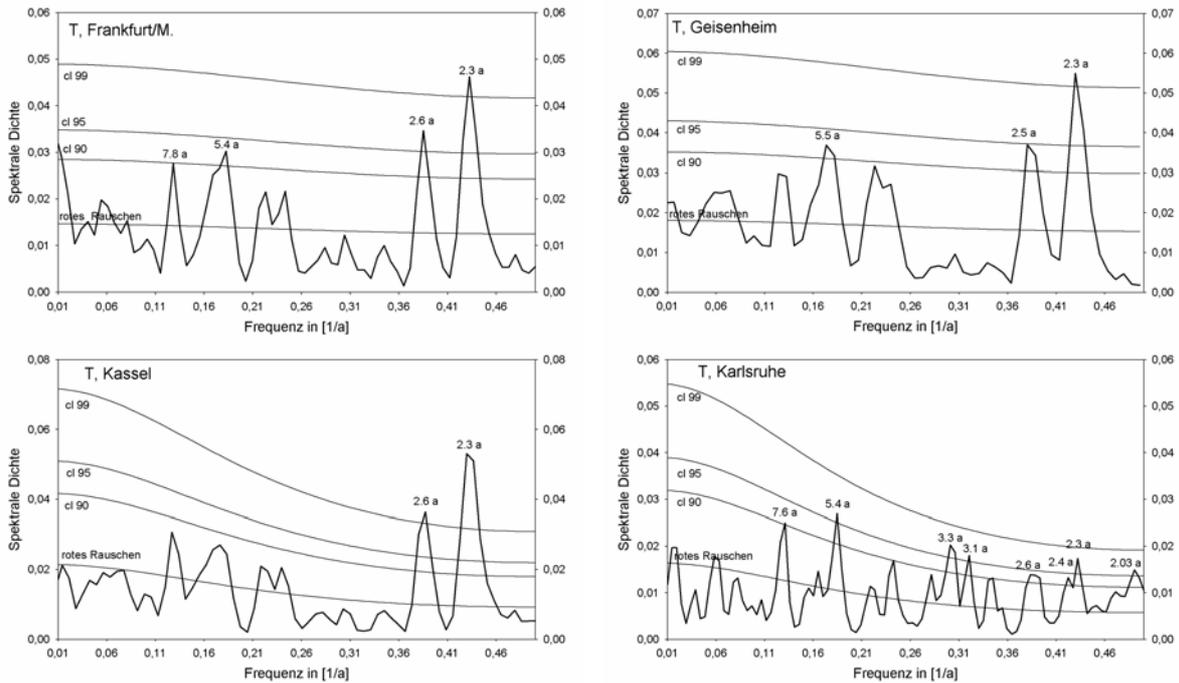


Abb. 19. Varianzspektren der Temperatur-Jahresmittelwerte 1901-2000 für die angegebenen Stationen; cl sind die Signifikanzgrenzen in Prozent (engl. confidence levels); a = Jahre.

Der ENSO-Mechanismus weist im Mittel eine 5,4-5,5-jährige Fluktuation auf (ASA-Analyse dazu siehe z.B. Schneider und Schönwiese, 1989), zusammen mit quasi-3- bis quasi-7-jährigen Schwingungen, die sich in der Abfolge von El-Niño-Ereignissen überlagern. Allerdings gibt es keinen oder zumindest keinen deutlichen ENSO-Einfluss auf das Klima in Europa. Spekulativ ist früher auch an einen Einfluss des „halben“ quasi-11-jährigen Sonnenfleckenzyklus gedacht worden (z.B. Baur, 1949), was aber nie überzeugend nachgewiesen werden konnte. Somit bleibt in Europa auch die Ursache der ca. 5,5-jährigen Schwingung weitgehend unbekannt, obwohl sie fast ebenso häufig wie die QBO in klimatologischen Zeitreihen vorkommt.

Dagegen stammt die ca. 7,6-7,8-jährige Schwingung wahrscheinlich von der Nordatlantik-Oszillation (NAO), einer Art Luftdruckschaukel zwischen dem Island-Tief und Azoren-Hoch, das je nach Konstellation die Advektion mild-feuchter Luftmassen nach Europa begünstigt oder behindert, was besonders für den Winter relevant ist. Aus der spektralen Analyse des NAO-Index hat sich, neben weiterer Variabilität, ein ca. 7,5-jähriger Zyklus als dominant herausgestellt (Werner und Schönwiese, 2002). Bei den hier gezeigten Temperaturspektren ist dieses spektrale Varianzmaximum nur in Frankfurt und Karlsruhe (jeweils cl 90%) ausgeprägt (in den anderen Spektren ist es zwar zu sehen, bleibt aber unter cl 90 %). Das könnte dadurch erklärbar sein, dass der NAO-Einfluss auf Europa zwar stark, aber eben vor allem auf den Winter konzentriert ist (in dieser Jahreszeit ist der 7,5-jährige NAO-Zyklus auch am signifikantesten; Werner und Schönwiese, 2002). Bemerkenswert ist schließlich, dass der quasi-11-jährige Zyklus der Sonnenaktivität (der in den Spektren bei einer Frequenz von $0,09 \text{ Jahre}^{-1}$ liegen müsste) noch nicht einmal andeutungsweise auftaucht und somit für die Temperaturvariationen in Hessen ohne Belang ist.

Die Existenz solcher auffälligen zyklischen Vorgänge im Klimageschehen, die zusammen mit mehr oder weniger extremen kurzzeitigen Anomalien (Abweichungen vom Mittelwert, monatlich oder jährlich) den Trends überlagert sind, ist aber eine Ursache für die bereits mehrfach erwähnte Tatsache, dass Trends zeitlich variabel sind. Dieser Effekt ist umso deutlicher, je kürzer die Zeitintervalle sind, auf denen die Trendberechnungen beruhen. Daher sollten solche Trendberechnungen, wie ebenfalls bereits erwähnt, auf den Daten von jeweils möglichst vielen Jahrzehnten beruhen. Ganz gleich, welche Ursache dann solche Langzeittrends haben, sie sind stets von interannuären (Jahr-zu-Jahr) und dekadischen (Jahrzehntbereich) Schwankungen überlagert. Die hier erfassten Fluktuationen beinhalten übrigens keine Prognose-information, weil sie im zeitlichen Ablauf in ihren Amplituden stark variieren und zudem zufallsartigen Phasensprüngen unterliegen (Schönwiese, 1974).

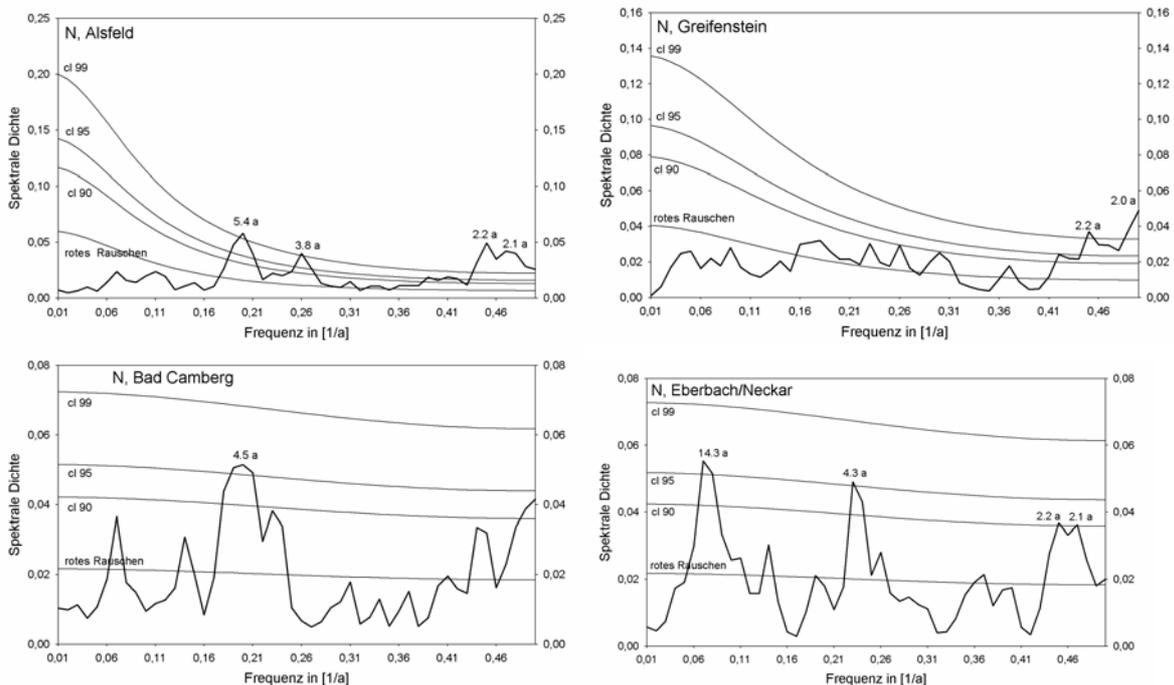


Abb. 20. Varianzspektren der Niederschlag-Jahressummen 1901-2000 für die angegebenen Stationen (wie in Abb. 9 sind ci die Signifikanzgrenzen in Prozent, a = Jahre).

Es sollen nun noch für die in Tab. 5 aufgelisteten Stationen, soweit sie in Hessen liegen, die Varianzspektren des Niederschlags gezeigt werden, siehe Abb. 20. Die im Vergleich zur Temperatur wesentlich stärker ausgeprägten Unterschiede weisen einmal mehr auf die relativ kleinräumigen Unterschiede im Niederschlagsverhalten hin. Allerdings ist die QBO auch in diesen Spektren präsent (in Bad Camberg allerdings einer 2-jährigen Schwingung untergeordnet). Die hier zusätzlich auftretenden Schwingungen von 4,3-4,5 sowie ca. 14 Jahren (letzteres nur in Eberbach) sind empirisch-statistisch gesehen nicht neu, in ihrer Verursachung aber unbekannt. Ein Vergleich der in Abb. 19 und 20 gezeigten Ergebnisse lässt übrigens erkennen, dass die Varianzanteile am langperiodischen Ende der Spektren (Frequenz $0,01 \text{ Jahr}^{-1}$) bei der Temperatur größer als beim Niederschlag sind, somit die Langfristtrends bei der Temperatur deutlicher in Erscheinung treten, was sich bei der Trend-Signifikanzprüfung durch ein häufigeres Überschreiten der 90%-Grenze, insbesondere bei Zeitintervallen von 50 oder besser 100 Jahren, bemerkbar macht.

5. Extremwertanalyse

5.1 Zeitintervall 1951 - 2000

Im Klimageschehen sind nicht nur Trends und Fluktuationen bedeutsam; die wegen ihrer Auswirkungen besonders wichtigen Extremwerte finden mit Recht zunehmende Aufmerksamkeit. Spätestens die winterlichen Hochwässer 1993/1994 und 1994/1995 im Rhein-Einzugsgebiet, das Elbe-Hochwasser vom Sommer 2002 und der extreme Hitzesommer 2003 haben gezeigt, dass auch Deutschland darunter zu leiden hat. Wie bei den Temperatur- und Niederschlagstrends stellt sich daher die Frage, ob und ggf. in welchem Ausmaß dabei Änderungen eingetreten sind.

Bei der klassischen Herangehensweise zur Beschreibung und Analyse von Klima-Extremen werden obere bzw. untere Schranken definiert. Die Messwerte oberhalb bzw. unterhalb dieser Schranken werden als Extreme angesehen und beispielsweise deren Auftrittshäufigkeit, Verteilung oder Clusterung (auffällige Häufungen in einem begrenzten Zeitintervall) betrachtet. Hierbei werden jedoch die Daten des so definierten „normalen Bereichs“, also unterhalb der oberen bzw. oberhalb der unteren Schranken, nicht zur Analyse genutzt. Dadurch fehlen wichtige Informationen, die Veränderungen des Extremverhaltens erklären könnten. Beispielsweise, kann eine Häufung von Extremen durch einen Trend oder durch eine Zunahme der Streuung, jeweils in der gesamten Zeitreihe, oder durch eine Kombination von beidem entstanden sein. Ohne Berücksichtigung der Messwerte aus dem sozusagen „normalen Messwertebereich“ ist eine Klärung dieses Sachverhaltes nicht möglich.

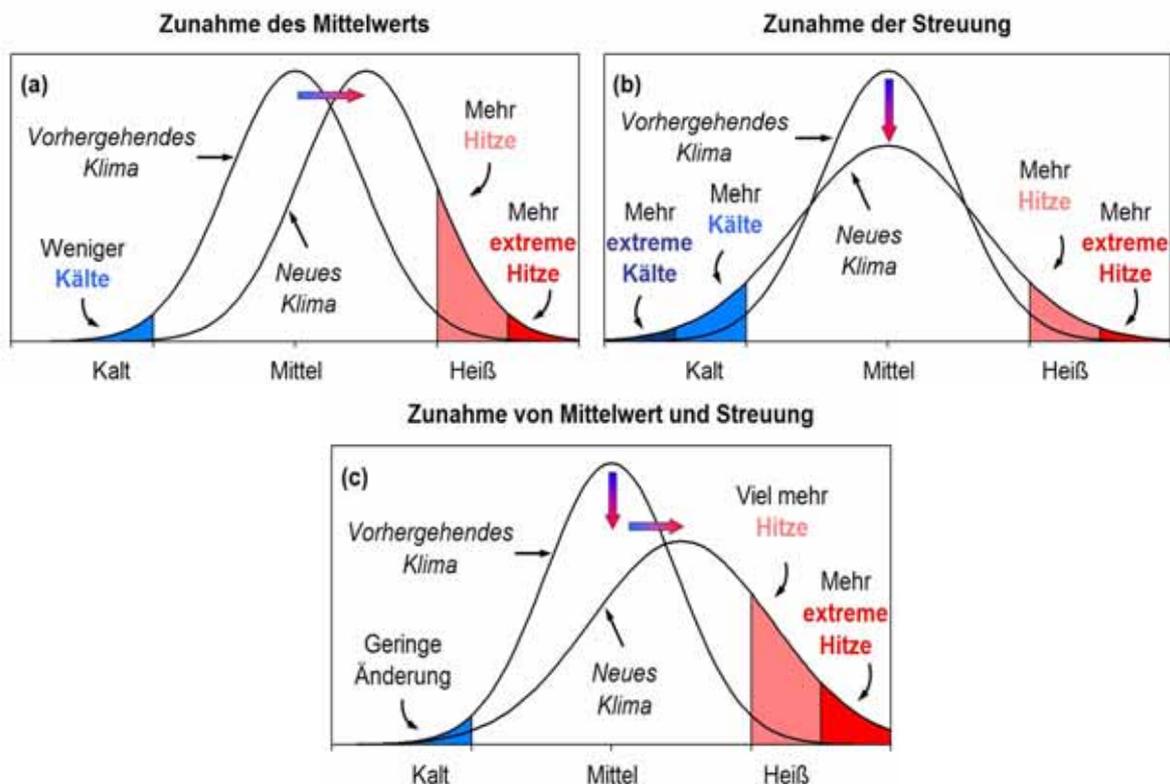


Abb. 21. Veranschaulichung der Zu- bzw. Abnahme der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Extremwerten (blaue bzw. rote Flächen) bei Änderung von (a) Mittelwert bzw. (b) Streuung bzw. (c) beidem am Beispiel der Normalverteilung (nach IPCC, 2001; hier nach Hupfer und Börngen, 2004).

Weiterhin ist eine nahe liegende Eigenschaft von Extremen ihre Seltenheit. Daraus ergibt sich folgendes Dilemma ist: Je extremer (und somit auch je interessanter im Hinblick auf seine Auswirkungen) ein Ereignis ist, umso seltener tritt es im allgemeinen ein und umso schwerer fällt seine statistische Beschreibung. Aufgrund dieser Nachteile ist eine Herangehensweise erwünscht, die möglichst alle Messwerte einer Zeitreihe nutzt, und auch alle Erkenntnisse über die Verteilungsstrukturen.

Die hier angewandte Methode (Trömel, 2005; Trömel und Schönwiese, 2005) berücksichtigt diese Sachverhalte indem sie anhand der gesamten, zur Verfügung stehenden Zeitreihen-Information Häufigkeitsverteilungen schätzt, deren freie Parameter zeitabhängig sind. Bei der bekannten Gauß- oder Normalverteilung beispielsweise sind dies der Mittelwert und als Maß für die Streuung die Standardabweichung. Dabei mag Abb. 21 zur Veranschaulichung dienen. Dort ist anhand des einfachen Grundtyps der (Gaußschen) Normalverteilung gezeigt, wie sich eine Verschiebung, entsprechend einem Trend des Mittelwertes, eine Verbreiterung, entsprechend einer Zunahme der Streuung, bzw. beides auf die Extremwerte im oberen bzw. unteren Bereich einer solchen Verteilung auswirken, d.h. oberhalb bzw. unterhalb einer definierten Schwelle. Handelt es sich um eine normierte Verteilung (Integral, anschaulich Fläche unter der Kurve, gleich eins), so spricht man von einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl. Probability Density Function, PDF), die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit Daten in bestimmten Wertebereichen und somit auch Extremwerte zu erwarten sind. Die farblich gekennzeichneten Flächen in Abb. 21 repräsentieren solche Extremwert-Wahrscheinlichkeiten.

Im konkreten Fall kommt es nun darauf an, an die jeweils betrachteten Zeitreihendaten eine geeignete theoretische Verteilung (PDF) anzupassen, und festzustellen, wie sie sich im Laufe der Zeit verändert hat. Die hier angewandte neue Methode gestattet es, für beliebige Verteilungen stetige Zeitfunktionen der Änderung ihrer Parameter zu berechnen. Für Niederschlagsdaten, beispielsweise, ist häufig die Gumbel-Verteilung passender als die Normalverteilung. Bei den kennzeichnenden Parametern handelt es sich allgemein um den Lageparameter, in Abb. 21 entsprechend dem Mittelwert (der angibt, wo bezüglich der Koordinaten die Verteilung liegt), den Streuparameter (der die Streuung der Daten quantifiziert) und beispielsweise bei der sog. Weibull-Verteilung auch den Formparameter (der unterschiedliche Formen der PDF-Kurve der jeweiligen Verteilung zulässt). Die zeitlichen Änderungen solcher Parameter können auch nicht-linear verlaufen, was hier durch Trend- und polynomiale Funktionen bis zur 5. Ordnung berücksichtigt ist (ein positiver Trend 5. Ordnung bedeutet beispielsweise eine gekrümmte Kurve mit einem sich gegen Ende hin deutlich verstärkenden Anstieg; weitere Details siehe Trömel, 2005). Daraus lassen sich dann weitergehend die Zeitfunktionen für die Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit beliebiger Schwellenwerte berechnen. Das liefert schließlich eine Abschätzung darüber, in welcher Richtung (Zu- bzw. Abnahme der Wahrscheinlichkeit) und mit welcher Intensität (proportional der Änderung der in Abb. 21 farblich markierten Flächen) sich das klimatologische Extremwertverhalten geändert hat.

Da Extremwerte bzw. -situationen nicht beliebig lange anhalten, sondern im allgemeinen im Tages-, Monats- oder allenfalls Jahreszeitbereich liegen (z.B. Hitzesommer 2003), wurde bei den im folgenden beschriebenen Ergebnissen auf die Analyse von Jahreswerten verzichtet. (Stundenwerte lagen nicht vor.)

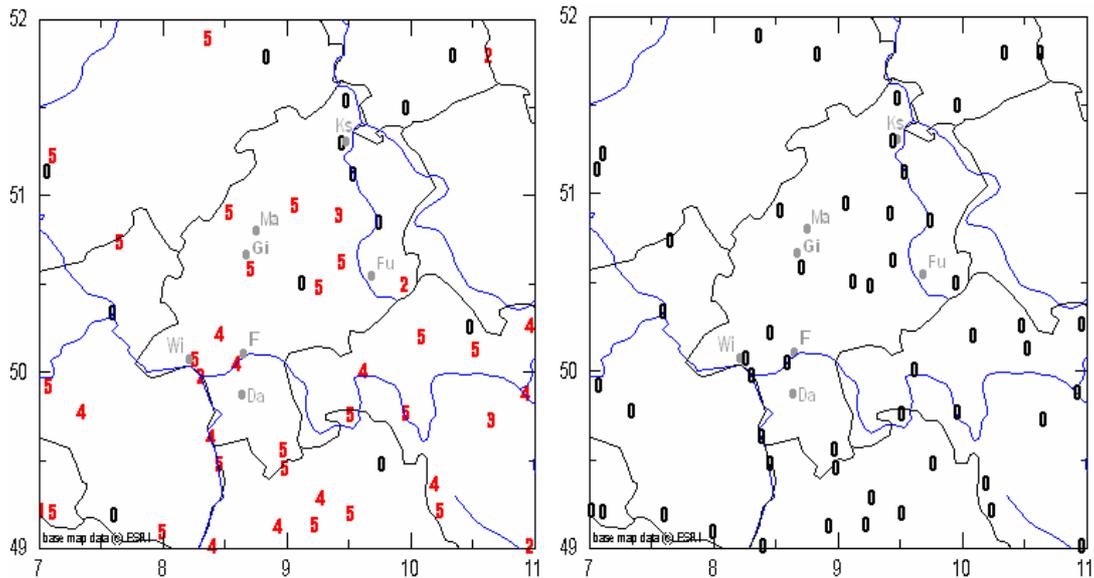


Abb. 22. Links Änderung des Lageparameters, rechts des Streuparameters der Wintertemperatur 1951-2000 an ausgewählten Stationen, rot Zunahme, blau Abnahme (hier nicht vorkommend) und schwarz (0) keine signifikante Änderung, wobei die Nummer die Ordnung der Änderung angibt (z.B. bedeutet links „5“ einen Trend 5. Ordnung, der somit besonders progressiv verläuft, d.h. sich im Laufe der Zeit besonders rasch verstärkt; „1“, hier nicht vorkommend, wäre ein linearer Trend).

Zunächst sollen wieder die Ergebnisse bezüglich der Temperaturdaten 1951-2000 exemplarisch beleuchtet werden. Dazu ist in Abb. 22 gezeigt, wie sich Lage- und Streuparameter der Wintertemperatur verändert haben (Kartenausschnitt wie bei den Trendkarten, vgl. Kap. 2, Abb. 4). Abb. 23 ist das Analogon für den Sommer. Man erkennt im Winter überwiegend Trends 5. Ordnung, d.h. einen stark beschleunigten Erwärmungstrend, zum Teil aber auch Trends 2. bis 4. Ordnung und an einigen Stationen, gehäuft im nordöstlichen Hessen, keinen signifikanten Trend. Der Streuparameter zeigt dagegen nirgendwo eine Änderung, so dass hinsichtlich der Extremwerte der Fall vorliegt, wie er in Abb. 21a (links oben) gezeigt ist, und somit die Veränderung des Extremverhaltens praktisch allein durch den Trend des Mittelwerts gesteuert wird. Zudem liegt in guter Näherung eine Normalverteilung vor.

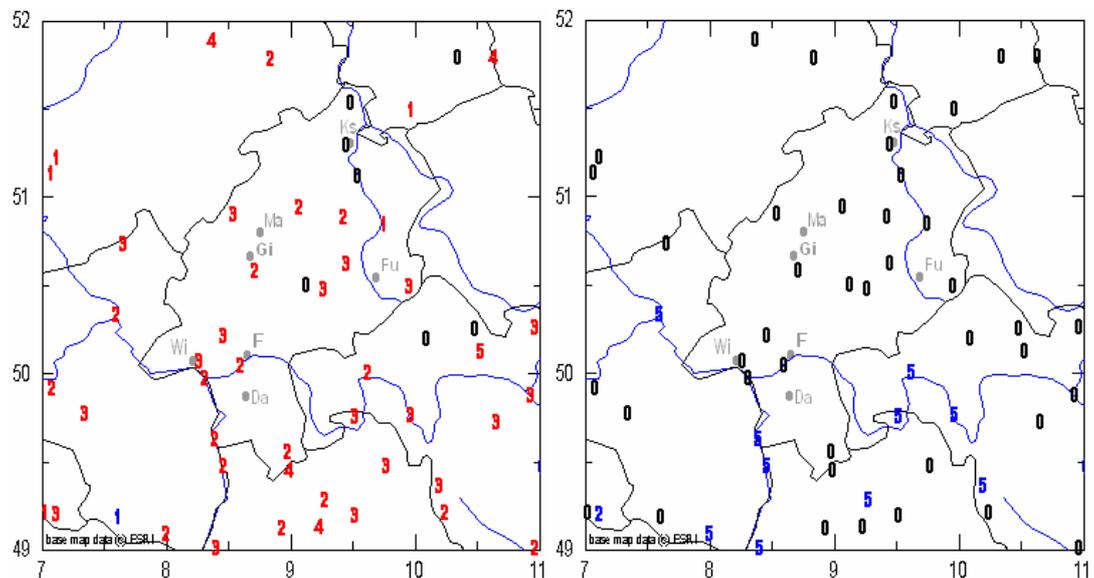


Abb. 23. Ähnlich Abb. 22, jedoch Sommer (links Trends des Lage-, rechts des Streuparameters).

Im Sommer, siehe Abb. 23, sind beim Lageparameter im wesentlichen nur die Trendordnungen etwas geringer, d.h. auch hier herrscht, mit Ausnahme des Nordostens, eine Erwärmung vor, jedoch sozusagen mit geringerer Dynamik. Der wesentliche Unterschied aber ist, dass es auch Trends im Streuparameter gibt, zwar nur im äußersten Süden Hessens und negativ (d.h. Abnahme der Streuung), aber mit hoher Ordnung, also sehr rasch.

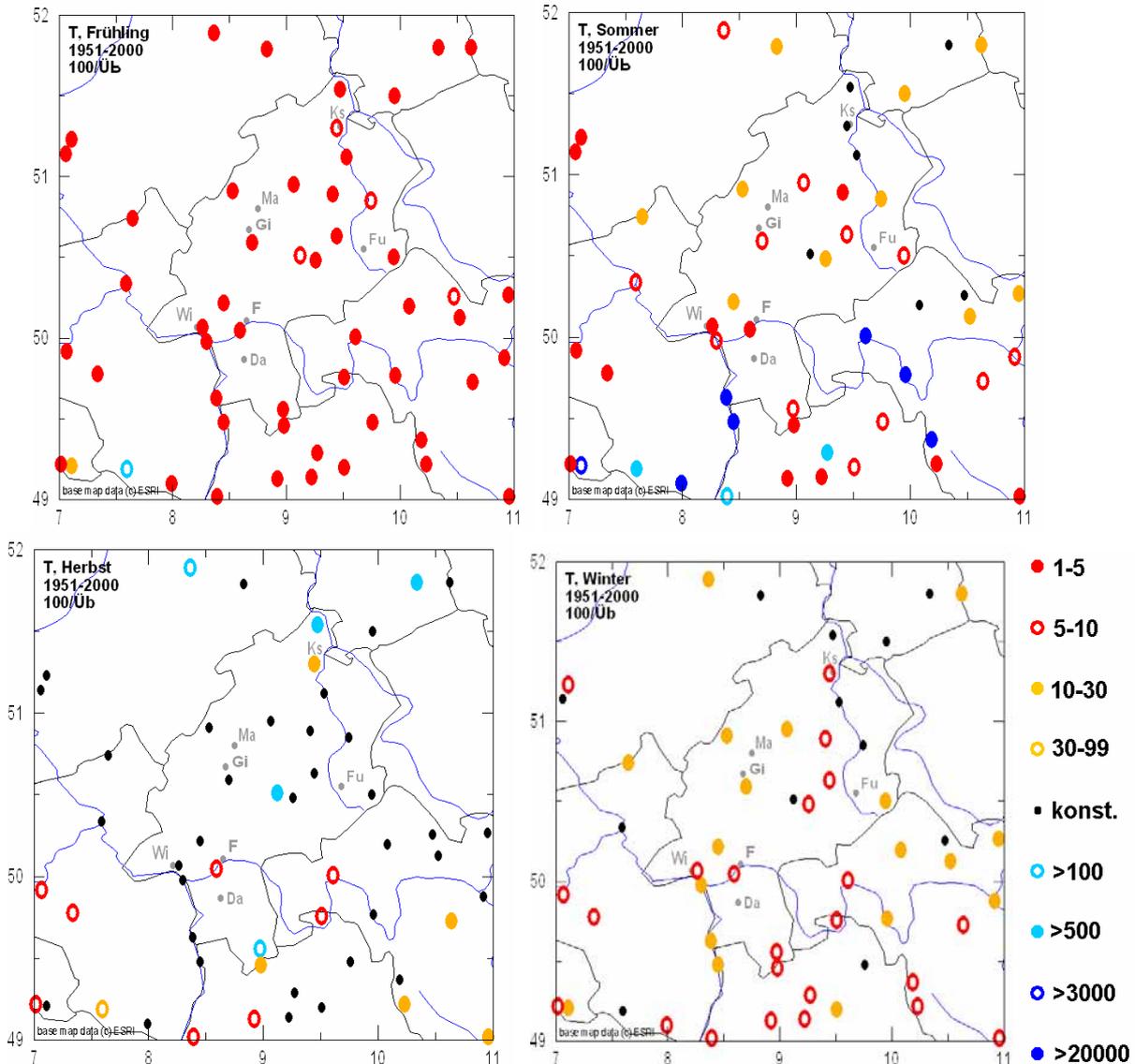


Abb. 24. Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem warmer Jahreszeiten, Datengrundlage 1951-2000, orientiert an einer Jährlichkeit von 100 Jahren (1%-Perzentil). In der Legende der Jährlichkeiten (rechts) bedeuten „>100“ → 101-500, „>500“ → 500-2999 und „>3000“ → 3000-19999.

Was bedeutet das nun konkret für die Extremwerte? Im folgenden wurden die Schwellen so gewählt, dass von einer sog. Jährlichkeit von 100 Jahren ausgegangen wird. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit liegt zu Beginn der betrachteten Zeitspanne bei 1%, so dass im statistischen Mittel (!) einmal pro Jahrhundert ein solches Ereignis zu erwarten ist; das entspricht dem 1%-Perzentil. Nun wird getrennt für die Überschreitungswahrscheinlichkeit, also das Eintreten extrem hoher Werte, und die Unterschreitungswahrscheinlichkeit, also das Eintreten extrem niedriger Werte, untersucht, ob und wie stark sich die Wahrscheinlichkeit dafür verändert hat. Wie stark kann beispielsweise bedeuten, dass aus einem 100-Jahre-Ereignis (Jährlichkeit 100 Jahre) ein 50- oder 10-Jahre-Ereignis (Jährlichkeit 50 bzw. 10 Jahre) geworden

ist. Umgekehrt kann bei Abnahme der Wahrscheinlichkeit daraus z.B. auch ein 200-Jahre-Ereignis werden.

In Abb. 24 sind die Ergebnisse hinsichtlich der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem warmer Jahreszeiten zusammengestellt, und zwar auf der Datengrundlage der Monatsmitteltemperaturen 1951-2000 und orientiert an einer Jährlichkeit von 100 Jahren. Man erkennt im Frühling überall Zunahmen, wobei die roten ausgefüllten Kreise eine Tendenz zu einer Jährlichkeit von 1-5 Jahren bedeuten, also eine enorme Zunahme; die leeren roten Kreise zeigen einen Übergang zu einer Jährlichkeit von 5-10 Jahren an. (Es folgen, siehe Legende Abb. 24, rechts, ockerfarbene Kreise, kleine schwarze Kreise für keine Änderung und hell- bzw. dunkelblaue Kreise für Wahrscheinlichkeitsabnahmen.) Im Sommer sind im äußersten Südwesten von Hessen auch Wahrscheinlichkeitsabnahmen erkennbar, somit eine Tendenz zu weniger extrem heißen Sommern, nicht jedoch in der Rhein-Main-Region. Im Winter dominieren deutliche, aber gegenüber dem Frühling geringere Zunahmen, im Herbst treten kaum Änderungen in Erscheinung. Es hat sich somit besonders deutlich im Frühling, aber auch im Winter und, etwas uneinheitlich, im Sommer ein Trend zu mehr extrem warmen Jahreszeiten eingestellt, nicht jedoch im Herbst.

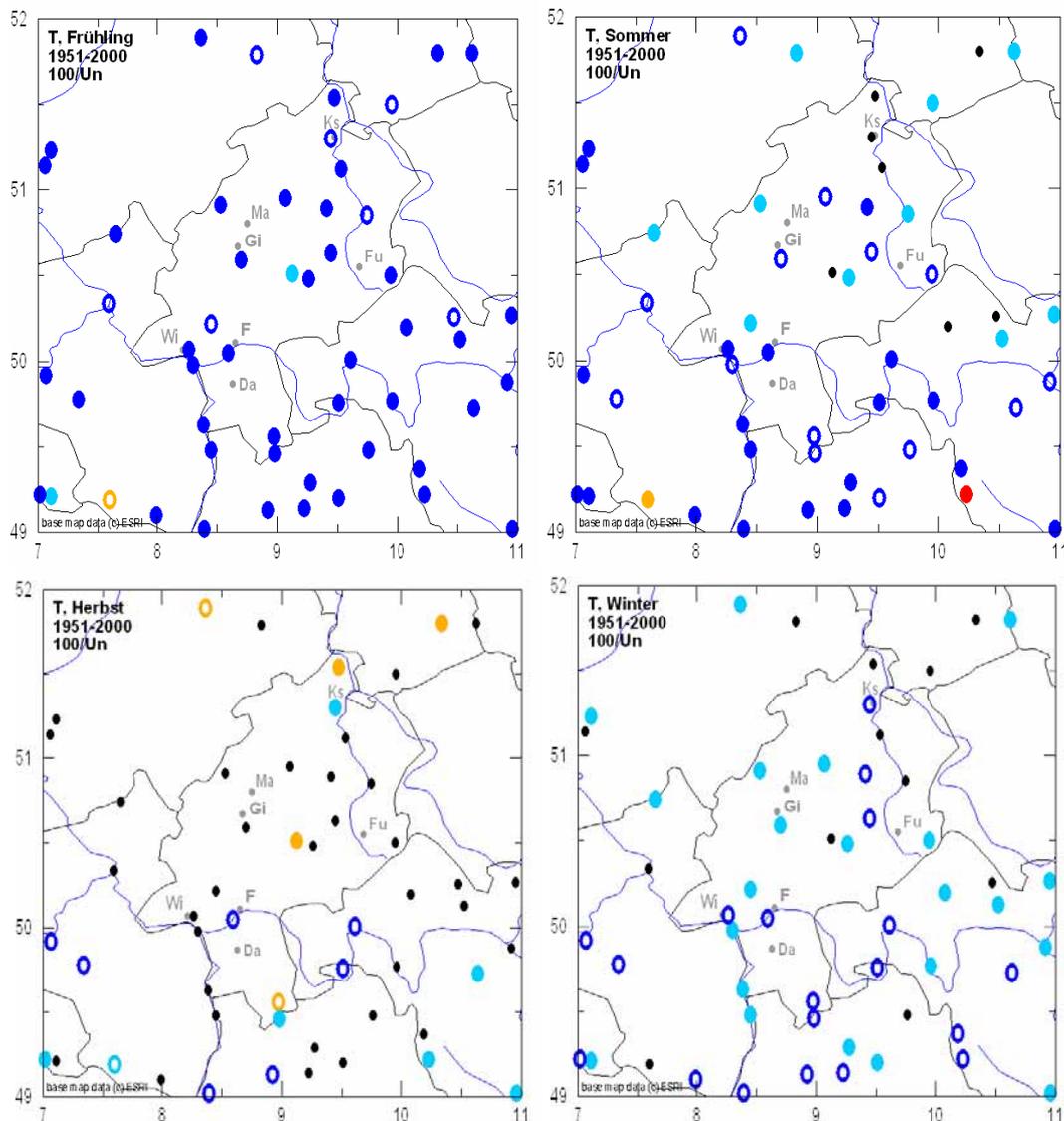


Abb. 25. Ähnlich Abb. 24, jedoch Trends der Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Legende siehe Abb. 24).

Die entsprechenden Karten für die Unterschreitungswahrscheinlichkeit und somit mögliche Tendenzen extrem kalter Jahreszeiten sind in Abb. 25 zu finden. Dabei sind die Ergebnisse wiederum für den Frühling besonders deutlich: Es besteht weitgehend flächendeckend eine Tendenz zur Wahrscheinlichkeitsabnahme eines extrem kalten Frühlings, entsprechend der Tendenz zur Zunahme eines extrem warmen Frühlings (vgl. Abb. 24); man kann somit von einer markanten Verschiebung der PDF in Richtung höherer Temperatur ausgehen (vgl. Schema in Abb. 21a). Im Sommer ist der Befund wiederum weniger einheitlich, jedoch nimmt überall in Hessen die Wahrscheinlichkeit extrem kalter Sommer ab, dies auch – und das recht deutlich – im äußersten Südwesten von Hessen (was eine Verringerung der Streuung bedeutet: die jeweils blauen Kreise zeigen sowohl weniger extrem warme als auch weniger extrem kalte Sommer an). Im Herbst zeigen sich nur ganz vereinzelt mäßige Tendenzen. Im Winter nimmt die Wahrscheinlichkeit extrem kalter Ereignisse überwiegend ab, jedoch nicht so stark, wie sie für warme Ereignisse zunimmt; teilweise gibt es bei der Unterschreitungswahrscheinlichkeit sogar überhaupt keine Tendenz. Das könnte eine der Erwärmung überlagerte größere Streuung bedeuten (vgl. Schema Abb. 21c; hier aber nicht signifikant).

Die Ergebnisse der monatlichen Analysen ergeben ein noch detailreicheres Bild. Es zeigt sich, dass in manchen Jahreszeiten einzelne Monate besonders ausgeprägte Änderungen des Extremverhaltens der Temperatur aufweisen – andere hingegen nicht. Diese Änderungen werden hier, wie auch bei den Jahreszeitenmitteln, in der überwiegenden Anzahl der Fälle durch Verschiebungen des Mittelwertes, nicht jedoch durch Änderungen der Standardabweichung, also der Streuung hervorgerufen (zu Einzelheiten siehe auch beiliegende CD-ROM mit weiteren Abbildungen).

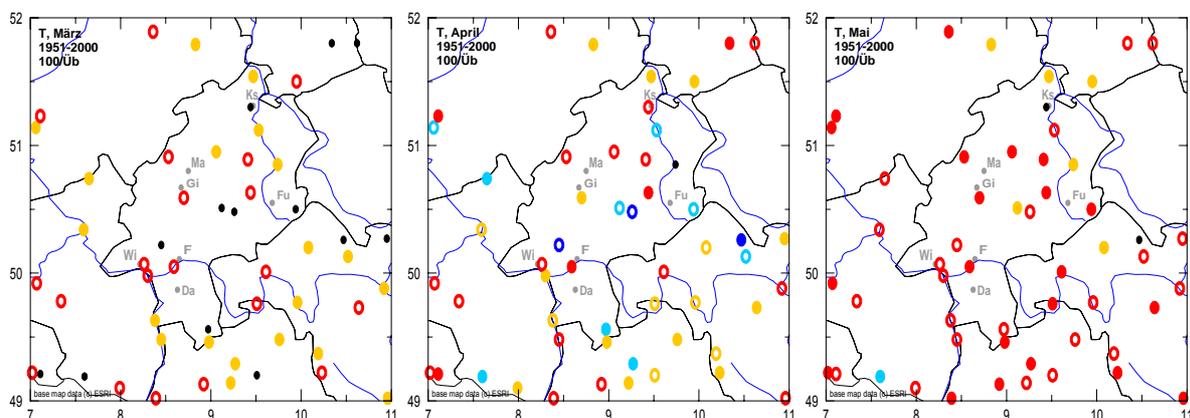


Abb. 26. Ähnlich Abb. 24, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate März, April und Mai (Legende siehe Abb. 24).

In Abb. 26 sind die Veränderungen von Jahrhundertereignissen bezogen auf das Jahr 1951 für extrem warme Monate März, April und Mai analog Abb. 24 dargestellt. Man erkennt, dass die deutliche Abnahme der Jährlichkeiten im Frühling (vgl. Abb. 24, oben links) vor allem im Mai auftreten (Abb. 26 rechts), im April dagegen treten sowohl Abnahmen, als auch Zunahmen der Jährlichkeit auf (Abb. 26, Mitte). Der März zeigt starke bis moderate Abnahmen der Jährlichkeiten bzw. Zunahmen extrem hoher Temperatur-Monatsmittel (Abb. 26, links).

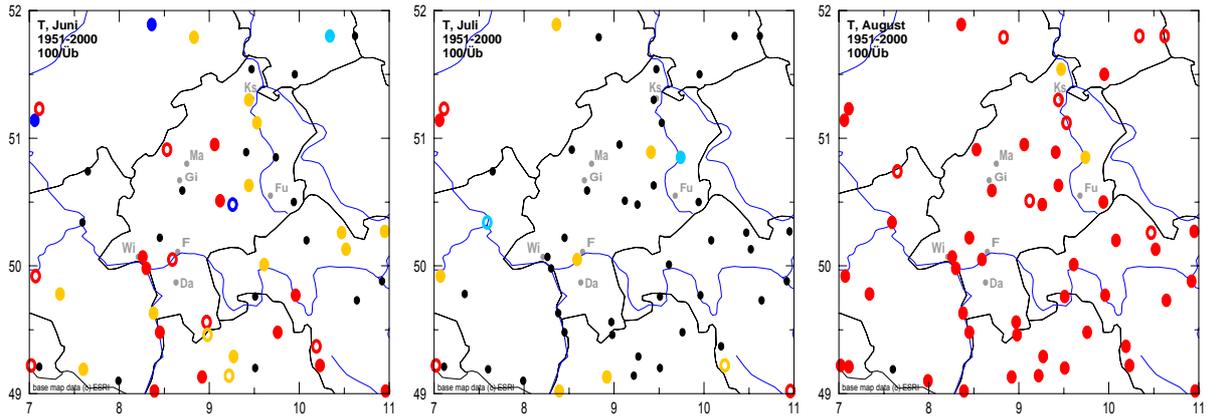


Abb. 27. Ähnlich Abb. 26, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate Juni, Juli und August (Legende siehe Abb. 24).

Im Sommer fällt besonders der August auf, der ausgeprägte Zunahmen extrem hoher Monatsmittel aufweist, siehe Abb. 27, rechts. Interessanterweise finden sich dagegen im Juli kaum Veränderungen (Abb. 27, Mitte), und im Juni verbreitet starke bis mäßige Zunahmen extrem hoher Monatsmittel (Abb. 27, links).

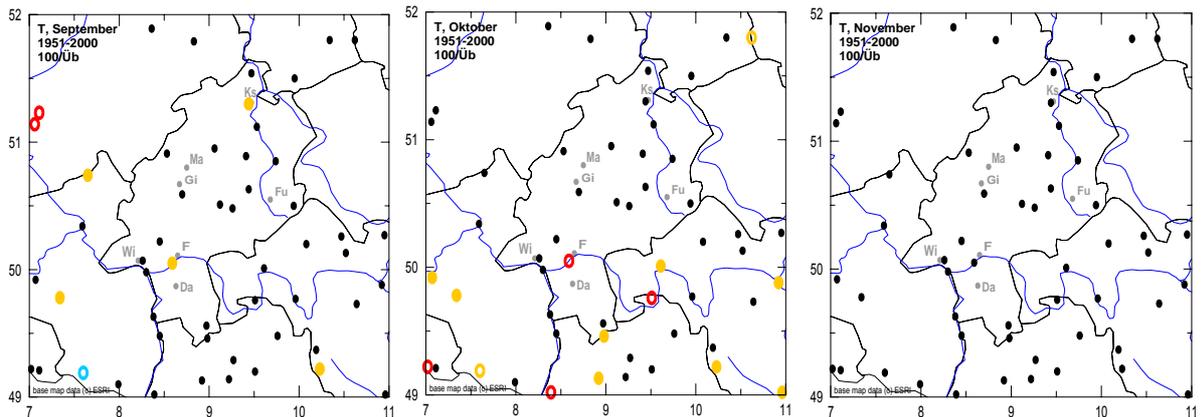


Abb. 28. Ähnlich Abb. 26, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate September, Oktober und November (Legende siehe Abb. 24).

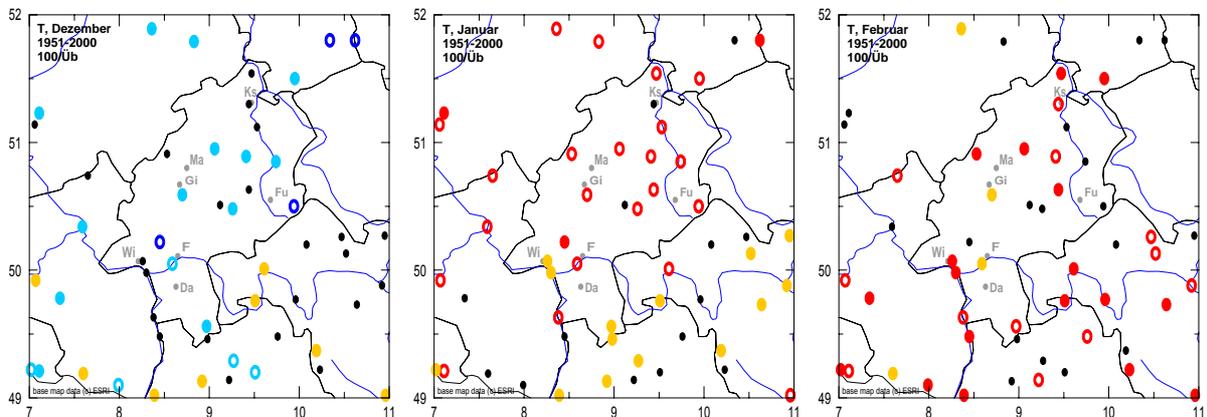


Abb. 29. Ähnlich Abb. 26, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate Dezember, Januar und Februar (Legende siehe Abb. 24).

Der Herbst ist durch auffallend geringe Änderungen der Jährlichkeiten charakterisiert (vgl. Abb. 24, unten links), was sich in allen Monaten bestätigt, siehe Abb. 28. Bemerkenswerterweise wurde im November an keiner Station eine signifikante Änderung der Jahrhundertereignisse detektiert (siehe Abb. 28 rechts).

Im Winter schließlich, der in der saisonalen Betrachtung moderate Zunahmen extrem warmen Jahreszeiten-Mittel aufweist (vgl. Abb. 24, unten rechts), zeigt sich wiederum ein recht inhomogenes Bild mit Abnahmen extrem hoher Dezember-Temperaturen (siehe Abb. 29, links) und Zunahmen im Januar und vor allem im Februar (siehe Abb. 29, Mitte und rechts).

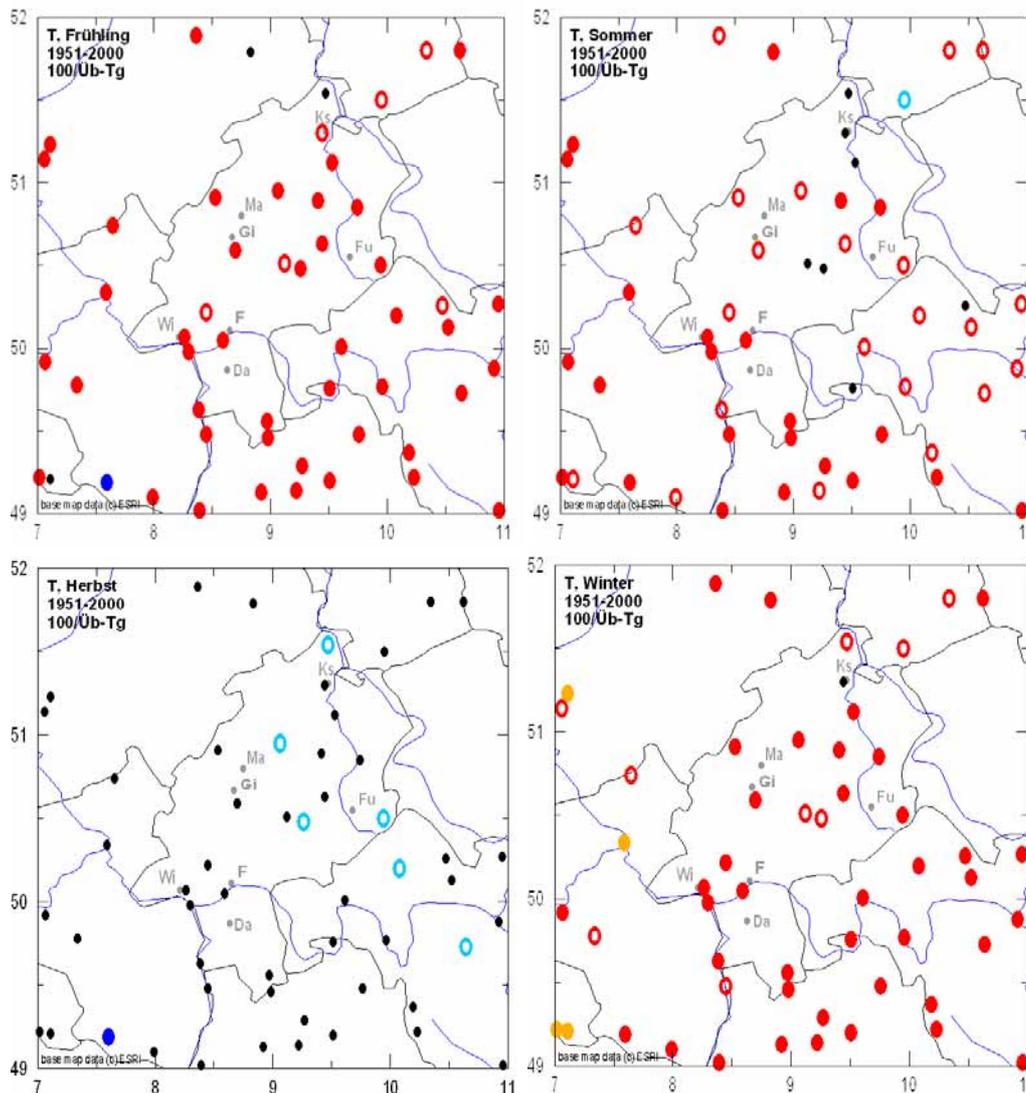


Abb. 30. Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem warmer Tage in den angegebenen Jahreszeiten, Datengrundlage 1951-2000, orientiert an einer Jährlichkeit von 100 Jahren (1%-Perzentil; Legende siehe Abb. 24).

Eine ähnliche Analyse wurde nun auch anhand der Temperatur-Tagesdaten 1951-2000 durchgeführt, siehe Abb. 30. Dabei geht es um die Frage, ob und in welchem Ausmaß die Anzahl extrem warmer (Überschreitung) bzw. kalter (Unterschreitung) Tage in den Jahreszeiten Winter, Sommer usw. zu- bzw. abgenommen hat. Die Schwellen wurden hierbei so gewählt, dass sie von 10 % aller Tageswerte über- bzw. unterschritten wurden (10%-Perzentil). Die Häufigkeiten dieser Über- bzw.

Unterschreitungen folgen nicht der Normverteilung, so dass jeweils eine Weibull-Verteilung angepasst wurde (statistische Details dazu siehe Schönwiese, 2000). Die Parameter dieser Verteilung sind nicht direkt mit denen der Normalverteilung vergleichbar. Daher werden gleich die Ergebnisse der Wahrscheinlichkeitsanalysen vorgestellt. Im Prinzip sind dabei nicht völlig andere Ergebnisse als bei der Monatsdatenanalyse zu erwarten (trotz ggf. anderer Verteilung), wie Abb. 30 auch zeigt; nur im Winter ist die Abnahme der Jährlichkeit deutlich größer als bei den Monatsdaten.

In Abb. 31 folgen die entsprechenden Ergebnisse für die Unterschreitungswahrscheinlichkeit. Dabei entspricht das Herbst-Bild weitgehend der Analyse der Überschreitungswahrscheinlichkeit: überwiegend keine Änderung, teilweise geringe Abnahmen. Der Frühling zeigt wiederum sehr einheitlich ausgeprägte Tendenzen, hier der Abnahme kalter Tage. Sommer und diesmal auch Winter geben sich uneinheitlich. Im Winter überwiegt der Befund keiner Änderung, d.h. die Häufigkeit extrem kalter Tage nimmt weder ab noch zu; Ausnahmen: um Fulda herum teilweise Abnahmen, im äußersten Südwesten Zunahme. Im Sommer gibt es in der Region Kassel eine Tendenz zur Zunahme extrem kalter Tage (schwächer ausgeprägt auch im äußersten Südwesten), in der Rhein-Main-Region sowie um Fulda herum dagegen zur Abnahme.

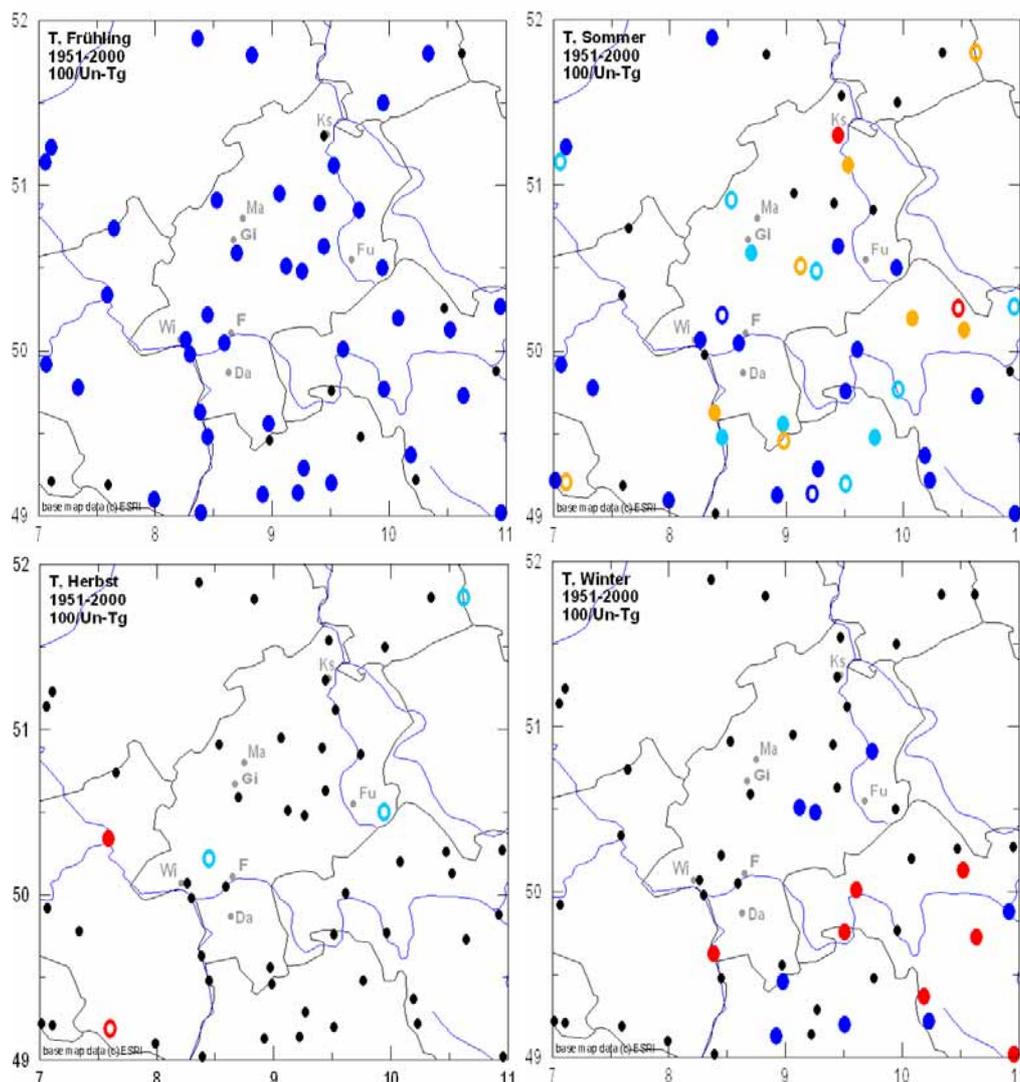


Abb. 31. Ähnlich Abb. 30, jedoch Trends der Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Legende siehe Abb. 24).

Bei der Extremwertanalyse der Niederschlagsdaten ergibt sich das Problem, dass die daran am besten angepasste Gumbelverteilung von geringen Werten ausgehend einen so steilen Anstieg der PDF aufweist, dass die Schätzung von Unterschreitungswahrscheinlichkeiten keine statistisch hinreichend stabilen Ergebnisse liefert. Außerdem ist die Gumbel-Verteilung nicht nach unten beschränkt, so dass sich unter Umständen negative Niederschlagswerte bei der Schätzung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit unterer Schwellen ergeben würden. Aus diesem Grund wurden nur die Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeiten berechnet, wiederum beginnend mit den Monatsdaten 1951-2000.

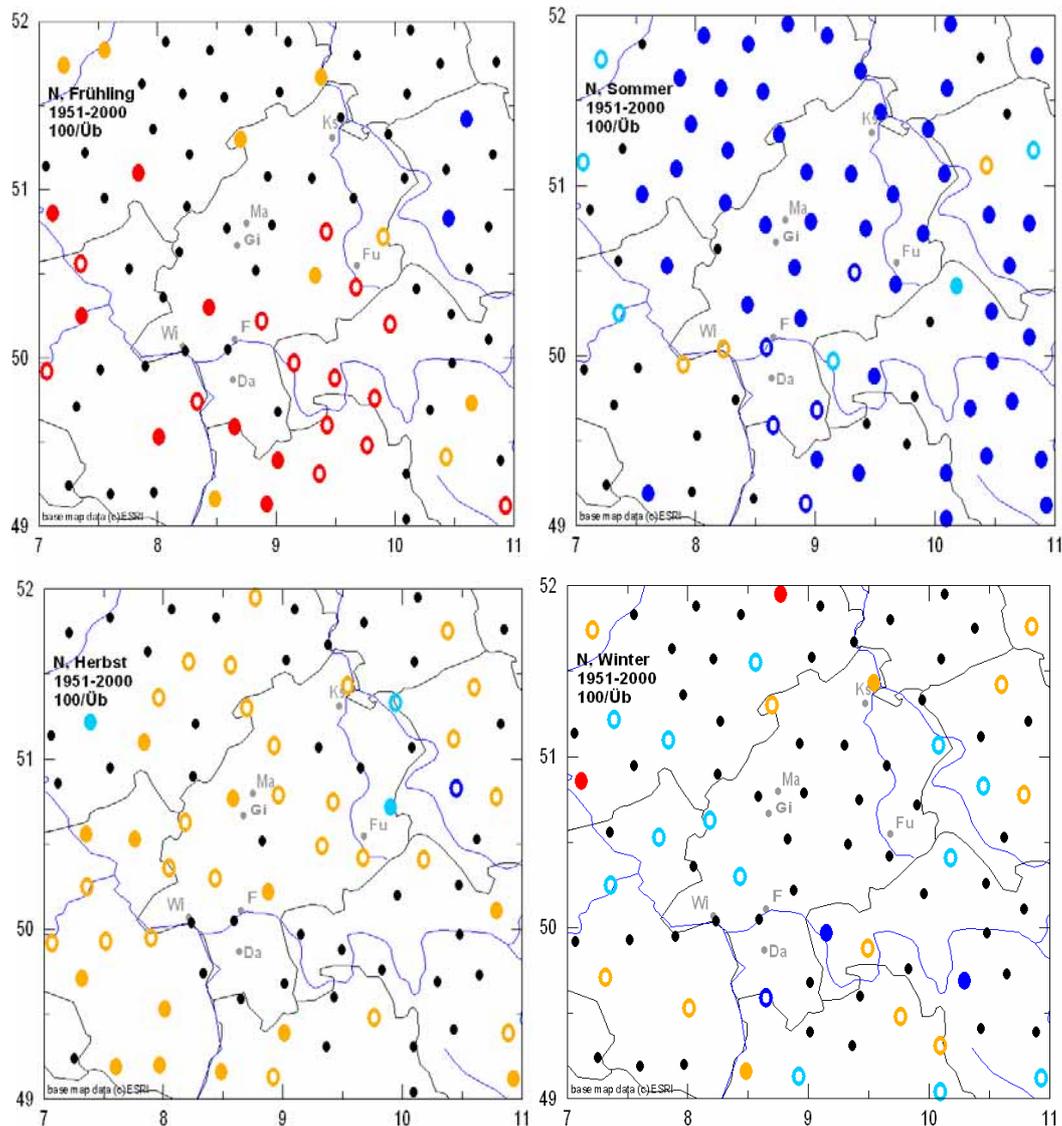


Abb. 32. Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem niederschlagsreicher Jahreszeiten, Datengrundlage 1951-2000, orientiert an einer Jährlichkeit von 100 Jahren (1%-Perzentil; Legende siehe Abb. 24).

Die jahreszeitlich differenzierten Ergebnisse sind aus Abb. 32 ersichtlich. Dabei zeigt der Winter – im Vergleich zu den Trendergebnissen erstaunlicherweise – keine Neigung zu mehr extrem niederschlagsreichen Monaten (im südlichen Randbereich sogar eine zurückgehende Neigung) und im Herbst eine moderate Zunahme. Dagegen ist im Frühling in Mittel- und Südhessen eine solche Neigung zu erkennen, diesmal in gewisser Übereinstimmung mit den Trends der Mittelwerte. Besonders auffällig ist aber wieder einmal der Sommer: Die Tendenz zu extrem

niederschlagsreichen Monaten geht in dieser Jahreszeit verbreitet und sehr ausgeprägt zurück, Hand in Hand mit den ebenfalls verbreiteten und deutlichen Rückgängen der mittleren Niederschläge (Ausnahme: südwestliche Teilregion Hessens entlang des Rheins).

Die Ergebnisse der monatlich aufgelösten Daten zeigen, wie auch schon bei der Temperatur (vgl. Abb. 26 bis 29), ein gegenüber den saisonalen Summen differenzierteres Bild. Im Frühling findet sich das räumliche Muster der jahreszeitlichen Analyse (vgl. Abb. 32, oben links) in keinem der betrachteten Monate wieder; siehe Abb. 33. Im März zeigen sich auffällige Zunahmen extrem hoher Monatssummen vor allem im Nordwesten des Untersuchungsgebietes (Abb. 33, links), was gut mit den beobachteten Trends in diesem Zeitraum im Einklang steht (vgl. Abb. 18a, Mitte links). Der April weist dagegen kaum Änderungen im Extremverhalten auf (Abb. 33, Mitte); der Mai zeigt teilweise Veränderungen unterschiedlichen Vorzeichens (Abb. 33, rechts).

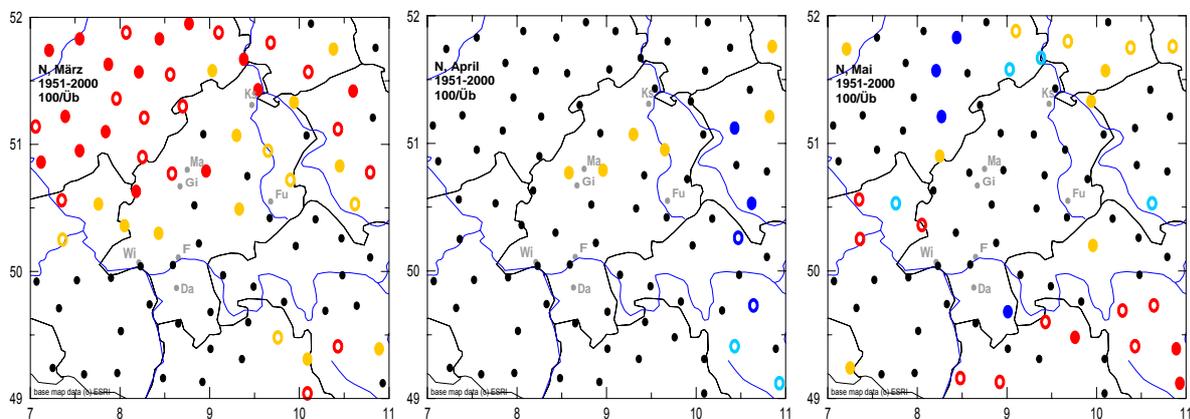


Abb. 33. Ähnlich Abb. 32, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate März, April und Mai (Legende siehe Abb. 24).

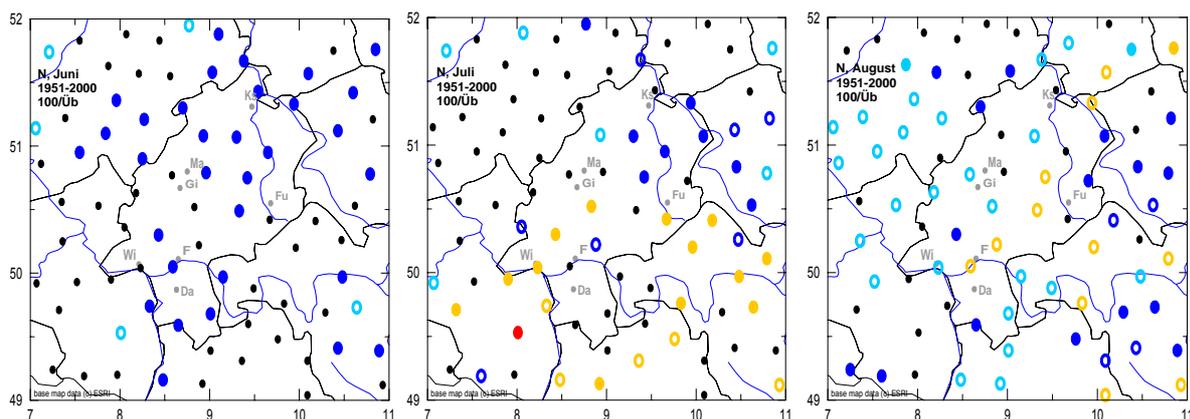


Abb. 34. Ähnlich Abb. 33, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate Juni, Juli, und August (Legende siehe Abb. 24).

Die auffällige Abnahme extrem feuchter Sommer (vgl. Abb. 32, oben rechts) findet sich auch in den Monatssummen, jedoch vor allem im Juni und August; siehe Abb. 34, links und rechts. Der Juli unterscheidet sich hiervon durch eine Zweiteilung: Im Norden bzw. Nordosten finden sich Abnahmen, im Süden dagegen überwiegend Zunahmen extrem feuchter Monate (Abb. 34, Mitte).

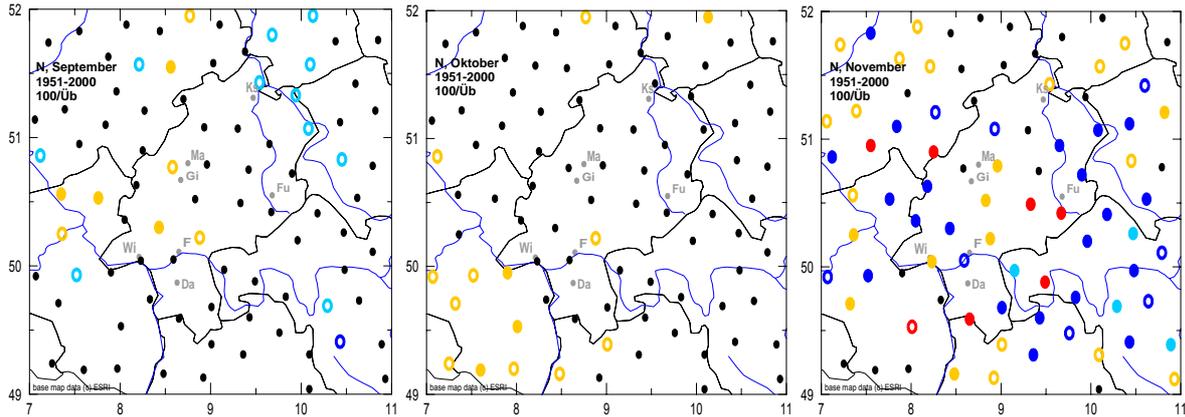


Abb. 35. Ähnlich Abb. 33, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate September, Oktober, und November (Legende siehe Abb. 24).

Der Herbst ist in der saisonalen Betrachtung durch gemäßigte Zunahmen extrem hoher Monatssummen charakterisiert (vgl. Abb. 32, unten links). Dies findet sich in den Monatssummen nicht wieder, siehe Abb. 35: Im Oktober zeigen sich zwar leichte Zunahmen, jedoch nur im Südwesten des Untersuchungsgebietes (Abb. 35, Mitte). Im September finden sich nur vereinzelte und uneinheitliche Änderungen, der November zeigt ein auffälliges Muster teilweise starker Änderungen unterschiedlichen Vorzeichens. Dies deutet erneut (vgl. Trend-Analysen, Kap. 3) auf die teilweise starke Variabilität des Niederschlages hin, die in manchen Fällen schwer interpretierbar ist.

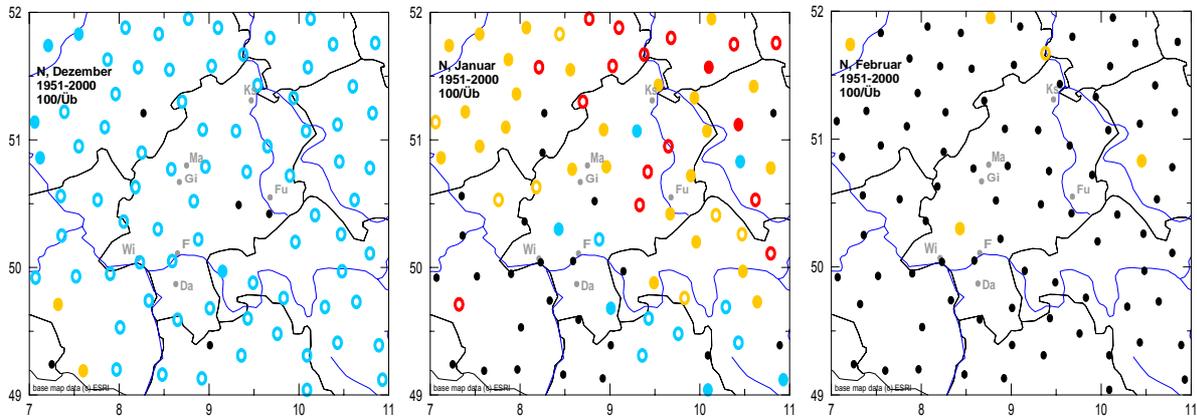


Abb. 36. Ähnlich Abb. 33, jedoch Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Monate Dezember, Januar, und Februar (Legende siehe Abb. 24).

Der Winter weist in seiner saisonalen Betrachtung ein recht uneinheitliches Änderungsmuster auf (vgl. Abb. 32, unten rechts): Die einzelnen Monate unterscheiden sich jedoch deutlich; siehe Abb. 36. So findet sich im Dezember an fast allen Stationen ein Rückgang feuchter Extrema (Abb. 36, links). Im Gegensatz dazu zeigt der Januar, vor allem in Nordhessen Zunahmen extrem feuchter Monatssummen (Abb. 36, Mitte). Der Februar schließlich weist kaum Änderungen im Extremverhalten auf. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass Trend- (vgl. Abb. 18) und Extremwertverhalten nicht zwingend im Einklang stehen müssen, sondern, dass Extreme durch mitunter komplizierte Veränderungen der Häufigkeitsverteilung gesteuert werden, die sich nicht allein durch Trends beschreiben lassen, sondern eben auch durch Variationen der Streuung beeinflusst werden (vgl. auch Abb. 21).

Beim Übergang auf die Analyse von Tagesdaten zeigen sich wieder einige bemerkenswerte Unterschiede gegenüber den Monatsdaten. So sind, siehe Abb. 37, im Frühling die Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem hoher Tagesniederschläge deutlich uneinheitlicher als bei den Monatsdaten: Es gibt nur noch vereinzelt Zunahmen, in Nordhessen an zwei Stationen deutliche Abnahmen und überwiegend keine signifikante Änderung. Im Sommer herrscht noch immer die Wahrscheinlichkeitsabnahme vor, jedoch gibt es nun in etwa von Frankfurt bis Gießen und östlich bis Fulda größere Teilbereiche ohne signifikante Änderungen, so dass dort die Wahrscheinlichkeit extrem hoher Sommerniederschläge erhalten geblieben ist. Dagegen ist im Herbst nun fast überall eine deutliche Zunahme erkennbar, im Winter interessanterweise in fast allen Randbereichen Hessens ebenfalls, aber nicht im zentralen Hessen (Region Gießen - Marburg), wo auch Abnahmen auftreten. Erwähnenswert ist außerdem, dass um Hessen herum die Eintrittswahrscheinlichkeit extrem hoher Tagesniederschläge im Herbst und Winter verbreitet zunimmt, was eine stärkere Hochwassergefährdung bedeutet.

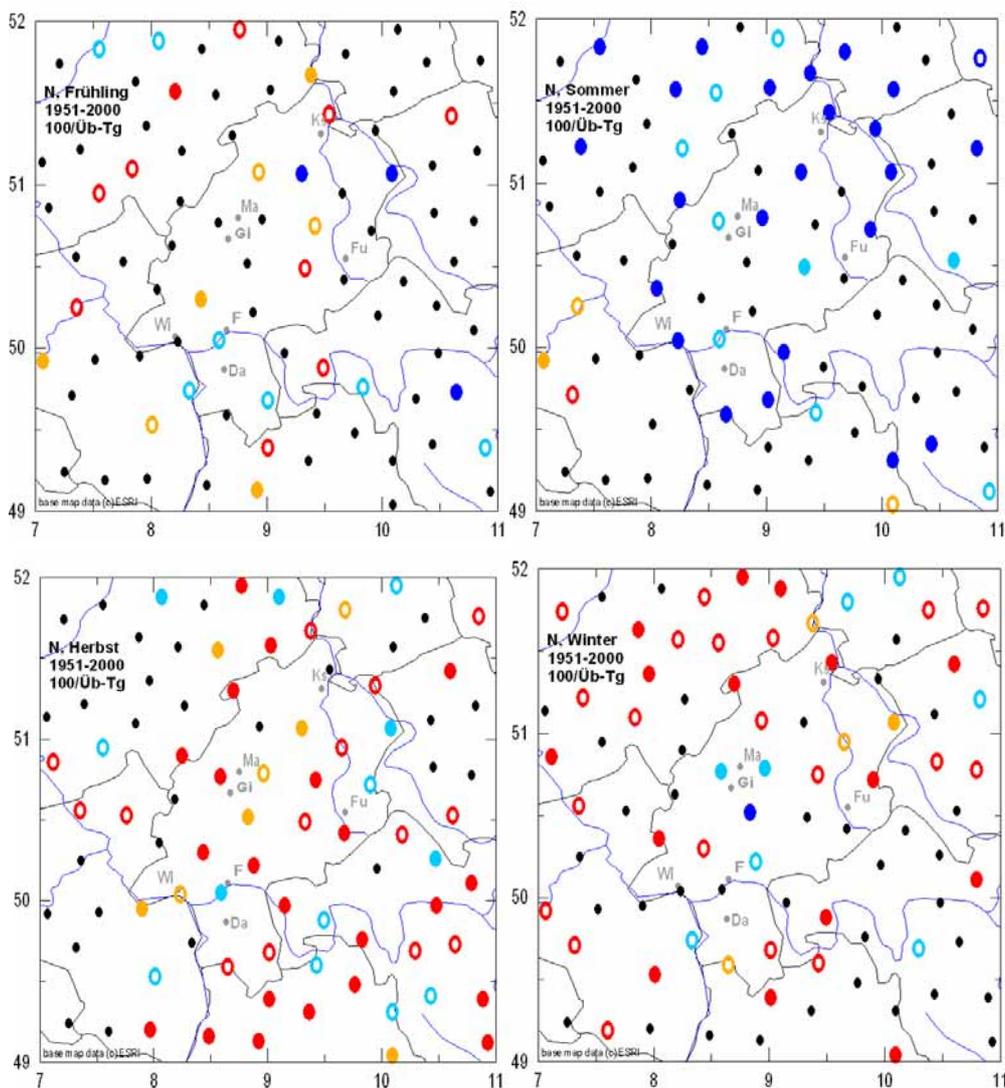


Abb. 37. Trends der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem niederschlagsreicher Tage in den angegebenen Jahreszeiten, Datengrundlage 1951-2000, orientiert an einer Jährlichkeit von 100 Jahren (1%-Perzentil; Legende siehe Abb. 24).

5.2 Zeitintervall 1901 - 2003

Wie bei den Trendanalysen (vgl. Tab. 3 und 5) standen für die Langzeitbetrachtung 1901-2003 nur die Daten weniger Stationen zur Verfügung, so dass die Ergebnisse wiederum nur in Tabellenform zusammengestellt sind. Dabei bietet es sich aber zunächst an, sich die Änderungen der Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Extremwerten anhand ausgewählter PDF (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen) anzusehen. Die geschieht in Abb. 38 für die Temperatur (Jahresdaten) und den Niederschlag (Winter- und Sommerdaten), und zwar jeweils so, dass die PDF am Beginn des betrachteten Zeitintervalls (1901) mit der Form verglichen wird, zu der sie sich bis zum Ende hin (2003) entwickelt hat.

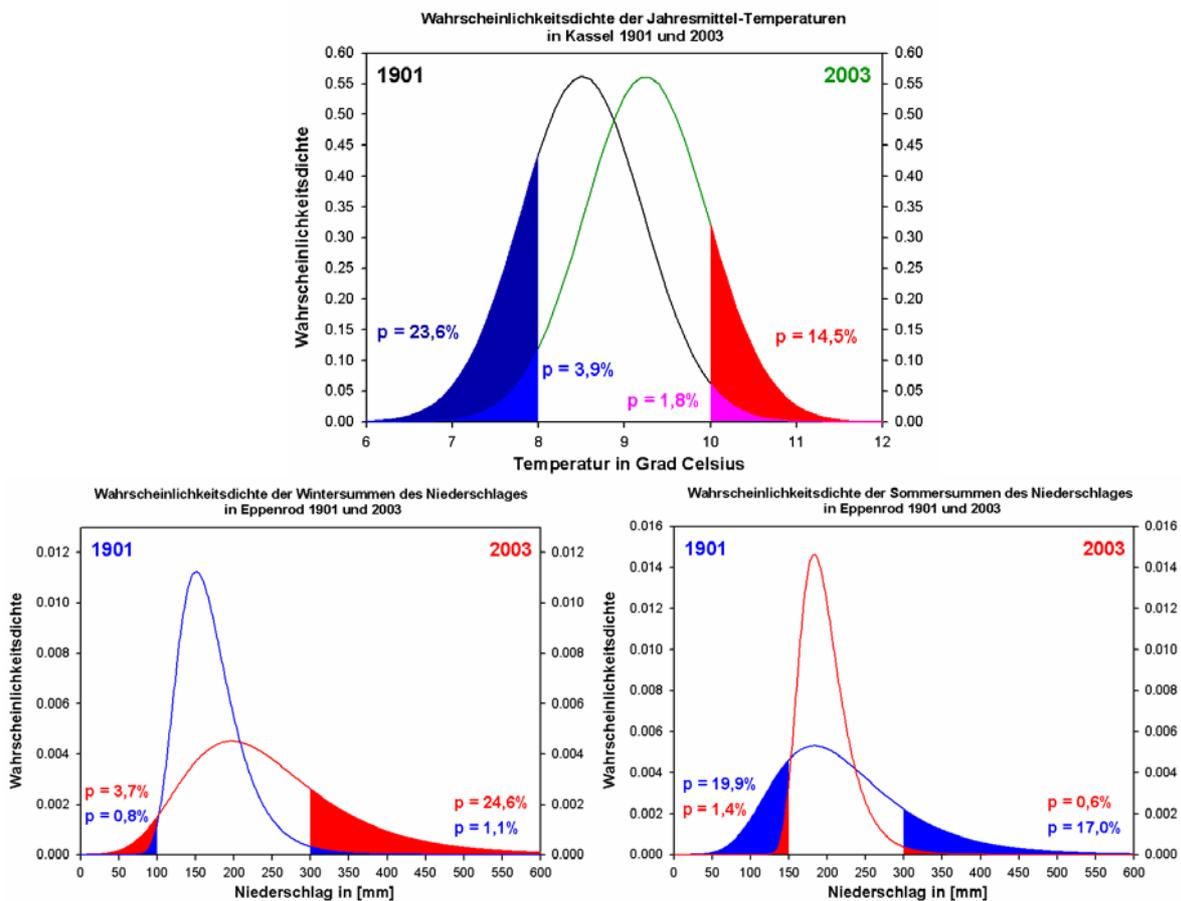


Abb. 38. Veränderung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) 2003 (grün bzw. rot) gegenüber 1901 (schwarz bzw. blau) mit Angabe der entsprechenden Änderungen der Über- sowie Unterschreitungswahrscheinlichkeit für bestimmte obere und untere Schwellenwerte; oben Temperatur-Jahresdaten Kassel, unten Niederschlagssummen Eppenrod, links Winter und rechts Sommer.

Dabei zeigt das Temperaturbeispiel (Kassel, Normalverteilung; Abb. 38, oben) eine „formtreue“ Verschiebung (entsprechend dem Schema Abb. 21a), die zu einem Anstieg der Überschreitungswahrscheinlichkeit der Schwelle 10 °C von 1,8 % auf 14,4 % und einem entsprechenden Rückgang der Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Schwelle 8 °C von 23,6 % auf 3,9 % geführt hat. Dagegen hat sich beim Niederschlag-Beispiel (Eppenrod, Gumbelverteilung) im Winter (Abb. 38, unten links) sowohl eine Verschiebung in Richtung höherer Werte als auch eine Verbreiterung (entsprechend dem Schema Abb. 21c) eingestellt, so dass zwar vor allem die Über-, in geringem Maß aber auch die Unterschreitungswahrscheinlichkeit zugenommen hat

(extremes Verhalten). Im Sommer (Abb. 38, unten rechts) dominiert dagegen eine Tendenz zu einer schmalen (konzentrierter) werdenden Verteilung, so dass ungefähr im gleichen Ausmaß die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit abgenommen haben (weniger extremes Verhalten).

Es folgen nun zunächst für die Temperatur und dann für den Niederschlag stationsbezogene Tabellen, und zwar zuerst für die Jahreszeiten und Jahr, die zunächst die Veränderung der Zeitreihencharakteristika angeben (Trend und Trendordnung des Lage- und Streuparameters sowie der polynomialen Komponente) und daraus resultierend die Änderungen der Extremwertwahrscheinlichkeiten in Orientierung sowohl an eine Jährlichkeit von 100 Jahren (entsprechend dem 1 % Perzentil) als auch von 10 Jahren (entsprechend dem 10 % Perzentil). Unter der noch nicht erwähnten polynomialen Komponente versteht man eine tieffrequente Zeitreihenfluktuation mit so wenigen relativen Maxima bzw. Minima, dass sie zwar einerseits keinen Trend (vgl. Kap. 3) darstellt, andererseits aber auch nicht als zyklische Fluktuation (vgl. Kap. 4) identifizierbar ist.

Tab. 6. Temperatur Frankfurt/M., 1901-2003, Änderung der Zeitreihenkomponenten (Lageparameter „Lage“, polynomiale Komponente „Poly“ und Streuparameter „Streu“) und daraus Änderungen der Über- („O“) sowie Unter- („U“) -schreitungswahrscheinlichkeit für die Jährlichkeit 10 Jahre (entsprechend dem 10%-Perzentil, „10“) sowie 100 Jahre (entsprechend dem 1%-Perzentil, „100“). Die Überschreitung bezieht sich auf extrem warme, die Unterschreitung auf extrem kalte Jahreszeiten; rote Zahlen zeigen steigende Tendenz an (extremer), blaue abnehmende (weniger extrem), wobei auch jeweils angegeben ist, welche Jährlichkeit sich, ausgehend vom Jahr 1901, bis zum Jahr 2003 eingestellt hat. Alle Angaben zudem differenziert für die Jahreszeiten und das Jahr.

Frankfurt am Main 1901 – 2003					
T	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	5	5	5	1	5
Poly	0	0	4	0	0
Streu	0	0	0	-1	0
10-O	2.5	1.5	1.1	2.2	1.1
100-O	10.0	3.4	1.7	25.7	1.4
10-U	101	906	13500	28300	63300
100-U	2700	49400	>10 ⁶	>10 ⁶	>10 ⁶

Tab. 7. Ähnlich Tab. 6, jedoch Geisenheim.

Geisenheim 1901 – 2003					
T	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	5	5	1	5
Poly	3	3	0	0	0
Streu	0	0	4	-1	0
10-O	2.2	1.4	1.5	3.7	1.3
100-O	7.9	3.3	2.4	79.6	2.7
10-U	148	1040	53.9	2780	2040
100-U	4530	59300	333	>10 ⁶	>10 ⁵

Tab. 8. Ähnlich Tab. 6, jedoch Kassel.

Kassel 1901 – 2003					
T	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	5	1	1	1
Poly	0	0	0	-2	0
Streu	1	0	0	0	0
10-O	4.9	3.2	2.0	3.6	2.5
100-O	15.4	16.3	6.5	19.1	10.1
10-U	4.9	51.6	210	42.5	99.2
100-U	15.4	1070	7290	818	2640

Tab. 9. Ähnlich Tab. 6, jedoch Karlsruhe.

Karlsruhe 1901 – 2003					
T	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	5	5	4	1	3
Poly	0	0	0	0	0
Streu	0	0	0	-1	0
10-O	2.1	1.1	1.1	1.4	1.0
100-O	7.3	1.7	1.5	7.7	1.2
10-U	170	15700	45300	$>10^5$	$>10^5$
100-U	5460	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$

Den Tabellen 6-9 ist zu entnehmen, dass langfristig gesehen die Temperatur fast überall und in allen Jahreszeiten ansteigt, da die Lageparameter-Änderungen positiv sind (Ausnahmen: Winter in Kassel und Geisenheim), die Streuung meist unverändert bleibt und die polynomiale Komponente nur hin und wieder eine Rolle spielt (so z.B. in Geisenheim, wo sie an Stelle des Trends die winterliche Erwärmung bewirkt). Dementsprechend nehmen (mit der einzigen Ausnahme Kassel im Winter) die Überschreitungswahrscheinlichkeiten generell zu und die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ab. Das ist zum Teil recht dramatisch: So ist z.B. in Frankfurt/Main im Sommer aus einem extrem warmen 100-Jahre-Ereignis (Überschreitung) bis 2003 ein 1,7-Jahre-Ereignis geworden. Auch an den anderen Stationen ist die Änderung im Sommer besonders drastisch. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten haben in den meisten Fällen bis zur Unmöglichkeit abgenommen (falls $U > 10^5$ oder $> 10^6$).

Bei den monatlich differenzierten Analysen (siehe Anhang, A.7) zeigt sich für Frankfurt und Karlsruhe ein den saisonalem Mitteln vergleichbares Bild mit positiven Trends im Lageparameter in weitgehend allen Monaten, ohne Veränderungen im Streuparameter, mit Ausnahme April in Frankfurt, und ohne signifikante polynomiale Komponenten des Lageparameters (Ausnahme wiederum April in Frankfurt und Juni in Karlsruhe). An den Stationen Kassel und Geisenheim wurden jedoch in den Monatsmitteln weit weniger signifikante Veränderungen der Verteilungs-Parameter gefunden: In Geisenheim zeigen sich nur im März und in der zweiten Jahreshälfte positive Trends im Lageparameter, in Kassel sogar nur im Juli und August. Der April weist hier noch eine Abnahme der Streuung auf, polynomiale Komponenten finden sich im August (positiv) und im September und November (jeweils negativ).

Die Tabellen 10-19 bringen die entsprechenden Ergebnisse für die Niederschlagsanalyse (Alsfeld und Bad Camberg wegen unvollständiger Daten nur bis 2001), wobei aus den bereits genannten Gründen nur die Überschreitungswahrscheinlichkeit berechnet wurde. Diese Ergebnisse fallen wiederum deutlich differenzierter aus als bei der Temperatur. So konnten weder für das Jahr insgesamt noch für den Herbst signifikante Änderungen des Streuparameters festgestellt werden, wohl aber – bis auf wenige Ausnahmen – für die anderen Jahreszeiten. Beim Lageparameter zeigt die Hälfte der betrachteten Stationen im Winter Zunahmen, im Sommer eine Station eine Abnahme (die anderen keine signifikante Änderung). Bei den Überschreitungswahrscheinlichkeiten (Jährlichkeit 100 bzw. 10 Jahre) weisen im Winter alle Stationen (außer Geisenheim) eine Zunahme auf, im Frühling fast alle und im Herbst der überwiegende Teil. Dies deutet einmal mehr auf deutliche regionale Unterschiede innerhalb Hessens hin. Drastische Einzelbeispiele sind: in Alsfeld Rückgang der Jährlichkeit eines extrem feuchten Winters von 100 auf 5,6 Jahre; in Bad Camberg Anstieg für einen extrem feuchten Sommer praktisch bis zur Unmöglichkeit.

Tab. 10. Ähnlich Tab. 6, jedoch Niederschlag in Göttingen und lediglich Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

Göttingen (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	2	0	0	0
Poly	2	0	0	0	0
Streu	1	0	0	0	0
10-O	2.3	5.2	10	10	10
100-O	4.8	50.5	100	100	100

Tab. 11. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Alsfeld.

Alsfeld (1901 – 2001)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	0	0	5	0
Poly	2	-4	0	0	-2
Streu	1	2	-5	0	0
10-O	2.6	11.2	124	4.6	8.1
100-O	5.6	47.4	18800	43.7	80.3

Tab. 12. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Greifenstein.

Greifenstein (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	0	0	3	2
Poly	2	0	0	0	0
Streu	1	0	0	0	0
10-O	2.2	10	10	4.5	4.1
100-O	4.7	100	100	41.3	38.2

Tab. 13. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Eppenrod.

Eppenrod (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	2	1	0	4	1
Poly	0	0	0	0	0
Streu	1	0	-5	0	0
10-O	2.0	4.8	937	4.7	4.6
100-O	4.2	45.6	>10 ⁶	44.6	43.2

Tab. 14. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Bad Camberg.

Bad Camberg (1901 – 2001)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	1	1	0	0	0
Poly	0	0	0	0	0
Streu	1	0	-5	0	0
10-O	2.3	5.2	594	10	10
100-O	6.1	49.1	>10 ⁵	100	100

Tab. 15. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Mainz.

Mainz (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	4	2	0	5	2
Poly	0	0	0	0	0
Streu	0	1	0	0	0
10-O	3.3	2.3	10	3.2	4.7
100-O	29.7	7.5	100	29.1	43.7

Tab. 16. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Eberbach/Neckar.

Eberbach/Neckar (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	3	0	0	5	0
Poly	2	2	0	0	0
Streu	1	1	0	0	0
10-O	1.8	3.0	10	4.8	10
100-O	3.5	8.7	100	45.1	100

Tab. 17. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Aschaffenburg.

Aschaffenburg (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	0	-5	0	0
Poly	0	0	0	0	-2
Streu	1	1	0	0	0
10-O	3.5	4.2	22.3	10	9.0
100-O	10.0	15.0	228	100	89.1

Tab. 18. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Frankfurt/Main.

Frankfurt/Main (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	0	-5	0	0
Poly	0	0	3	0	0
Streu	1	0	0	0	0
10-O	4.1	10	8.3	10	10
100-O	14.3	100	83.8	100	100

Tab. 19. Ähnlich Tab. 6 bzw. 10, jedoch Geisenheim.

Geisenheim (1901 – 2003)					
N	Win	Frü	Som	Her	Jahr
Lage	0	0	0	0	0
Poly	0	0	0	0	0
Streu	0	0	0	0	0
10-O	10	10	10	10	10
100-O	100	100	100	100	100

Dieses sehr differenzierte Bild zeigt sich verstärkt auch bei den Analysen der Monatssummen, was den Tabellen A.7 im Anhang entnommen werden kann. Auffällig ist auch dort eine häufige Abnahme extrem feuchter Sommermonate, vor allem im August (Ausnahme: Bad Camberg), und eine verbreitete Zunahme extrem feuchter Wintermonate (Ausnahme: Frankfurt/Main), sowie extrem hoher Märzsummen außer in Bad Camberg und Geisenheim.

Schließlich soll, da in Abb. 38 sowie in Tab. 6-19 die Situation der Entwicklung der Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit jeweils nur zu Beginn und am Ende des betrachteten Zeitintervalls erfasst ist, auch die gesamte zeitliche Entwicklung zumindest in einigen Beispielen gezeigt werden (wiederum jahreszeitlich differenziert). Methodisch kann man sich dabei an der Abb. 38 orientieren: Es handelt sich um die Jahr-zu-Jahr-Veränderung der dort farblich gekennzeichneten Flächen, die ja ein Maß für die Wahrscheinlichkeit dafür sind, dass bestimmte obere bzw. untere Schwellenwerte über- bzw. unterschritten werden.

Dabei zeigt sich in Frankfurt/Main in allen Jahreszeiten außer im Herbst bei der Überschreitungswahrscheinlichkeit, siehe Abb. 39 (links), ein Trend nach oben, der im Gegensatz zu den Mittelwerttrends aber erst ab ungefähr 1980 ausgeprägt ist und bei dem der Sommer deutlich dominiert. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei der statistischen Analyse des extremen Hitzesommers 2003 gefunden (Schönwiese et al., 2004). Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Abb. 39, rechts) zeigt dementsprechend in allen Jahreszeiten nach unten, jedoch mit strukturellen Unterschieden (im Herbst beginnt diese Tendenz relativ früh, im Sommer zeigt sie eine Fluktuation). Kassel, siehe Abb. 40, weist gegenüber Frankfurt bei der Überschreitungswahrscheinlichkeit einen markanten Unterschied auf: Im Herbst ist um ca. 1960 eine Umkehr der Tendenz aufgetreten und im Winter ist die Änderung nicht beschleunigt, sondern linear. Der Verlauf der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ist erwartungsgemäß in etwa ein Spiegelbild der Überschreitungswahrscheinlichkeiten, außer im Winter, wo die Zunahme der Streuung sowohl die Über- als auch die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ansteigen lässt.

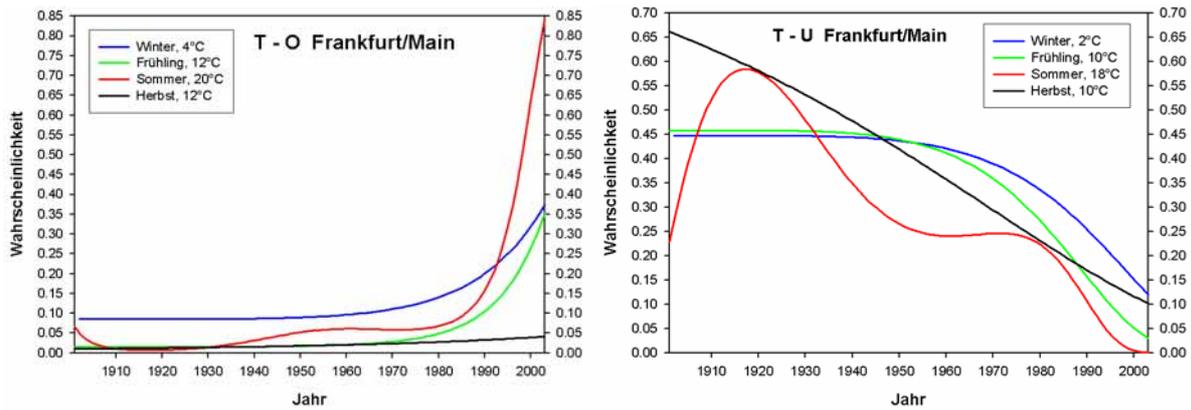


Abb. 39. Zeitlicher Verlauf der Überschreitungs- (links) und Unterschreitungswahrscheinlichkeit (rechts) der angegebenen Schwellenwerte an der Station Frankfurt/Main, jahreszeitliche Aufschlüsselung.

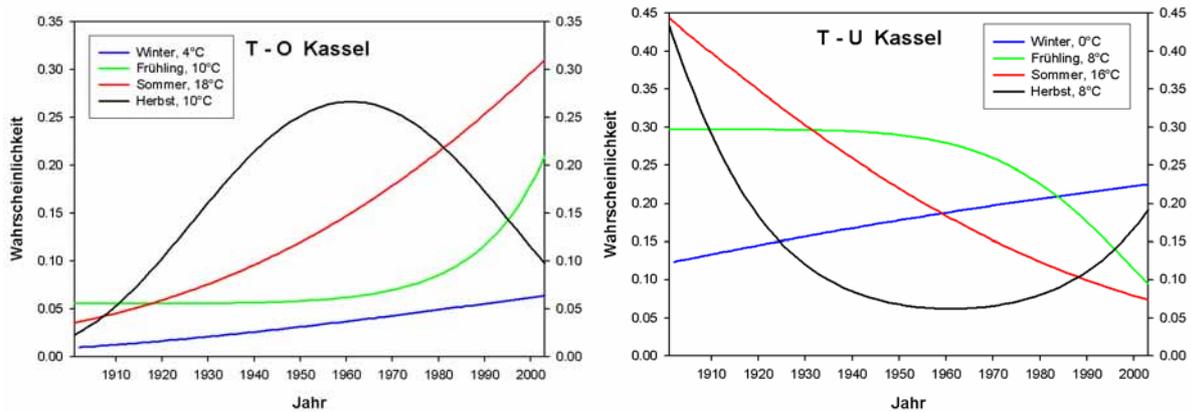


Abb. 40. Ähnlich Abb. 39, jedoch Kassel.

Beim Niederschlag treten in Eppenrod, siehe Abb. 41, wiederum die jahreszeitlichen Unterschiede hervor: Die Überschreitungswahrscheinlichkeit nimmt im Herbst und insbesondere im Winter deutlich zu, während sie im Sommer zurückgeht; im Frühling tut sich dabei fast nichts. Dies bedeutet, dass langfristig sich die Hochwassergefahr vom Sommer in den Winter und Herbst verlagert hat. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Abb. 41, rechts) nimmt generell ab, besonders im Frühling. An der Station Eberbach, siehe Abb. 42, gibt es demgegenüber einige Unterschiede: Die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit bleibt dort im Sommer konstant, letztere hat im Frühling und Winter um 1950 ein relatives Maximum eingenommen.

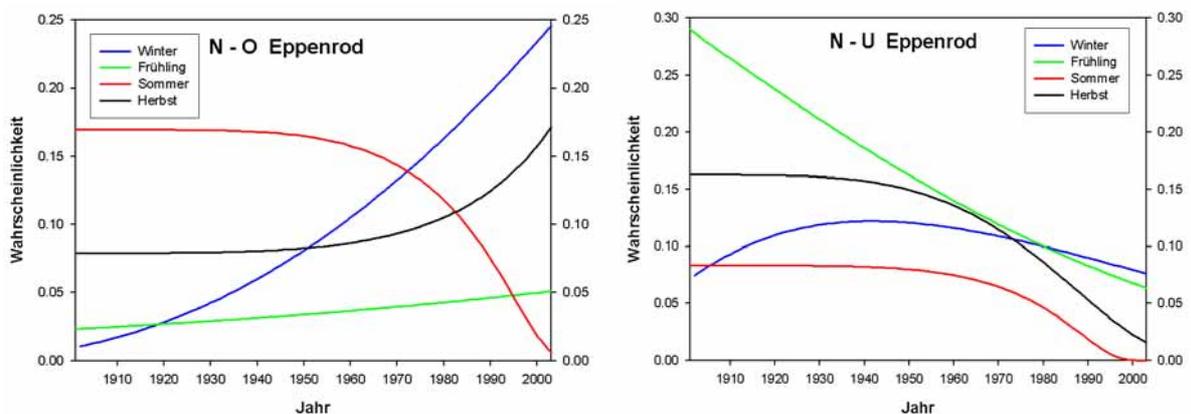


Abb. 41: Ähnlich Abb. 39, jedoch Niederschlag Eppenrod; obere Schwelle 300 mm, untere 120 mm für alle Jahreszeiten.

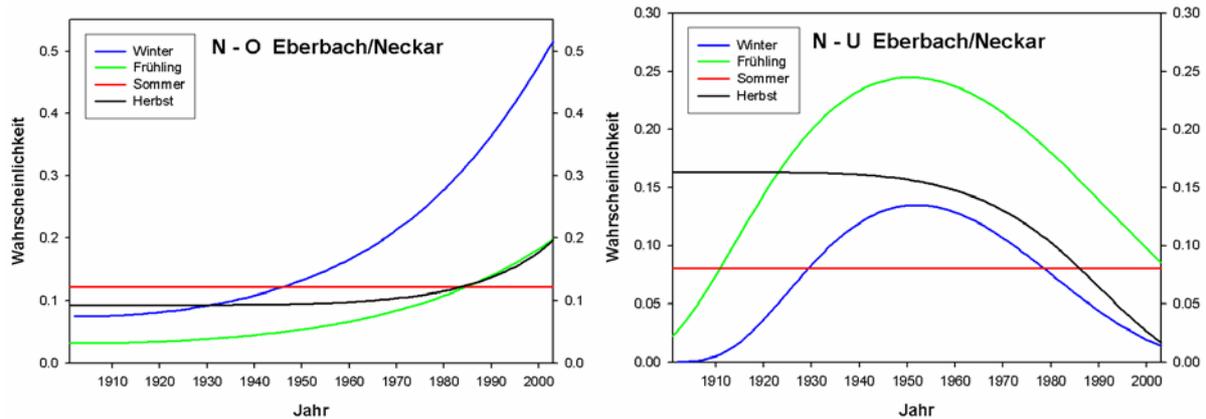


Abb. 42. Ähnlich Abb. 39, Jedoch Niederschlag Eberbach/Neckar; obere Schwelle 360 mm, untere 150 mm in allen Jahreszeiten.

6. Signalanalyse

Wie eingangs (Kap. 1) erwähnt, gilt die globale (bodennahe) Erwärmung im Laufe des Industriezeitalters als anthropogen dominiert (IPCC, 2001; Schönwiese, 2003). Dort ist auch schon darauf hingewiesen worden, dass statistische Abschätzungen auf der Grundlage der Beobachtungsdaten – in Ergänzung zu den üblichen physikalisch fundierten Klimamodellrechnungen – vor allem dann erfolgreich sind, wenn globale Datensätze analysiert werden. So konnte in einem früheren Projekt (Grieser et al., 2000; Staeger et al., 2003) gezeigt werden, dass sich die interannuären (Jahr-zu-Jahr-) Variationen der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur (vgl. Abb. 2) unter Anwendung eines Regressionsmodells mit einer erklärten Varianz von rund 80 % ursächlich erklären lassen, wobei rund 60 % auf den Klimafaktor Mensch zurückgehen. (Die erklärte Varianz ist der quadratische Wert des multiplen Korrelationskoeffizienten, in diesem Fall 0,89; die Nachweis-Signifikanz des anthropogenen Einflusses lag bei dieser Studie über 99,9 %). Beim Übergang auf regionale Betrachtungen sinken diese Varianzen jedoch stark ab und beim Niederschlag gelingen ursächliche Zuordnungen auf diesem statistischen Weg so gut wie gar nicht (obwohl es Korrelationen zwischen Temperatur und Niederschlag gibt, z.B. in Deutschland in der Art, dass aus Gründen der atmosphärischen Zirkulation winterliche Erwärmung einem Niederschlagsanstieg und sommerliche Erwärmung einem Niederschlagsrückgang entsprechen sollten).

Trotz dieser Einschränkungen soll hier versucht werden, anhand der Temperaturreihen (Jahreswerte) von Frankfurt/Main und Geisenheim festzustellen, ob diese Daten Informationen über die anthropogene Klimabeeinflussung enthalten. Die Methodik sei an dieser Stelle kurz skizziert, und ist in der oben genannten Literatur ausführlich beschrieben. Die Voraussetzungen für die Anwendung eines linearen Regressionsmodells sind in diesem Fall Einflussgrößen, die einerseits proportional zum zugehörigen Strahlungsantrieb sind und deren Wirkung linear und additiv ist. Beide Voraussetzungen sind hinreichend erfüllt. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind im Zusammenhang mit einer derzeit in Bearbeitung befindlichen Diplomarbeit entstanden (Brinckmann, 2005). Es werden dabei in einer schrittweisen multiplen Korrelations- und Regressionsrechnung die Temperaturdaten mit dem anthropogenen „Treibhauseffekt“ (in Form der äquivalenten CO₂-Konzentrationswerte, die somit über CO₂ hinaus auch weitere klimawirksame Spurengase enthalten; GHG = greenhouse gases), der Sonnenaktivität (SOL), dem Vulkanismus (VUL),

dem El-Niño-Phänomen (ENSO, d.h. El Niño / Southern Oscillation) und der Nordatlantikoszillation (NAO) verknüpft. Diese Einfluss-Zeitreihen werden auch um ein bzw. zwei Jahre zeitverschoben berücksichtigt, da das Klimasystem einer gewissen Trägheit unterliegt und somit eine Wirkung erst mit Zeitverzögerung einsetzen kann. Der ebenfalls anthropogen bedingte Sulfatpartikeleffekt (als Folge der SO₂-Emission) wurde hier nicht berücksichtigt, da die Daten unzuverlässig sind und dabei statistische Probleme auftauchen. Im Fall der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur ist jedoch mit Hilfe neuronaler Netze gezeigt worden, dass die vorübergehende Abkühlung (ca. 1945 - 1975) wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist (Walter, 2001; Walter und Schönwiese, 2002), in Übereinstimmung mit physikalisch orientierten Klimamodellrechnungen (IPCC, 2001); dies könnte auch auf die Region Hessen zutreffen.

Die hier zur Anwendung gekommene sog. „schrittweise Regression“ wählt nun aus allen zur Verfügung stehenden zunächst als potenziell angesehenen Einfluss-Zeitreihen, den sog. „Regressoren“, diejenigen aus, die am signifikantesten mit der Zielgröße, also der Temperatur, korreliert sind. Nach Hinzunahme eines neuen Regressors in das vorläufige Modell wird nun geprüft, ob vormals ausgewählte Einflüsse nun redundant geworden sind und somit aus dem Modell entfernt werden können. Diese Prozedur wird so lange fortgeführt, bis sich an dem Modell nichts mehr ändert. Hierdurch wird angestrebt, möglichst wenige, aber relevante Einflüsse auszuwählen, um einerseits eine Überanpassung zu vermeiden, und andererseits möglichst alle klimatologisch relevanten Einflüsse zu erfassen.

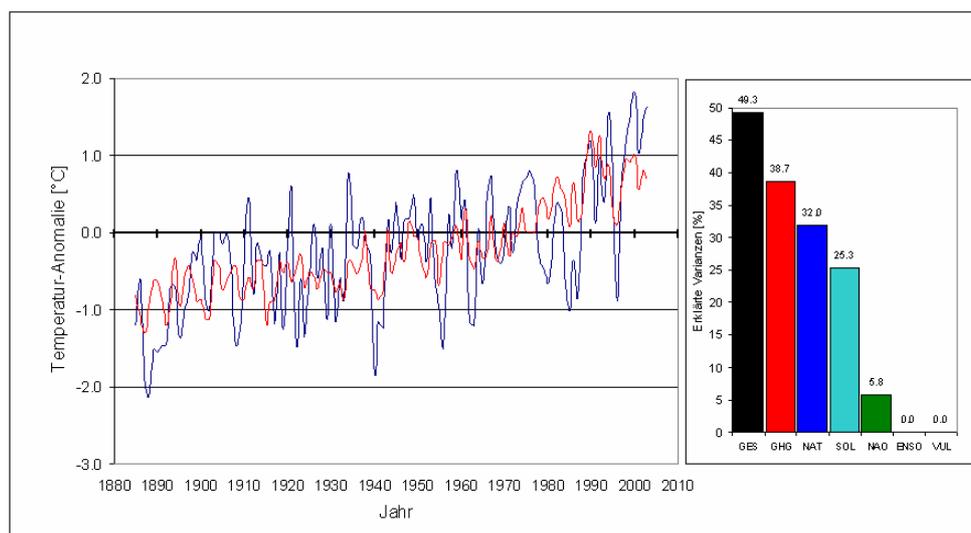


Abb. 43. Vergleich der Variationen der Jahresmitteltemperatur 1885-2003 an der Station Frankfurt/Main, blau, mit einer Reproduktion durch das im Text genannte Regressionsmodell, rot, das in diesem Fall 49,3 % der beobachteten Varianz erklärt, vgl. schwarzen Balken GES am rechten Bildrand. Die weiteren Balken geben diese Varianzen für die natürlichen Einflüsse insgesamt (NAT), die Sonnenaktivität (SOL), die NAO, ENSO und den Vulkanismus an (VUL).

In Abb. 43 ist das Ergebnis für Frankfurt/Main zu sehen. Das Modell (rote Kurve) erklärt rund 49 % der beobachteten Varianz (blaue Kurve; vgl. auch Abb. 6) und führt rund 39 % auf den anthropogenen „Treibhauseffekt“ und somit den Klimafaktor Mensch zurück, vgl. Balkendarstellung rechts neben der Graphik, sofern die natürlichen Einflüsse unterdrückt werden (daher lassen sich die in der Balkendarstellung angegebenen erklärten Varianzen nicht addieren). Unterdrückt man hingegen diesen anthropogenen Einfluss, könnten 32 % der beobachteten

Variationen durch die im Modell erfassten natürlichen Einflüsse erklärt werden. Dabei dominiert die Sonnenaktivität; die NAO erklärt erstaunlich wenig Varianz, ENSO und Vulkanismus lassen sich in diesem Modell gar nicht nachweisen. Für Geisenheim, siehe Abb. 44, ergibt sich ähnliches, jedoch auf einem niedrigerem Niveau der erklärten Varianzen und einem „Gleichauf“ von anthropogenen und natürlichen Einflüssen.

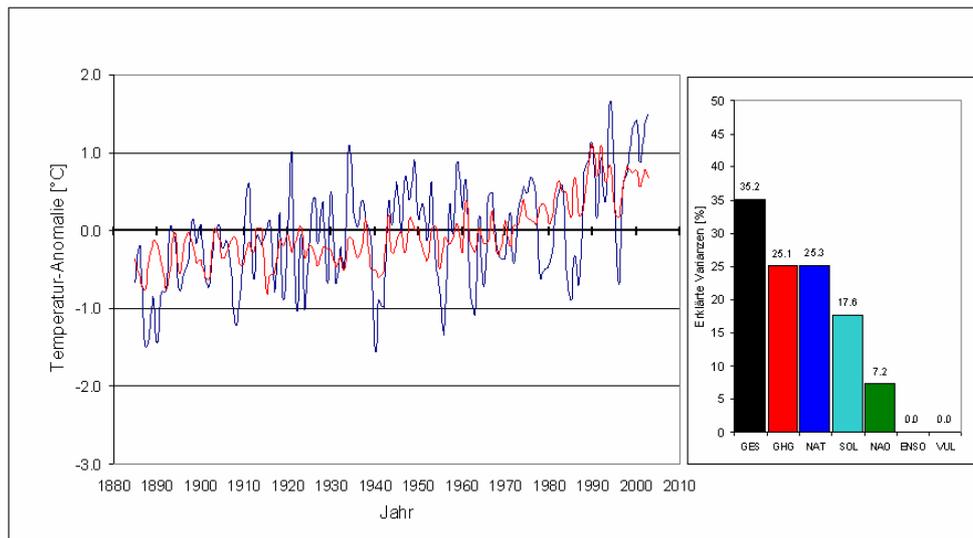


Abb. 44. Ähnlich Abb. 43, jedoch Geisenheim.

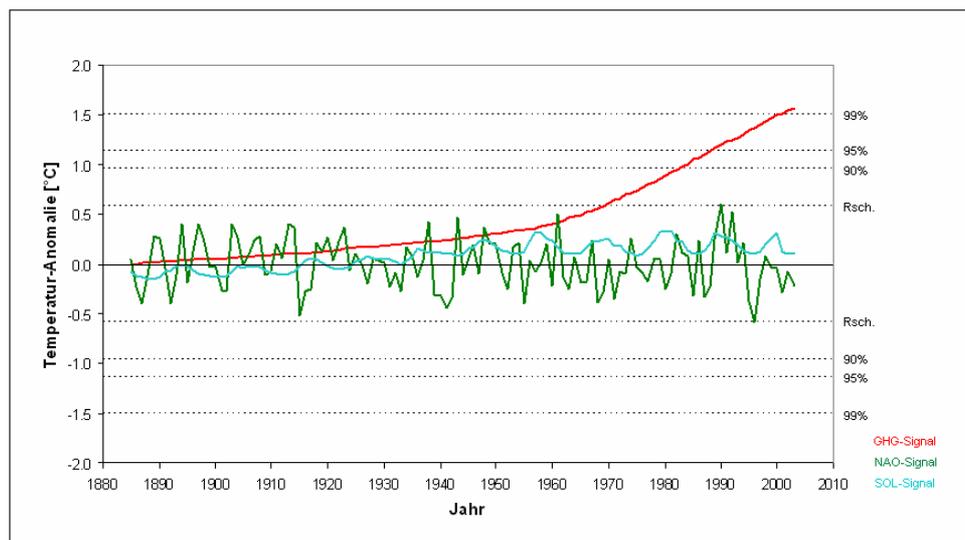


Abb. 45. Zeitlicher Verlauf 1885-2003 der auf bestimmte Einflüsse zurückgehenden Temperatureffekte, der sog. Signale (Typ siehe Legende rechts unten neben der Abbildung), für die Station Frankfurt/Main (vgl. Abb. 43). Die gestrichelten Linien geben die Signifikanzschwellen an, welche die Signale überschreiten müssen, um sich auf dem angegebenen Wahrscheinlichkeitsniveau vom bei der Zeitreihenanalyse verbleibenden Residuum (Zufallsrauschen) zu unterscheiden.

Weitergehend stellt sich nun die Frage, wie sich die Signale, d.h. die auf den jeweils betrachteten und von den anderen Faktoren separierten Temperatureffekte zeitlich entwickelt haben. Das Ergebnis ist für Frankfurt in Abb. 45 dargestellt. Man erkennt einen zeitlich stark variierenden NAO-Effekt (grüne Kurve) ohne Langfristtrend, einen Solareffekt, der im wesentlichen den quasi-11-jährigen Sonnenfleckenzyklus widerspiegelt (blaue Kurve) und zudem bis etwa 1960 einen relativ leichten Tempe-

raturanstieg von ca. 0,5 °C enthält, und ein sehr deutliches anthropogenes Signal (GHG) in Form eines systematischen Temperaturanstiegs um ca. 1,5 °C, der um 1980 die 90%- und am Ende die 99%-Signifikanzschwelle übersteigt.

Diese Schwellen orientieren sich am sog. Zufallsrauschen, das die nicht ursächlich erklärbare Residuum-Varianz enthält. Signale, welche die angegebenen Signifikanzschwellen überschreiten, sind auf dem entsprechenden Wahrscheinlichkeitsniveau nicht zufällig und somit signifikant. Der Unterschied zwischen dem GHG-Signal von ca. 1,5 °C und dem tatsächlich beobachteten Trend (1901-2003) von 1,4 °C (vgl. Tab. 3) ist sehr gering. Trotzdem ist anzunehmen, dass der hier nicht berücksichtigte Sulfatpartikeleffekt eine gewisse Abkühlung bewirkt hat (eventuell unter Kompensation des zeitweise erkennbaren solaren Erwärmungseffekts).

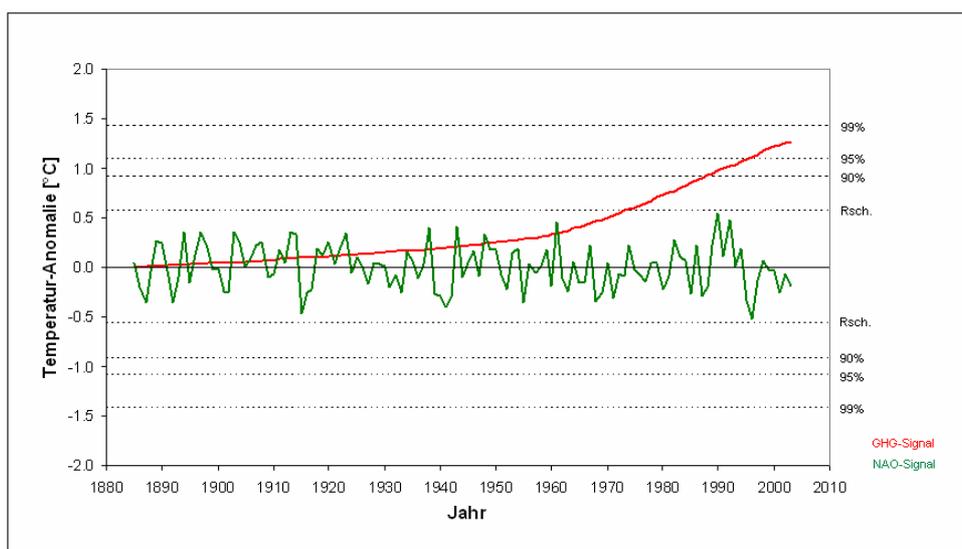


Abb. 46. Ähnlich Abb. 45. jedoch Geisenheim.

In Geisenheim, siehe Abb. 46, ist der Solareffekt nicht signifikant; ansonsten sind die Ergebnisse ähnlich, obwohl das anthropogene Signal bisher nur die 95%-Signifikanzschwelle überschritten hat. Es beträgt dort ca. 1,3 °C, gegenüber einem beobachteten Trend (1901-2003) von 0,9 °C. Dies legt die Vermutung nahe, dass die genannte anthropogene Abkühlung durch Sulfatpartikel doch etwas stärker ist und in Frankfurt ein Teil der Erwärmung auch ein Stadteffekt sein könnte (Giesel, 1988; dies lässt sich in etwa durch den Trendunterschied quantifizieren, was für 1901-2003 zu einem städtischen Erwärmungseffekt von ungefähr 0,3 °C führt).

Schließlich soll noch die zeitliche Evolution der erklärten Varianzen betrachtet werden. Dabei zeigt sich in Frankfurt, siehe Abb. 47, dass sich sowohl der anthropogene Treibhauseffekt als auch die Gesamtvarianz gerade in den letzten Jahrzehnten markant erhöht haben. Beim vorübergehenden Rückgang dürfte es sich wiederum um den hier nicht berücksichtigten Sulfatpartikeleffekt handeln. In Geisenheim (hier nicht gezeigt) sind die Ergebnisse ähnlich, jedoch wiederum auf geringerem Niveau erklärter Varianzen und somit etwas weniger überzeugend.

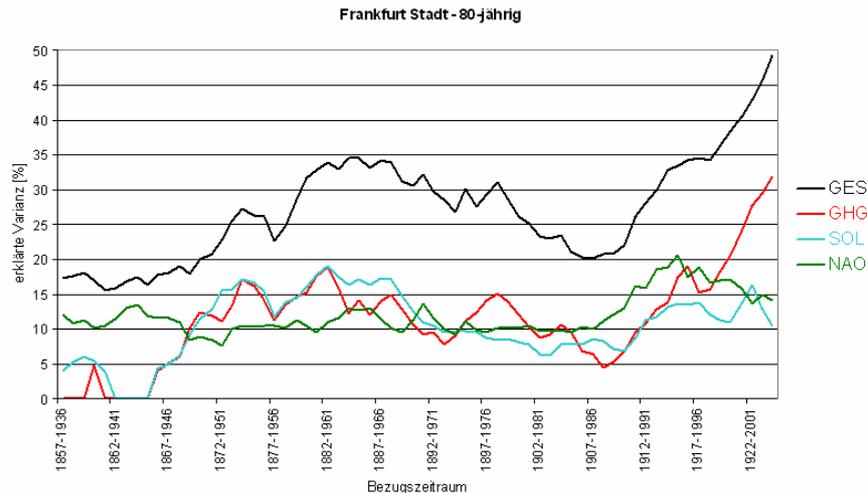


Abb. 47. Zeitlich gleitende (80-Jahre-Intervalle) Analyse der insgesamt sowie durch einzelne Einflüsse erklärten Varianz der Temperaturreihe 1857-2003 Frankfurt (vgl. Abb. 43; dort auch Erklärung der Symbolik).

Es lässt sich somit feststellen, dass der Klimafaktor Mensch auch in Hessen eine nicht zu übersehende Rolle spielt und insbesondere die langfristige Erwärmung damit zusammenhängt. Die in diesem Bericht aufgezeigten, hochstrukturierten zeitlichen und insbesondere räumlichen Muster der Klimaänderungen entziehen sich aber weitgehend einer ursächlichen Erklärung. Sie können zumindest teilweise den anthropogenen Effekten aus natürlichen Gründen überlagert sein oder werden wegen der physikalischen Vereinfachungen und insbesondere begrenzten räumlichen Auflösung in den (physikalisch konzipierten) Klimamodellen nicht erfasst.

7. Zukunftsperspektiven

Es liegt nun die Frage nahe, ob es Sinn macht, Ergebnisse statistischer Trendanalysen, die auf den Beobachtungsdaten der Vergangenheit beruhen, in die Zukunft zu extrapolieren. Dies wäre, falls dabei die Ursachen nicht berücksichtigt werden, reine Spekulation. Daher werden beim Blick in die Zukunft meist physikalisch konzipierte Klimamodelle genutzt, welche die Ursachen explizit beinhalten, insbesondere globale atmosphärisch-ozeanisch gekoppelte Zirkulationsmodelle (General Circulation Models, GCM). Da die räumliche Auflösung solcher Modelle sehr grob ist, sind verschiedene Methoden des „Downscaling“ (Herunterskalieren großräumiger auf kleinräumige Effekte) entwickelt worden. Dazu gehören auch statistische Methoden, die zwar auf großräumigen GCM-Zukunftsprojektionen basieren, aber in Verbindung mit kleinräumig (subskalig) erfassten Beobachtungsdaten regionale Aussagen in relativ kleinräumlicher Auflösung zulassen. Eine solche Methode, die zudem sozusagen als Brücke zwischen den GCM-Projektionen und dem regionalen Verhalten der einzelnen Klimatelemente Großwetterlagen-Konzepte verwendet, ist mit Reichweiten bis 2050 bzw. 2100 auf Hessen angewendet worden (Enke, 2003, 2004).

Dabei ist wichtig, zu beachten, dass GCM-Projektionen in die Zukunft häufig, so auch bei den oben zitierten Abschätzungen, nur vom Klimafaktor Mensch ausgehen, und dabei wiederum nur von der Anreicherung der Atmosphäre mit klimawirksamen

Spurengasen (CO₂ usw.) aufgrund der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas), Waldrodungen und einigen weniger wirksamen Vorgängen. Man spricht vom (zusätzlichen) anthropogenen „Treibhauseffekt“, wie er in Kap. 1 andiskutiert und in Kap. 6 etwas betrachtet worden ist. Nur ist beim Blick in die Zukunft unklar, wie die anthropogenen Emissionen klimawirksamer Spurengase aussehen werden. Daher wird eine Vielzahl von Szenarien benutzt, die derartige alternative Annahmen für die Zukunft bereitstellen. Die Frage, welches dieser Szenarien nun zutreffend sein wird und die generelle (quantitative sowie regionale) Unsicherheit der Klimamodellrechnungen führt beispielsweise dazu, dass selbst bei der global gemittelten bodennahen Erwärmung bis zum Jahr 2100 derzeit ein Unsicherheitsbereich von 1,4-5,6 °C besteht (IPCC, 2001). Somit sind auch regional je nach Szenario und je nach verwendetem Klimamodell unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten bzw. die aus nur einem Szenario und nur einem Klimamodell resultierenden Ergebnisse zumindest quantitativ unsicher.

Ein Vergleich solcher Modellprojektionen mit beobachteten Trends ist unter diesen Aspekten, d.h. unter Berücksichtigung der Ursachen, aus folgendem Grund nun doch vertretbar: Man kann davon ausgehen, dass zumindest in den langfristigen Trends der Beobachtungsdaten ein zunehmend dominant werdender anthropogener Anteil enthalten ist (vgl. dazu wiederum Kap. 6, aber auch z.B. Grieser et al., 2000; Staeger et al., 2003; Walter und Schönwiese, 2002). Andererseits spiegeln die Beobachtungsdaten die gesamte Vielfalt der Einflüsse wider, der weiteren anthropogenen, der natürlichen und der stochastischen (d.h. ursächlich nicht erklärbaren, die zum Teil als Chaosanteil aufgefasst werden), so dass bei einem solchen Vergleich eine sehr weitgehende Ähnlichkeit nicht zu erwarten ist. Da nach allen gängigen Klimamodellrechnungen der anthropogene „Treibhauseffekt“, insbesondere die Temperaturreaktion, in Zukunft größer sein wird als in der Vergangenheit, sollte zudem nicht erstaunen, wenn die bisher beobachteten Temperaturtrends kleiner sind als die in Zukunft erwarteten. Wegen der gegenüber der Temperatur deutlich größeren Fehlerbelastung und wesentlichen größeren räumlichen Variabilität (und somit geringeren Repräsentanz), aber auch ganz erheblich größeren Modellunsicherheit, sind beim Niederschlag weitaus geringere Übereinstimmungen zu erwarten. Und ganz grundsätzlich sollten sich jahreszeitlich besser greifbare Parallelen ergeben als in monatlicher Betrachtung.

Dies alles ist zu beachten, wenn nun für das Flächenmittel Hessen ein Vergleich der in diesem Bericht zusammengestellten Temperatur- und Niederschlagstrends 1951-2000 (Vergangenheit) mit den entsprechenden Zukunftsprojektionen bis 2041/2050 gegenüber 1981/2000 nach Enke (2003, 2004) durchgeführt wird. Dies soll zunächst jahreszeitlich bzw. jährlich geschehen, siehe Tab. 20. Dabei ergibt sich bei der Temperatur eine gute Übereinstimmung, da es sich ausnahmslos um Erwärmungen handelt, mit dem Maximum im Winter und dem Minimum im Herbst, und erwartungsgemäß die Zukunftsprojektion höher als die Beobachtung in der Vergangenheit liegt; die herbstliche Änderung kann als insignifikant eingestuft werden. Auch beim Winterniederschlag ist im Rahmen dessen, was erwartet werden darf, die Übereinstimmung gut, nicht jedoch beim Niederschlag in den anderen Jahreszeiten. Zwar relativiert sich der Unterschied beim Sommerniederschlag dadurch, dass sowohl Zukunft als auch Vergangenheit eine Abnahme anzeigen und die Zukunftsprojektionen gerade beim Niederschlag von Jahrzehnt zu Jahrzehnt erheblich variieren (was ganz oder zumindest überwiegend als Modellartefakt anzusehen ist); beispielsweise zeigt die Projektion bis 2021/2030 eine Abnahme um

17,4 %, bis 2061/2070 um 24,0 % an. Umgekehrt variieren die beobachteten Trends von Zeitintervall zu Zeitintervall. Im Herbst und insbesondere Frühling stehen sich eine projizierte leichte bis mäßige Abnahme und eine beobachtete erhebliche Zunahme gegenüber.

Tab. 20. Vergleich der jahreszeitlichen bzw. jährlichen Klima-Zukunftsprojektionen bis 2041/2050 gegenüber 1981/2000 nach Enke (2004) mit den in der Vergangenheit beobachteten Trends 1951-2000 (dieser Bericht), Flächenmittel Hessen (vgl. dazu Tab. 2 und 4). Bei der Temperatur sind hier wie im folgenden Zunahmen rot und Abnahmen blau gekennzeichnet, beim Niederschlag Zunahmen grün und Abnahmen violett.

Mitteltemperatur

Jahreszeit	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Zukunftsprojektion	+ 1,5 °C	+ 1,6 °C	+ 0,1 °C	+ 3,1 °C	+ 1,6 °C
Vergangenheit (Beob.)	+ 1,1 °C	+ 1,0 °C	+ 0,2 °C	+ 1,6 °C	+ 0,9 °C

Niederschlag

Zukunftsprojektion	- 5,8 %	- 4,3 %	- 1,7 %	+ 34,0 %	+ 6,1 %
Vergangenheit (Beob.)	+ 20,3 %	- 17,8 %	+ 24,9 %	+ 22,2 %	+ 8,5 %

Man kann nun hinterfragen, ob sich bei einem monatlichen Vergleich die gute Übereinstimmung bei der Temperatur bestätigt bzw. worauf beim Niederschlag die Diskrepanzen im Frühling und Herbst zurückzuführen ist. Zunächst zur Temperatur, siehe Tab. 21. Die Übereinstimmung ist beim monatlichen Vergleich nicht mehr ganz so gut, aber insgesamt noch befriedigend. Die größte Diskrepanz besteht darin, dass in der Zukunftsprojektion die stärkste Erwärmung im Februar erwartet wird, in der Vergangenheit jedoch im August aufgetreten ist. Zudem schätzt im Sommer die Zukunftsprojektion die Erwärmung im Monat Juni als maximal ein, während in der Vergangenheit gerade in diesem Monat praktisch kein Trend festzustellen ist. Im Winter ist bei der Zukunftsprojektion die Erwärmung im Dezember und Januar annähernd gleich, in der Vergangenheit dagegen im Januar und Februar. Im Herbst sind in beiden Fällen die Änderungen so gering (und somit insignifikant), dass es nicht besonders ins Gewicht fällt, wenn zu einen im Oktober und zum anderen im November eine geringfügige Abkühlung angezeigt wird.

Tab. 21. Ähnlich Tab. 20, jedoch monatlicher Vergleich, Mitteltemperatur,.

Monat	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai
Zukunftsprojektion	+ 2,6 °C	+ 2,9 °C	+ 3,7 °C	+ 1,4 °C	+ 1,5 °C	+ 1,7 °C
Vergangenheit (Beob.)	+ 0,9 °C	+ 1,7 °C	+ 1,7 °C	+ 1,6 °C	+ 0,3 °C	+ 1,4 °C
Monat	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.
Zukunftsprojektion	+ 2,4 °C	+ 1,7 °C	+ 0,8 °C	+ 0,3 °C	- 0,2 °C	+ 0,4 °C
Vergangenheit (Beob.)	+ 0,1 °C	+ 1,0 °C	+ 1,9 °C	+ 0,3 °C	+ 0,3 °C	- 0,1 °C

Nun zum Niederschlag, siehe Tab. 22. Hier bestätigt sich bei monatlicher Differenzierung die gute Übereinstimmung im Winter, auch wenn die Zukunftsprojektion den stärksten Anstieg im Februar erwartet, er in der Vergangenheit aber eher im Dezember aufgetreten ist. Im August zeigt sich aber einmal mehr eine

deutliche Diskrepanz: Während die Modellprojektion einen moderaten Anstieg erwartet, zeigt die Vergangenheit eine markante Abnahme. Im Juli, für den die Zukunftsprojektion eine Abnahme anzeigt, variieren die beobachteten Trends: 1951-2000 praktisch keine Änderung (vgl. Tab. 22 und A.2 im Anhang), 1951-1980 sowie verstärkt 1961-1990 Abnahme, im jüngsten Intervall 1971-2000 jedoch deutliche Zunahme, was den Trend zur Sommerdürre abmildern könnte (gemäß Abb. 18b aber nur in Südhessen). Besonders eklatant ist der Widerspruch im März, wo der projizierte Abnahme ein enormer Anstieg in der Vergangenheit gegenübersteht. Generell sind im Frühling die Vorzeichen der Niederschlagsänderung genau entgegengesetzt, was nur im Mai wegen der sehr geringen Trendwerte nicht besonders bemerkenswert ist. Im Herbst ist die Übereinstimmung im November perfekt, im September schlecht (wiederum gegensätzliche Vorzeichen) und im Oktober eklatant (erwartete deutliche Abnahme, in der Vergangenheit jedoch starke Zunahme beobachtet; lediglich 1951-1980 und somit vorübergehend weisen auch die Beobachtungsdaten der Vergangenheit auf einen Niederschlagsrückgang hin). Somit treten die Gegensätze insbesondere in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst sowohl bei jahreszeitlicher als auch monatlicher Betrachtung besonders deutlich in Erscheinung.

Tab. 22. Ähnlich Tab. 20, jedoch monatlicher Vergleich, Niederschlag, gerundet.

Monat	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai
Zukunftsprojektion	+ 34 %	+ 23 %	+ 44 %	- 11 %	- 2 %	- 4 %
Vergangenheit (Beob.)	+ 29 %	+ 11 %	+ 21 %	+ 62 %	+ 11 %	+ 2 %
Monat	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.
Zukunftsprojektion	- 8 %	- 11 %	+ 8 %	- 7 %	- 13 %	+ 16 %
Vergangenheit (Beob.)	- 12 %	0	- 18 %	+ 19 %	+ 46 %	+ 16 %

Angesichts dieser zum Teil guten Übereinstimmungen, zum Teil aber auch ausgeprägten Gegensätze soll hier darauf verzichtet werden, auch die regionalen Strukturen innerhalb Hessens zu diskutieren. Generell sind diese Strukturen sowohl bei den Zukunftsprojektionen als auch bei den in der Vergangenheit beobachteten Trends im Fall des Niederschlags deutlich ausgeprägter als bei der Temperatur, bei der Beobachtung aber wiederum deutlich ausgeprägter als bei den Zukunftsprojektionen, was sicherlich hauptsächlich daraus erklärbar ist, dass die Beobachtungsdaten im Gegensatz zu den Projektionen auch die ganze Vielfalt der natürlichen Variationen enthalten. So treten auch die zum Teil sehr drastischen Nord-Süd-Unterschiede, die in den beobachteten Trends enthalten sind (z.B. im Juli deutliche Niederschlagsabnahme in Nordhessen, dagegen Zunahme in Südhessen, vgl. Abb. 18b, links oben; im Juni Abkühlung in Nordhessen, nicht dagegen in Südhessen, vgl. Abb. 14a, rechts unten), in den Zukunftsprojektionen nicht auf. Neben den bereits genannten Einschränkungen, welche den hier vorgenommenen Vergleich erschweren, muss auch noch die zeitliche Instabilität hervorgehoben werden, wobei es sich im Fall der Modellrechnungen wie gesagt um weitgehend artifizielle, den Trends überlagerte Fluktuationen, bei den beobachteten Trends um reale Fluktuationen und kurzzeitige Anomalien handelt, die jedoch auf die Trends sehr starken Einfluss nehmen, wenn sie zufällig in der Nähe des Anfangs oder Endes des bei der Trendberechnung jeweils zugrunde gelegten Zeitintervalls liegen.

Was ist aus dem Vergleich Zukunftsprojektion gegenüber Beobachtung in der Vergangenheit nun zu folgern? Da die beobachteten Trends teilweise ursächlich erklärlich sind, insbesondere da sich darin der anthropogene „Treibhauseffekt“ widerspiegeln sollte, können relativ langfristige Trends mit einiger Vorsicht als eine Art mögliches unteres Szenario für die Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten angesehen werden, insbesondere bei der Temperatur. Das bedeutet, es kann erwartet werden, dass die künftige Erwärmung ähnlich oder mit gewisser (aber nicht explizit angebbarer) Wahrscheinlichkeit höher liegen wird. Dafür liefern die Zukunftsprojektionen einen guten Anhalt. Einschränkungen ergeben sich bei monatlicher Betrachtung und den regionalen Änderungsstrukturen innerhalb Hessens.

Beim Niederschlag sind die Konsequenzen wesentlich problematischer. Es kann beispielsweise sein, dass im hochgradig nicht-linearen Klimasystem in der zukünftigen Entwicklung Rückkopplungen anders verlaufen bzw. zusätzlich auftreten, wovon die Vergangenheit sozusagen nichts wissen kann. Bei sehr starken Diskrepanzen in den einzelnen Monaten muss die Zukunftsprojektion jedoch besonders vorsichtig interpretiert werden. Das betrifft vor allem den März, bei dem eine Niederschlagsabnahme erwartet, bisher aber eine starke Zunahme aufgetreten ist, und den August, der bisher einen deutlichen und sogar zeitlich recht stabilen Trend zu nicht nur weniger Niederschlag, sondern auch besonders starker Erwärmung zeigt. Angesichts dieser Vergleiche muss weiterhin von einer erheblichen Unsicherheit der Niederschlagsentwicklung im Oktober, etwas abgeschwächt auch im September und April, ausgegangen werden. Schließlich erscheinen sowohl Zukunftsprojektionen als auch in der Vergangenheit beobachtete Trends für relativ kurze Zeitintervalle wie 30 oder gar nur 10 Jahre als wesentlich weniger belastbar als Abschätzungen, die sozusagen in einem Schritt die nächsten bzw. letzten 50 bzw. 100 Jahre erfassen.

Literatur

- Baur, F., 1949: Die doppelte Schwankung der atmosphärischen Zirkulation in der gemäßigten Zone innerhalb des Sonnenfleckenzyklus. *Met. Rdsch.*, 2, 10.
- Brinckmann, S., 2005: Signalanalyse anthropogener und natürlicher Klimafaktoren mittels schrittweiser Regression (Arbeitstitel). Diplomarbeit, in Vorbereitung.
- Deutscher Wetterdienst, 2002: Klimastatusbericht 2001. Selbstverlag, Offenbach; vgl. auch weitere Klimastatusberichte sowie aktuelle Monatsübersichten, abrufbar über INTERNET: <http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/monitoring/beschreibung.htm>
- Deutscher Wetterdienst: Witterungsreport express. Erscheint monatlich im Selbstverlag, Offenbach.
- Enke, W., 2003: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4OPYC3 Klima-Simulationslaufes bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen. Abschlussbericht, Werkvertrag zwischen dem Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen und der Firma Meteo-Research, Stahnsdorf.
- Enke, W., 2004: Erweiterung des Simulationszeitraumes der wetterlagenbasierten Regionalisierungsmethode auf der Basis des ECHAM4-OPYC3 Laufes für die Dekaden 2011/2020 und 2051/2100, Szenario B2. Abschlussbericht, Werkvertrag zwischen dem Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen und der Firma Meteo-Research, Stahnsdorf.
- Giesel, H., 1988: Das Klima von Frankfurt 1756-1980. Aktualisierung und statistische Analyse der Datenreihen. Diplomarbeit, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt/M.
- Grieser, J., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2000: Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. Bericht Nr. 103, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt/Main.
- Hupfer, P., Börngen, M., 2004: Gibt es Klimakatastrophen? *Naturwiss. Rdsch.*, 57, 233-240.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., et al., eds.), 2001: *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC.* University Press, Cambridge.
- Jonas, M., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2005: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. Bericht zum UBA-Forschungsvorhaben 201 41 254; Bericht Nr. 1, Inst. Atmosphäre Umwelt, Univ. Frankfurt/Main.
- Jones, P.D., et al., 1999: Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev. Geophys.*, 37, 173-199; 2005: update <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
- Labitzke, K., 1999: Die Stratosphäre. Phänomene, Geschichte, Relevanz. Springer, Berlin etc.
- Moberg, A., et al., 2005: Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613-617.
- Mollwo, H., 1958: Klimawerte von Frankfurt/Main 1857-1956. Bericht Nr. 43 (Band 6), Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Rapp, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Rapp, J., Schönwiese, C.-D., 1996: Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. *Frankfurter Geowiss. Arb.*, Serie B, Band 5, Univ. Frankfurt a.M.
- Schneider, U., Schönwiese, C.-D., 1989: Some statistical characteristics of El Nino / Southern Oscillation and North Atlantic oscillation indices. *Atmósfera*, 2, 167-180.
- Schönwiese, C.-D., 1974: Schwankungsklimatologie im Frequenz- und Zeitbereich. *Wiss. Mitt.* Nr. 24, Meteorol. Inst. Univ. München.
- Schönwiese, C.-D., 2000: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler.* 3. Aufl., Borntraeger, Berlin/Stuttgart.

- Schönwiese, C.-D., 2002: Beobachtete Klimatrends im Industriezeitalter. Ein Überblick global/Europa/Deutschland. Bericht Nr. 106, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt/M.
- Schönwiese, C.-D., 2003: Klimatologie. 2. Aufl., Ulmer (UTB), Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D., Janoschitz, R., 2005: Klimatrendatlas Deutschland 1901-2000; in Vorbereitung.
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., 1997: Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891 - 1990. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Schönwiese, C.-D., Schneider, U., 1989: Some statistical characteristics of El Niño/Southern Oscillation and North Atlantic Oscillation indices. *Atmósfera*, 2, 167-180.
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Trömel, S., 2004: The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. *Meteorol. Z.*, 13, 323-327; siehe auch Deutscher Wetterdienst, 2004: Klimastatusbericht 2003, S. 123-132. Selbstverlag, Offenbach.
- Staeger, T., Grieser, J., Schönwiese, C.-D., 2003: Statistical separation of observed global and European climate data into natural and anthropogenic signals. *Clim. Research*, 24, 3-13.
- Trömel, S., 2005: Statistische Modellierung von Klimazeitreihen. Dissertation; Bericht Nr. 2, Inst. Atmosphäre Umwelt, Univ. Frankfurt/Main.
- Trömel, S., Schönwiese, C.-D., 2005: A generalized method of time series decomposition into significant components including probability assessments of extreme events and application to German precipitation data. *Meteorol. Z.*, 14, 417-427.
- Walter, A., 2001: Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie. Bericht Nr. 218, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Walter, A., Schönwiese, C.-D., 2002: Attribution and detection of anthropogenic climate change using a backpropagation neural network. *Meteorol. Z.*, 11, 335-343.
- Werner, A., Schönwiese, C.-D., 2002: A statistical analysis of the North Atlantic Oscillation and its impact on European temperature. *Global Arm. Oc. System*, 8, 293-306.
- Ziegler, J., König, W., 1896: Das Klima von Frankfurt am Main. C. Naumann, Frankfurt a.M.

Anhang

zum Abschlussbericht „Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901-2003

Vorbemerkung: Dieser Anhang enthält ergänzende Tabellen, die eine Aufschlüsselung der Ergebnisse nach den einzelnen Monaten beinhalten. Entsprechende graphische Darstellungen (Trend- und Extremwertanalyse) sind auf der begleitenden CD zusammengestellt.

A.1 Lineare Temperaturtrends in °C, Hessen (Flächenmittel 49°-52° N, 7°-11° O), monatlich. Mittelwerte

Zeit	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
1951-2000	1,7	1,7	1,6	0,3	1,4	0,1	1,0	1,9	0,3	0,3	-0,1	0,9
1951-1980	0,6	2,2	0,5	-1,7	-0,1	0	-0,4	0,4	-0,2	-0,2	-0,4	-0,5
1961-1990	1,4	-0,5	1,6	-1,2	1,3	-0,7	1,0	1,3	-0,4	0,6	-0,1	3,3
1971-2000	1,0	0,9	1,2	1,9	1,6	0,9	0,5	1,2	0,8	1,3	0,2	0,2

Minimumwerte

1951-2000	1,8	1,8	2,4	0,7	1,6	0,6	1,1	1,4	1,0	1,1	0,2	1,2
1951-1980	0,9	2,6	1,4	-0,9	0,4	0,5	-0,2	0,3	0,2	0,4	-0,1	-0,3
1961-1990	1,6	-0,4	2,2	-1,2	0,9	0,5	1,1	1,1	0,3	0,9	0,1	3,7
1971-2000	0,9	0,5	1,5	1,9	1,3	0,6	0,8	0,9	1,2	1,7	0,3	0,4

Maximumwerte

1951-2000	1,9	2,0	1,2	0,2	1,4	0	1,1	2,5	-0,1	-0,3	0	0,9
1951-1980	0,8	2,1	-0,3	-2,3	-0,3	-0,2	-0,6	0,6	-0,3	-0,6	-0,5	-0,5
1961-1990	1,4	-0,2	1,3	-1,2	1,7	-1,3	0,9	1,5	-1,2	0	0,2	3,0
1971-2000	1,4	1,3	1,2	2,2	2,0	1,1	0,7	1,6	0,4	0,9	0,3	0,3

A.2 Lineare Niederschlagstrends in Prozent, Hessen (Flächenmittel 49°-52° N, 7°-11° O), monatlich.

1951-2000	10,5	20,9	61,9	10,5	1,6	-11,7	-0,1	-18,0	18,6	46,1	16,2	28,8
1951-1980	-22,3	3,0	34,4	26,2	13,4	-2,3	-3,5	-16,3	-33,4	-13,6	35,4	14,6
1961-1990	43,6	20,6	50,4	-16,4	0,3	0,6	-12,0	-32,2	42,4	51,0	-11,2	24,5
1971-2000	18,6	95,4	52,2	7,4	-17,3	-22,2	49,3	-8,6	79,7	56,9	-10,7	33,8

A.3 Koordinaten der Stationen, von denen lange (ab 1901) Temperatur- (T) bzw. Niederschlagsreihen (N) vorliegen (49°-52°N / 7°-11°O *).

Alsfeld (N)	50,46° N	9,24° O	Geisenheim (T+N)	49,98° N	7,95° O
<i>Aschaffenburg (N)</i>	49,97° N	9,15° O	<i>Göttingen (N)</i>	51,55° N	9,95° O
Bad Camberg (N)	50,30° N	8,28° O	Greifenstein (N)	50,61° N	8,26° O
Eberbach/Neckar (N)	49,45° N	8,98° O	Kassel (T)	51,30° N	9,45° O
<i>Eppenrod (N)</i>	50,40° N	8,00° O	<i>Karlsruhe (T)</i>	49,03° N	8,36° O
Frankfurt/Main,Stadt (T+N)	50,17° N	8,62° O	<i>Mainz (N)</i>	49,98° N	8,30° O

*) Stationen, die außerhalb von Hessen liegen, sind durch kursive Schrift gekennzeichnet.

A.4 Lineare Temperaturtrends in °C, Stationen, Langzeitanalyse und Subintervalle, monatlich; Fettdruck bedeutet Signifikanz > 90%.

Station	Zeitintervall	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Frankfurt/M.	1901-2000	1,2	0,8	1,4	1,2	0,5	0,9	1,3	2,2	1,2	1,1	1,2	1,3
Geisenheim		0,7	0,4	0,9	0,6	0,1	0,2	0,8	1,8	1,0	1,0	0,9	0,8
Kassel		0,3	0,1	0,6	0,8	0,3	0,4	0,9	2,2	0,9	0,5	0,6	0,5
Karlsruhe		1,2	1,4	2,0	1,6	1,1	1,2	1,9	2,8	1,8	1,8	1,5	1,1
Frankfurt/M.	1901-2003	1,3	1,2	1,6	1,2	0,8	1,2	1,5	2,6	1,2	1,2	1,5	1,4
Geisenheim		0,8	0,7	1,0	0,6	0,1	0,5	1,0	2,2	0,9	1,1	1,1	0,9
Kassel		0,4	0,3	0,7	0,8	0,5	0,6	1,0	2,5	0,7	0,5	0,8	0,3
Karlsruhe		1,3	1,7	2,3	1,6	1,4	1,5	2,1	3,2	1,7	2,0	1,7	1,1
Frankfurt/M.	1951-2000	1,9	1,9	1,8	0,2	1,3	0,5	1,2	2,5	0,6	0,6	0,2	1,3
Geisenheim		1,5	1,5	1,5	0	0,9	-0,1	1,2	2,2	0,4	0,7	-0,1	1,0
Kassel		0,7	0,9	1,0	-0,3	0,6	-0,9	0,3	1,3	-0,2	-0,5	-1,0	-0,1
Karlsruhe		1,9	2,2	2,0	0,6	1,4	0,6	1,4	2,9	0,7	1,3	0,4	1,4
Frankfurt/M.	1971-2000	0,9	0,9	1,2	1,6	1,6	0,9	0,4	1,4	0,5	1,4	0,4	0,6
Geisenheim		1,0	0,7	1,4	1,5	1,5	0,3	0,6	1,4	0,7	1,5	0,3	0,4
Kassel		-0,1	0,3	0,5	1,4	0,7	-0,2	-0,3	0,3	0	0,3	-0,6	-0,7
Karlsruhe		1,4	1,4	1,7	1,8	1,8	1,4	0,9	2,3	1,0	1,8	0,3	1,1
Frankfurt/M.	1974-2003	0,3	2,2	1,5	1,7	2,6	1,7	1,2	2,8	0,1	1,3	1,3	0,3
Geisenheim		0	2,0	0,9	1,6	1,9	1,1	1,4	2,7	0	1,3	0,9	0
Kassel		-0,5	1,7	0,5	1,4	1,7	0,6	0,6	1,8	-0,6	-0,2	0,3	-0,9
Karlsruhe		0,1	2,2	1,6	1,8	2,6	2,3	1,3	3,2	-0,1	1,6	0,8	0,5

A.5a Lineare Niederschlagstrends in %, Stationen, Langzeitanalyse und Subintervalle, monatlich, Fettdruck bedeutet Signifikanz > 90%.

Station	Zeitintervall	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Göttingen	1901-2000	8	8	79	-6	25	35	-27	-19	-4	-15	14	38
Alsfeld		8	11	32	10	15	22	-11	-19	6	5	17	28
Greifenstein		21	7	51	-6	11	17	13	-14	42	13	26	44
Eppenrod		49	25	83	12	22	18	8	-13	14	1	25	42
Bad Camberg		13	35	40	-1	30	11	1	-17	2	18	20	34
Geisenheim		-10	11	20	17	22	13	17	-33	-1	3	7	8
Frankfurt/M.		7	10	6	-1	9	7	21	-26	-7	4	9	22
Mainz		16	37	46	27	42	16	43	-26	15	25	29	47
Eberbach		21	31	37	-10	27	12	3	-33	4	35	11	46
Aschaffenburg		1	23	34	5	16	21	-1	-27	8	5	15	19
Göttingen	1901-2003*)	7	9	79	-3	26	30	-25	-24	-1	-12	18	40
Alsfeld		3	34	28	1	16	13	-5	-29	8	11	22	16
Greifenstein		22	14	58	-2	14	14	26	-17	38	16	27	41
Eppenrod		22	37	82	13	21	22	9	-19	17	3	30	41
Geisenheim		-6	17	24	13	23	3	14	-36	-1	4	12	6
Frankfurt/M.		9	17	17	-2	9	0,5	24	-29	-7	8	18	18
Mainz		18	49	66	27	42	12	41	-28	11	28	41	46
Eberbach		22	38	47	-9	26	6	1	-37	5	41	14	47
Göttingen	1951-2000	16	15	73	0	2	-18	-33	-34	4	13	26	13
Alsfeld		28	31	54	2	4	-33	-10	-37	8	32	6	22
Greifenstein		24	8	59	19	-2	-18	0	-45	11	96	2	24
Eppenrod		33	31	77	17	-15	-16	22	-36	23	26	-2	25
Bad Camberg		-10	21	45	-7	0	-28	6	-51	12	38	-7	5
Geisenheim		-13	6	26	-11	20	-44	15	-46	3	24	-19	6
Frankfurt/M.		-17	5	20	10	-12	-25	65	-43	13	63	-11	20
Mainz		8	45	52	37	18	-20	39	-55	27	73	6	31
Eberbach		5	11	55	-4	40	-14	22	-46	21	53	15	33
Aschaffenburg		-27	-9	44	-4	14	-36	-8	-47	-6	4	2	-10

Fortsetzung	Zeitintervall	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Göttingen	1971-2000	15	108	59	-13	5	-48	6	14	23	50	4	5
Alsfeld		30	55	5	-28	-51	-48	56	-14	57	24	-10	21
Greifenstein		22	89	41	5	-21	-24	154	1	146	106	-31	45
Eppenrod		44	80	67	15	-31	-24	44	8	80	35	-35	19
Bad Camberg		7	117	-33	1	-23	-22	68	-16	112	32	-27	6
Geisenheim		1	38	1	-4	-21	-36	-55	-13	107	32	-19	23
Frankfurt/M.		4	57	23	28	-33	-10	65	-23	101	54	-17	38
Mainz		-2	72	27	34	-41	-25	81	-28	117	67	-11	55
Eberbach		2	98	57	10	21	-18	33	-16	144	33	-29	34
Aschaffenburg		3	68	37	0	-20	-34	3	-49	91	13	-8	5
Göttingen	1974-2003*)	-24	72	10	5	-4	-38	8	-3	10	57	9	-21
Alsfeld		-16	64	-4	-1	-16	-36	-17	-27	38	17	36	-32
Greifenstein		-10	76	4	27	3	-25	140	5	54	67	-23	-1
Eppenrod		-16	74	4	15	-19	-25	10	-25	46	32	-15	-15
Geisenheim		-8	8	-28	-18	-9	-41	26	-20	39	14	17	-21
Frankfurt/M.		-8	35	10	12	-20	-26	48	-31	41	36	27	-18
Mainz		-20	36	14	18	-33	-21	39	-28	44	26	39	-1
Eberbach		-26	75	16	12	19	-27	-12	-23	43	22	-12	-12

*) Bei den Stationen Bad Camberg und Aschaffenburg sind die Daten ab 2001 unvollständig und daher die Trends nur bis 2000 angegeben.

A.5b Lineare Niederschlagstrends in mm, Stationen, Langzeitanalyse und Subintervalle, monatlich (Signifikanz siehe Tab. A.5a).

Station	Zeitintervall	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Göttingen	1901-2000	4	3	22	-3	12	20	-22	-14	-2	-8	6	17
Alsfeld		4	4	12	5	8	14	-9	-13	3	3	8	13
Greifenstein		16	5	27	-3	6	11	9	-11	23	9	19	35
Eppenrod		27	12	31	6	12	12	6	-10	8	1	15	25
Bad Camberg		6	12	14	-0,3	15	7	1	-13	1	9	9	15
Geisenheim		-5	4	8	7	11	8	10	-29	-0,3	1	4	4
Frankfurt/M.		3	3	2	-0,3	4	4	11	-16	-3	2	4	9
Mainz		6	11	14	10	17	9	21	-18	7	10	12	18
Eberbach		18	21	24	-8	17	10	3	-33	3	23	9	37
Aschaffenburg		1	9	13	3	9	13	-0,4	-24	4	3	8	10
Göttingen	1901-2003*)	3	3	22	-1	13	17	-20	-18	-0,3	-6	8	17
Alsfeld		1	13	11	1	9	8	-4	-25	5	6	12	8
Greifenstein		18	10	30	-1	8	9	17	-14	21	11	19	33
Eppenrod		13	18	31	7	12	14	7	-15	9	2	18	25
Geisenheim		-6	6	9	6	11	2	9	-32	-0,4	2	6	3
Frankfurt/M.		3	5	5	-1	4	0,3	12	-18	-3	4	8	8
Mainz		7	14	19	10	17	7	21	-20	5	12	16	18
Eberbach		18	26	30	-6	17	5	1	-37	4	27	12	38
Göttingen	1951-2000	7	5	24	0,1	1	-15	-27	-26	2	5	11	7
Alsfeld		12	11	20	1	3	-29	-7	-28	4	15	3	12
Greifenstein		19	6	34	10	-1	-14	-0,3	-42	8	49	2	23
Eppenrod		22	15	34	8	-11	-13	15	-30	13	15	-2	18
Bad Camberg		-5	8	16	-4	-0,2	-22	4	-47	6	17	-4	3
Geisenheim		-6	2	10	-5	10	-38	9	-39	2	11	-11	3
Frankfurt/M.		-7	2	7	3	-6	-16	28	-28	5	21	-5	8
Mainz		3	14	17	13	9	-14	21	-44	11	26	3	14
Eberbach		5	9	36	-3	25	-13	17	-45	15	34	13	32
Aschaffenburg		-16	-4	18	-2	8	-33	-6	-42	-3	2	1	-6

Fortsetzung	Zeitintervall	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Göttingen	1971-2000	7	25	22	-6	3	-47	4	7	11	18	2	3
Alsfeld		13	18	3	-16	-48	-45	28	-8	24	12	-6	11
Greifenstein		19	41	27	3	-15	-19	61	1	59	57	-32	40
Eppenrod		28	33	33	8	-24	-20	27	5	36	20	-31	14
Bad Camberg		3	29	13	0,3	-16	-16	33	-10	37	16	-17	3
Geisenheim		1	12	1	-2	-14	-27	28	-8	35	15	-11	11
Frankfurt/M.		2	14	7	9	-19	-5	29	-11	29	20	-8	16
Mainz		-1	20	10	13	-30	-17	39	-15	36	27	-6	24
Eberbach		2	52	39	6	15	-17	25	-11	62	25	-33	34
Aschaffenburg		1	21	17	0,1	-14	-29	2	-39	33	7	-5	3
Göttingen	1974-2003*)	-14	20	5	2	-2	-32	5	-2	5	20	5	-15
Alsfeld		-9	22	-2	-1	-11	-28	-13	-18	18	9	18	-24
Greifenstein		-11	40	4	14	2	-20	65	3	31	43	-23	-2
Eppenrod		-13	34	3	8	-13	-22	7	-19	25	18	-12	-13
Geisenheim		-4	3	-17	-9	-6	-29	15	-11	17	7	8	-14
Frankfurt/M.		-3	11	4	4	-10	-15	24	-16	15	14	11	-10
Mainz		-10	13	7	8	-23	-13	23	-15	18	13	17	-1
Eberbach		-32	47	15	8	14	-26	-12	-16	28	18	-12	-13

*) Bei den Stationen Bad Camberg und Aschaffenburg sind die Daten ab 2001 unvollständig und daher die Trends nur bis 2000 angegeben.

A.6a Mittlere Jahresgänge 1951-2000 der Temperatur in °C (rot) und des Niederschlags in mm (grün), Monate (vgl. A.3)

Station	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Alsfeld, N	48	42	47	50	65	75	68	62	56	55	55	59
Aschaffenburg, N	52	46	49	50	61	76	71	69	56	55	57	61
Bad Camberg, N	47	41	44	47	61	69	68	69	53	54	54	57
Eberbach, N	99	83	85	68	75	87	86	76	76	81	90	113
Eppenrod, N	70	57	61	55	66	77	74	69	64	64	72	78
Frankfurt/M., N	44	39	45	46	57	68	66	65	52	53	55	56
Frankfurt/M., T	1,7	2,6	6,5	10,3	14,7	17,8	19,6	19,0	15,3	10,4	5,6	2,9
Geisenheim, N	39	34	35	36	49	57	56	52	43	43	46	47
Geisenheim, T	1,4	2,2	5,9	9,7	14,1	17,0	18,8	18,3	14,7	9,9	5,2	2,6
Göttingen, N	48	38	45	44	59	74	67	64	51	45	49	57
Greifenstein, N	90	70	74	56	62	71	76	72	73	75	86	108
Karlsruhe, T	1,5	2,5	6,3	10,1	14,5	17,7	19,8	19,1	15,4	10,3	5,3	2,6
Kassel, T	0,4	1,1	4,6	8,5	13,0	16,0	17,7	17,3	13,8	9,3	4,5	1,7
Mainz, N	41	37	41	42	55	62	65	58	48	50	49	53

A.6b Mittlere Jahresgänge 1951-2000 der Temperatur in °C (rot) und des Niederschlags in mm (grün), Jahreszeiten und Jahr (vgl. A.3).

Station	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Alsfeld, N	161	204	165	150	681
Aschaffenburg, N	160	215	168	159	702
Bad Camberg, N	152	206	161	145	663
Eberbach, N	228	249	246	296	1018
Eppenrod, N	182	221	201	205	808
Frankfurt/M., N	148	199	160	138	645
Frankfurt/M., T	10,5	18,8	10,4	2,4	10,5
Geisenheim, N	120	165	133	120	538
Geisenheim, T	9,9	18,1	10,0	2,0	10,0
Göttingen, N	148	205	145	143	640
Greifenstein, N	192	220	234	267	914
Karlsruhe, T	10,3	18,8	10,3	2,1	10,4
Kassel, T	8,7	17,0	9,2	1,0	9,0
Mainz, N	138	186	147	131	601

A.7 Monatliche Ergebnisse der Extremwertanalyse für die angegebenen Zeitreihen 1901-2003 (2001).

Die Abkürzungen bedeuten (vgl. dazu auch Legende zu Tab. 6):

Lage: Vorzeichen und Trendordnung des Lageparameters (Mittelwerts);

Poly: Vorzeichen und Ordnung der polynomialen Komponente des Mittelwerts;

Streu: Vorzeichen und Ordnung des Streuparameters (Standardabweichung);

10: Jährlichkeit 10 Jahre (entsprechend dem 10%-Perzentil am Beginn des betrachteten Zeitintervalls);

100: Jährlichkeit 100 Jahre (entsprechend dem 1%-Perzentil am Beginn des betrachteten Zeitintervalls);

O: Vorzeichen der Änderung der Überschreitungswahrscheinlichkeit und Jährlichkeit am Ende des betrachteten Zeitintervalls;

U: Entsprechend für die Änderung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit.

Rot bedeutet generell Zunahme (bei O und U extremer), blau Abnahme (bei O und U weniger extrem).

Es folgen die Tabellen für die einzelnen Stationen in separater Form, T = Temperatur, 4 Stationen; N = Niederschlag, 10 Stationen.

Temperatur

Frankfurt am Main 1901 – 2003												
T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	5	5	5	2	5	5	2	5	1	2	1	4
Poly	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Streu	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	3.4	3.6	1.9	2.1	2.7	2.4	2.7	1.0	3.0	2.9	2.7	2.5
100-O	17.8	19.7	6.4	29.9	11.7	9.3	11.6	1.2	14.3	13.4	11.6	10.5
10-U	46.1	41.0	214	>10 ⁵	80.0	112	80.4	>10 ⁵	60.4	66.2	80.4	92.9
100-U	917	778	7430	>10 ⁶	1970	3130	1980	>10 ⁶	1340	1520	1990	2410

Geisenheim 1901 – 2003												
T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	5	0	0	0	5	5	1	1	1	4
Poly	0	0	0	0	3	0	0	0	-2	0	0	0
Streu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	10	10	2.9	10	2.6	10	3.2	1.1	3.9	3.2	3.5	3.4
100-O	100	100	13.2	100	11.3	100	16.1	1.6	22.0	16.0	18.7	17.5
10-U	10	10	67.4	10	84.2	10	52.0	26900	36.3	52.6	43.6	47.1
100-U	100	100	1560	100	2110	100	1090	>10 ⁶	656	1100	847	945

Kassel 1901 -2003												
T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Poly	0	0	0	0	0	0	0	3	-2	0	-2	0
Streu	0	0	0	-4	0	0	3	0	0	0	0	0
10-O	10	10	10	57.7	10	10	2.7	1.0	4.6	10	4.7	10
100-O	100	100	100	15800	100	100	6.2	1.2	29.3	100	29.9	100
10-U	10	10	10	57.7	10	10	10.8	>10 ⁵	27.0	10	26.4	10
100-U	100	100	100	15800	100	100	43.1	>10 ⁶	430	100	418	100

Karlsruhe 1901 -2003												
T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	5	5	4	1	5	5	2	4	1	2	1	5
Poly	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
Streu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	3.8	3.0	1.5	2.2	1.9	1.2	2.0	1.0	2.5	1.8	2.5	2.6
100-O	21.1	14.5	3.9	8.2	6.1	2.2	6.8	1.2	10.1	5.6	10.4	10.9
10-U	37.9	59.3	632	139	233	3950	192	>10 ⁵	99.0	281	94.7	88.5
100-U	697	1310	31100	4170	8310	>10 ⁵	6450	>10 ⁶	2640	10700	2480	2260

Niederschlag (nur Überschreitungswahrscheinlichkeiten)

Göttingen (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	3	0	0	0	0	-5	0	0	0	3
Poly	0	0	0	0	-3	0	0	0	2	0	0	0
Streu	3	1	2	0	5	0	0	-2	0	0	0	0
10-O	4.7	4.4	2.0	10	7.3	10	10	99.6	15.1	10	10	5.4
100-O	19.2	16.4	5.0	100	30.2	100	100	4180	152	100	100	52.0

Alsfeld (1901 – 2001)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poly	0	0	-3	0	-3	-2	2	0	0	0	0	2
Streu	5	0	3	0	0	0	-5	0	0	0	0	0
10-O	4.1	10	7.5	10	20.9	7.9	102	10	10	10	10	8.2
100-O	13.4	100	26.2	100	216	80.3	8240	100	100	100	100	82.9

Greifenstein (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	3	0	0	0	5	0	0	0	0	3
Poly	0	0	-4	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Streu	1	0	3	0	0	0	0	-5	0	0	0	0
10-O	4.8	10	4.9	10	10	10	2.8	77.8	10	7.9	10	4.9
100-O	19.4	100	17.6	100	100	100	23.7	7110	100	77.2	100	45.5

Eppenrod (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	2	0	0	0	0	-5	0	0	0	2
Poly	0	0	0	0	-3	0	0	0	0	0	0	0
Streu	1	2	3	0	0	0	-3	-5	0	0	0	0
10-O	3.2	4.6	2.2	10	21.0	10	88.2	855	10	10	10	5.4
100-O	7.5	17.8	5.7	100	222	100	8920	>10 ⁵	100	100	100	51.3

Bad Camberg (1901 – 2001)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poly	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Streu	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	4.8	4.5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
100-O	19.6	17.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Geisenheim (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	0	5	-4	0	5	0	0
Poly	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Streu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	10	4.8	10	10	10	10	4.8	21.5	10	4.6	10	10
100-O	100	18.8	100	100	100	100	45.2	227	100	43.8	100	100

Frankfurt/Main (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	-5	0	-3	0	0	0	0
Poly	0	0	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Streu	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	10	10	7.8	10	10	810	10	22.7	10	10	10	10
100-O	100	100	32.9	100	100	>10 ⁵	100	233	100	100	100	100

Mainz (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	4	0	0	0	0	-5	0	5	2	3
Poly	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Streu	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	4.0	3.6	2.2	10	10	10	10	21.2	10	3.4	5.3	5.0
100-O	13.6	10.7	5.4	100	100	100	100	219	100	30.0	50.2	46.2

Eberbach/Neckar (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	0	0	-4	0	5	0	0
Poly	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Streu	1	0	4	0	0	0	0	-5	0	0	0	0
10-O	3.7	10	2.8	10	10	10	10	7280	10	4.2	10	6.4
100-O	10.9	100	7.4	100	100	100	100	>10 ⁶	100	38.8	100	62.9

Aschaffenburg (1901 – 2003)												
N	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lage	0	0	0	0	0	0	0	-5	0	0	0	0
Poly	3	0	-4	0	0	-2	0	0	0	0	0	0
Streu	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-O	9.6	4.5	6.9	10	10	7.7	10	24.5	10	10	10	10
100-O	95.9	17.4	23.4	100	100	74.7	100	252	100	100	100	100