

Entwicklung der Erdbodentemperaturen auf der Baar – Trendanalysen an der Klimastation Fürstenberg

von TOBIAS LENHART und ALEXANDER SIEGMUND

Die Lufttemperatur dient oft als Indikator für Klimaveränderungen. Aber auch aus der Analyse von Erdbodentemperaturen in verschiedenen Tiefen lassen sich Trends der Klimaentwicklung erkennen. Beides wird für die Baar auf Basis 20-jähriger Messungen von Luft- und Erdbodentemperaturen an der Klimastation Fürstenberg (1995 bis 2015) untersucht.

Einleitung und Zielsetzung der Studie

Die vielfältigen Folgen des globalen Klimawandels sind inzwischen weltweit unverkennbar: Extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Trockenperioden oder Starkniederschläge nehmen zu. Seit 1880 sind die Temperaturen im globalen Mittel um 0,85°C gestiegen (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2014). Deutschland liegt mit einer Erhöhung von etwas mehr als 1,3°C über dem globalen Mittelwert (DEUTSCHE METEOROLOGISCHE GESELLSCHAFT 2015). Dabei war der Temperaturanstieg seit den 1970er Jahren mit weltweit etwa 0,55°C bis heute besonders stark, mit vielfältigen Folgen für Mensch und Umwelt.

Einer der wichtigsten Bereiche (Sphären) des Systems Erde stellt die Pedosphäre (Bodenschicht) dar. Diese Gesamtheit des Bodens umfasst nur einen schmalen Grenzbereich der Erdoberfläche. Er ist Lebensraum für unzählige Lebewesen, Speicher von Nährstoffen und Wasser sowie Grundlage des Wachstums von (Nutz-) Pflanzen als Basis von Nahrungsketten bis hin zum Menschen. Zur Wahrnehmung dieser Funktionen bedarf es im Boden eines hinreichenden Wasserangebots und einer Wärmezufuhr. Kommt es zu einem Mangel oder Überangebot dieser klimatisch bedingten Parameter, so werden der Boden und dessen Lebewesen geschädigt, was mitunter zu Ernteaussfällen führen kann (BRÜMMER/ BLUME 2010).

Dem Boden kommt aber in der aktuellen Klimadebatte eine weitere mögliche Funktion zu, und zwar als Indikator für Klimaveränderungen. In Böden sollen sich demnach Temperaturveränderungen deutlicher zeigen als bei der herkömmlichen Lufttemperatur. Der Boden gilt dabei als sogenannter „Low-Pass-Filter“, was bedeutet, dass Temperaturschwankungen gedämpft werden. Dadurch werden größere Temperaturextreme und -schwankungen innerhalb und zwischen einzelnen Jahren „herausgefiltert“, die möglicherweise einen längeren Trend überdecken (BÖHME 2011). Dies wird dadurch sichtbar, dass die jährliche Temperaturamplitude bei der Lufttemperatur am Beispiel der Klimastation Fürstenberg am größten ist (Bild 1 – hellblaue Linie). Je tiefer man in den Boden vor-

Entwicklung der Erdbodentemperaturen auf der Baar

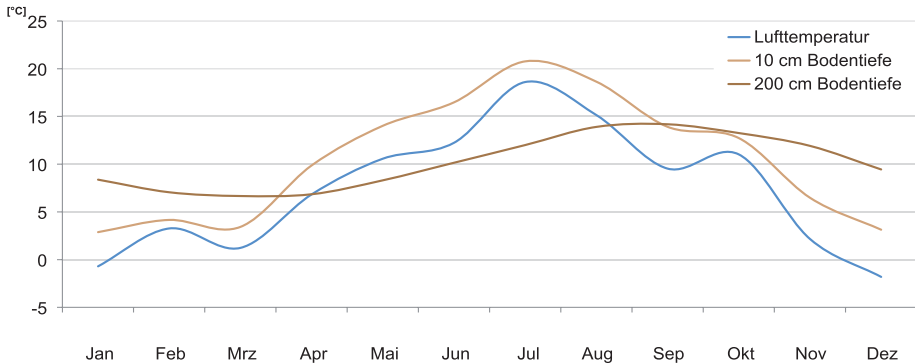


Bild 1: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur und der Erdbodentemperaturen an der Station Fürstenberg im Zeitraum von 1995 bis 2004. Alle Bilder: eigener Entwurf.

dringt, umso schwächer werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Monaten und die Amplitude nimmt ab. So ist der Temperaturverlauf in zwei Metern Tiefe nur noch sinusförmig ausgeprägt.

Aus diesem Grund werden in dieser Studie die Luft- und Bodentemperaturen der letzten 20 Jahre (Daten ab 1995 verfügbar) am Beispiel der Klimastation in Fürstenberg (Stadt Hüfingen) untersucht. Im Mittelpunkt stehen dabei die Fragen, inwieweit sich auf der Baar in diesem Zeitraum Temperaturveränderungen insbesondere bei den Bodentemperaturen nachweisen lassen und wie diese im überregionalen Kontext einzuordnen sind. Aus dieser Zielsetzung leiten sich die methodischen Fragestellungen ab: Welche Verfahren gibt es zur Berechnung und Darstellung der Temperaturveränderungen und welche sind für diese Arbeit geeignet? Wie ist die Qualität der herangezogenen Daten? Bedarf es einer Datenkorrektur?

Erst durch die Beantwortung der methodischen Fragestellungen ist es möglich, Aussagen zu den Temperaturveränderungen zu treffen, weshalb ein Fokus der Arbeit auch auf der Methodik zur Optimierung der Datenqualität liegt.

Regionalklimatische Einordnung und Charakteristika der Baar

Der Naturraum der Baar ist durch besondere klimatische Verhältnisse geprägt, wie sie sonst in Deutschland kaum vorzufinden sind. Nicht umsonst wird die Region als „rau“ oder als einer der Kältepole Deutschlands bezeichnet. Mit rund 6 bis 7°C Jahresdurchschnittstemperatur liegt die Baar unterhalb des deutschlandweiten Mittelwertes von etwa 8,2°C. Dieser Wert bezieht sich auf die klimatische Normalperiode von 1961 bis 1990 (DEUTSCHER WETTERDIENST 2015a/SIEGMUND 1999). In der letztmöglich ermittelbaren Klima-Normalperiode (1981 bis 2010) liegt die jährliche Mitteltemperatur in Deutschland bei 8,9°C (DEUTSCHER WETTERDIENST 2015b).

Begrenzt vom Hochschwarzwald im Westen und der Schwäbischen Alb im Osten bildet die Baar eine Hochmulde, die zur Bildung von Kaltluftseen neigt.

Trendanalysen an der Klimastation Fürstenberg

Diese entstehen bei autochthonen Strahlungswetterlagen, also bei geringem über-regionalem Luftmassenaustausch, was häufig bei Hochdruckgebieten der Fall ist. Durch die nächtliche Ausstrahlung und somit Auskühlung der Bodenoberfläche kommt es zu einer Bodeninversion mit Bildung von Bodennebel. Entsteht die kalte Luft über leicht geneigten Flächen, fließt die Luft aufgrund ihrer höheren Dichte hangabwärts und sammelt sich über den Niederungen der Baar-Hochmulde. Diese entlang des Hanges nach unten gerichtete Luftmassenbewegung wird als „karabatischer Wind“ bezeichnet. Demnach bedingen die geographische Lage und die Topographie das kontinentale Klima der Baar (SEGMUND 1999).

Verfügbarkeit und Qualität der Luft- und Erdbodentemperaturen

Für die Studie wurden analoge sowie digital erfasste Daten der Klimastation Fürstenberg (797 m) am Westhang des gleichnamigen Berges herangezogen. Die analog erfassten Daten wurden mit Sensoren der Conrad Electronic SE erhoben. Abgelesen wurden die Werte jeweils um 7:30 Uhr, 14:30 Uhr und 21:30 Uhr (MEZ), was der an den tatsächlichen Sonnenstand angepassten „wahren Ortszeit“ der

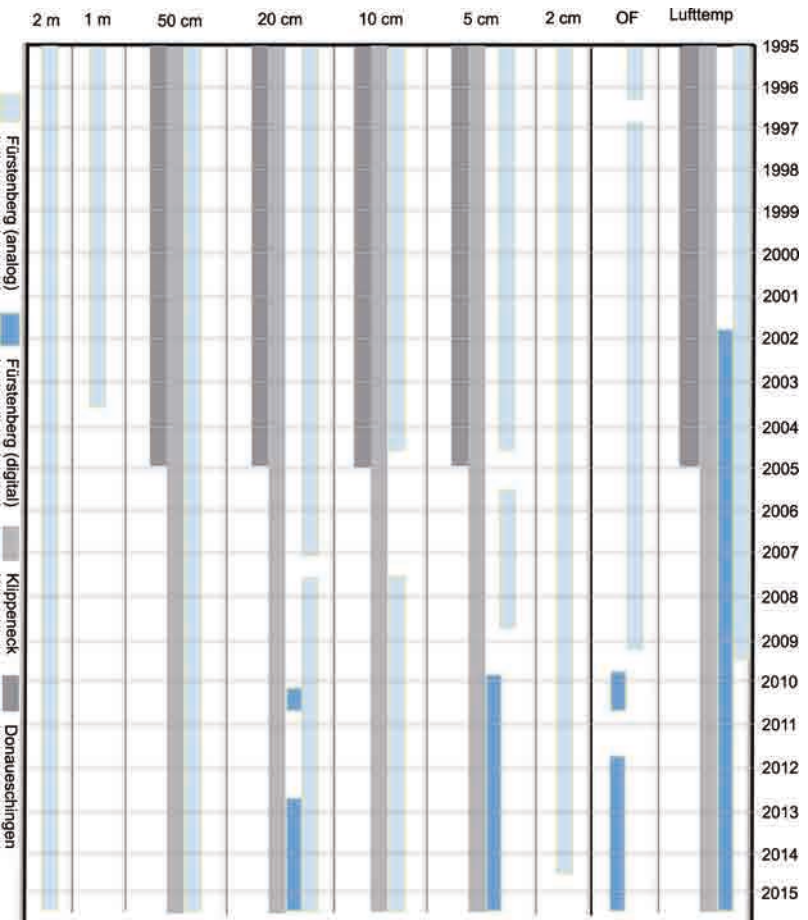


Bild 2: Verfügbarkeit der Daten an unterschiedlichen Stationen.

OF = Oberflächennahe Lufttemperatur.

sogenannten „Mannheimer Stunden“ entspricht. Für folgende Parameter stehen seit Beginn der Aufzeichnung im Jahre 1995 drei Messwerte pro Tag zur Verfügung:

- Lufttemperatur (2 m über Bodenoberfläche),
- oberflächennahe Lufttemperatur (5 cm über Bodenoberfläche),
- Erdbodentemperatur in 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 cm Tiefe.

Die analogen Aufzeichnungen wurden trotz des Einsatzes digitaler Widerstandsthermometer (PT 100) für die Lufttemperatur ab dem Jahr 2001 parallel fortgeführt. Für die Messung der oberflächennahen Lufttemperatur und der Erdbodentemperatur in 10 und 20 cm Tiefe wurden entsprechende Thermometer Ende 2009 zusätzlich implementiert.

Die Untersuchung von klimawandelbedingten Veränderungen der Temperaturen geschieht mittels Zeitreihenanalysen, die den methodischen Kern dieser Studie bilden. Dazu gehören Teilanalysen wie die der Überprüfung der Zeitreihenhomogenität und der Zeitreihenkorrelation sowie Trendanalysen. Für die Analyse der Zeitreihenhomogenität waren jedoch weitere Daten mit gesicherter Qualität notwendig, um die Daten der Station Fürstenberg im Hinblick auf deren Datenqualität und Datenhomogenität zu prüfen. Dazu eignen sich Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Aufgrund der räumlichen Nähe und der klimatischen Ähnlichkeit der Stationen wurden für die Studie die Zeitreihen der DWD-Stationen Klippeneck und Donaueschingen herangezogen.

Bild 2 zeigt die Verfügbarkeit der Daten der verschiedenen Parameter an den unterschiedlichen Stationen. Daraus ist abzulesen, dass die Daten zum Teil lückenhaft und oftmals nicht synchron vorhanden sind. Dennoch war eine Homogenitätsprüfung mit den Zeitreihen der Station Klippeneck möglich.

Aufbereitung der Luft- und Erdbodentemperaturen

Der Dateninput für Zeitreihenanalysen erfolgt in der Klimatologie meistens auf Basis der Monatswerte. Im Falle dieser Studie bedeutet das, dass aus drei einzelnen Werten pro Tag Monatsmittelwerte errechnet werden müssen. Gleichzeitig wird durch die Aggregation der einzelnen Werte versucht, den großen Anteil an fehlenden Tageswerten zu minimieren. Dazu sind mehrere Schritte notwendig.

Die gängigste Methode, Tagesmittel aus drei Temperaturen der sogenannten „Mannheimer Stunden“ zu berechnen, wird durch die Kämtz'sche Formel beschrieben. Dabei werden die gemessenen Temperaturen zu den Zeitpunkten 7:30 Uhr, 14:30 Uhr und 21:30 Uhr (MEZ) wie folgt gemittelt:

$$T_M = (T_{07:30} + T_{14:30} + 2 * T_{21:30}) / 4.$$

Die Formel ist allerdings nur auf die Lufttemperatur anwendbar. Für alle anderen Parameter wie die der oberflächennahen Lufttemperatur und der Erdbodentemperaturen wird das einfache arithmetische Mittel gebildet (BEHRENDT/ZIMMERMANN 2008, BÖHME 2011). Die Tagesmittelwerte, die aus drei Werten berechnet wurden, werden im Folgenden mit T abgekürzt.

Oftmals waren jedoch nur ein oder zwei Werte pro Tag verfügbar. Auch hierfür wurden Tagesmittelwerte berechnet, die im Folgenden mit F bezeichnet werden. Da die Mittelwertbildung von F jedoch statistisch nicht korrekt ist, wurde durch die im Nachfolgenden beschriebene Statistik versucht, die Bildung der Tagesmittelwerte aus nur einem oder zwei Messwerten valide zu machen. Dadurch wird die Vollständigkeit der Datensätze erhöht.

Um dieses Problem zu lösen, wurden mittlere Abweichungen zwischen F und T errechnet. Diese werden wiederum für jeden Monat gemittelt. So erhält man für jeden Monat und Parameter einen Wert, der im besten Falle 0 beträgt. Das würde bedeuten, dass eine Tagesmittelwertbildung aus zwei Werten genauso gut ist wie aus drei Werten. Da dieser Fall aber nur in der Theorie besteht, musste eine Obergrenze der Abweichungen zwischen F und T angenommen werden. In dieser Studie wurde hierfür ein Wert von $0,25^{\circ}\text{C}$ angesetzt.

Das folgende Beispiel soll die Vorgehensweise verdeutlichen:

Im Monat Januar gibt es 31 Tagesmittelwerte. Nun werden für jeden Tag, ungeachtet der Tatsache, ob alle drei Einzelwerte vorhanden sind, Tagesmittelwerte aus nur zwei Terminen gebildet. Dadurch entstehen drei mögliche Terminpaarungen, nämlich 7:30 und 14:30 Uhr, 7:30 und 21:30 Uhr und 14:30 und 21:30 Uhr. Aus diesen Paaren werden die sogenannten F-Tagesmittel errechnet. Diese werden nun von den T-Tagesmitteln abgezogen. Wäre also das F-Tagesmittel für die erste Terminpaarung (F) 1°C und das Tagesmittel aus drei Werten (T) 2°C , so ergäbe sich eine Differenz von einem Grad Celsius. Das Ergebnis zeigt nun also die Abweichung beider Berechnungsmethoden. Daraus wird das arithmetische Mittel aus allen 31 Abweichungen für jedes Terminpaar errechnet und diese Werte wiederum für einen Monat gemittelt. Liegt der Wert der final errechneten Abweichung unterhalb des definierten Schwellenwertes von $0,25^{\circ}\text{C}$, so können Tagesmittelwerte statistisch „solide“ (valide) gebildet werden, selbst wenn nur zwei Werte pro Tag vorhanden sind. Laut BÖHME (2011) sind Abweichungen von

	2 cm	5 cm	10 cm	20 cm
Januar	0,086			
Februar	0,326	0,247		
März		0,268	0,187	
April			0,583	0,182
Mai				0,200
Juni				0,233
Juli				0,165
August	0,757		0,564	0,160
September			0,223	
Oktober		0,274	0,226	
November	0,257	0,174		
Dezember	0,072			

Bild 3: Mittlere Abweichung der F-Werte gegenüber den T-Werten der verschiedenen Sensoren pro Monat. Die grünen Farben symbolisieren, dass für diese Monate Tagesmittelwerte aus zwei Messterminen gebildet werden können.

bis zu $0,15^{\circ}\text{C}$ in einem Meter Bodentiefe akzeptabel. Gemäß der beschriebenen Vorgehensweise beträgt die Abweichung zwischen F und T bereits in 50 cm Tiefe nur $0,14^{\circ}\text{C}$, was die Zuverlässigkeit der Statistik belegt.

Bild 3 zeigt, für welche Parameter und welche Monate Tagesmittelwerte aus nur zwei Werten errechnet wurden. In 2 cm Tiefe konnten nur die Tageswerte der Monate Januar und Dezember aus zwei Werten errechnet werden, in 5 cm Tiefe sind es die Tageswerte der Monate Januar, Februar, November und Dezember. Bereits in 20 cm Tiefe ist die Methode in allen Monaten zulässig, und ab einem Meter Bodentiefe kann das Tagesmittel aus nur einem vorhandenen Wert bestimmt werden, da die Schwankungen mit zunehmender Tiefe abnehmen.

Nachdem auf diese Weise versucht wurde, so viele Tagesmittelwerte wie möglich zu bestimmen, können die Monatsmittelwerte mit Hilfe des arithmetischen Mittels ermittelt werden. Trotz des Versuchs der Vervollständigung der Daten wiesen einige Monate trotzdem zu wenig Tagesmittelwerte auf. Nach statistischen Berechnungen zu Vertrauensbereichen/Konfidenzintervallen (SCHÖNWIESE 2013a) wurde beschlossen, dass die Mindestzahl auf 15 Tagesmittelwerte gesetzt werden muss, um statistisch signifikante Monatsmittelwerte zu erhalten.

Überprüfung der Homogenität der Temperaturzeitreihen

Die Erdbodentemperatur-Sensoren wurden bei der Installation kalibriert, im Nachhinein war dies allerdings nicht mehr möglich, weil diese mit Erdreich bedeckt sind. Daraus ergibt sich in der Regel im Laufe der Zeit ein gewisser Fehler durch eine sensorbedingte Verschiebung der Messwerte, die im Vergleich zu den realen Temperaturen zu leicht erhöhten oder erniedrigten Werten führen können. Dies kann „Scheintrends“ bei Temperaturzeitreihen verursachen, die es durch eine Überprüfung der Homogenität der Temperaturzeitreihen zu vermeiden gilt. Solche „Scheintrends“ werden Inhomogenitäten genannt und können als lineare Trends auftauchen, die in der Regel schwieriger zu detektieren sind als abrupte Sprünge in den Messwerten. Ziel eines Homogenitätstests ist es, Inhomogenitäten zu detektieren und zu beseitigen oder zu korrigieren.

Es existieren zwei Arten von Homogenitätstests. Wird nur die vorhandene Datenreihe auf Inhomogenitäten überprüft, handelt es sich um absolute Homogenitätstests. Diese sind jedoch kritisch zu beurteilen, da keine Prüfung zur Validität zur Verfügung steht. Weitaus zuverlässiger sind daher relative Homogenitätstests. Sie verwenden Referenzzeitreihen mit gesicherter Homogenität, um Inhomogenitäten in der eigenen Messreihe aufzudecken. Relative Homogenitätstests beruhen auf der Tatsache, dass benachbarte Klimastationen den gleichen Veränderungen des Klimas unterworfen sind. Somit sind Inhomogenitäten auf unnatürliche Veränderungen der Stationsgeschichte zurückzuführen.

Die gängigsten relativen Homogenitätstests sind die von BUISSHAND (1982), ALEXANDERSSON (1986) sowie die Doppelsummenanalyse nach SEARCY/HARDISON (1960) und die Differenzenmethode. Für die Studie am geeignetsten erscheint die Differenzenmethode, die allerdings um eine Korrekturmethode erweitert wer-

den musste. Zur Überprüfung der Ergebnisse dient die Doppelsummenanalyse nach SEARCY/HARDISON.

Für die Homogenitätsprüfung wurden zu Beginn zwei Annahmen getroffen: Zum einen wird von einer linearen Inhomogenität ausgegangen und zum anderen muss angenommen werden, dass die Referenzzeitreihe homogen ist (AGUILAR et al. 2003, ALEXANDERSSON 1986, BUISSHAND 1982, HERZOG/MÜLLER-WESTERMEIER 1998, LÜERS et al. 2014, PAESLER 1983, SEARCY/HARDISON 1960).

Im ersten Schritt eines relativen Homogenitätstests, so auch bei der Differenzenmethode, müssen die Inhomogenitäten aufgedeckt werden. Hierzu wurden die Datenreihen der Lufttemperatur und der Erdbodentemperaturen in 5, 10, 20 und 50 cm Tiefe von Fürstenberg (a = analog, siehe Bild 2) den Referenzzeitreihen von Klippeneck gegenübergestellt. Nach Subtraktion der beiden Reihen erhält man die Differenz der einzelnen Monatsmittelwerte. In einem Liniendiagramm abgetragen, sollten die Differenzen x-Achsen-parallel verlaufen. Das würde bedeuten, dass die Zeitreihe von Fürstenberg (a) homogen ist, da sie denselben Trend aufweist, wie die Referenzzeitreihe der Station Klippeneck.

Im Umkehrschluss bedeutet eine Abweichung der Steigung der Temperaturkurven, dass die Daten von Fürstenberg (a) inhomogen wären. Die Abweichung lässt sich dabei durch eine Gerade mit der Funktion $f(x) = ax + b$ beschreiben. Ist die Steigung positiv, so bedeutet dies, dass die Messgeräte der betrachteten Zeitreihe von Fürstenberg (a) im Laufe der Zeit etwas höhere Temperaturen angezeigt haben, als tatsächlich vorhanden.

In einem zweiten Schritt muss die Zeitreihe von Fürstenberg (a) abschließend korrigiert werden. Ziel ist es, die Steigung der Reihe der Differenzen gegen Null laufen zu lassen. Beim Vergleich einer Nullgeraden mit einer davon abweichenden Geraden ist die Differenz des ersten Wertes immer am geringsten. Die Abweichungen werden mit zunehmender Entfernung vom Ursprung immer größer, so dass die Differenz beim letzten Wert der beiden Reihen am größten ist. Das bedeutet, dass die Anwendung eines einheitlichen Korrekturfaktors nicht möglich ist.

Die Basis für diesen Faktor bildet dennoch die Steigung a der Trendlinie der Differenzenreihe. Um die größte Abweichung auszugleichen, muss ebenfalls der größte Multiplikator zum Korrekturfaktor hinzugerechnet werden. Der Multiplikator spiegelt den x-ten Wert der Anzahl einer Datenreihe wider, was bedeutet, dass beispielsweise beim 100. Wert der Korrekturfaktor mit 100 multipliziert wird. Das sich daraus ergebende Produkt wird vom x-ten Wert der zu testenden Zeitreihe – hier Fürstenberg (a) – entweder abgezogen oder hinzugerechnet. Misst ein Sensor zum Beispiel kontinuierlich zu warme Temperaturen, so ist die Steigung der Differenzenreihe positiv, und die Werte müssen von der Zeitreihe Fürstenberg (a) abgezogen werden.

Simultan wird diese Korrektur für jeden anderen Wert der Reihe durchgeführt, bis schließlich die Differenzenreihe parallel zur x-Achse verläuft. Wird folglich die zu testende, korrigierte Zeitreihe in einem Diagramm abgetragen, so weist

Entwicklung der Erdbodentemperaturen auf der Baar

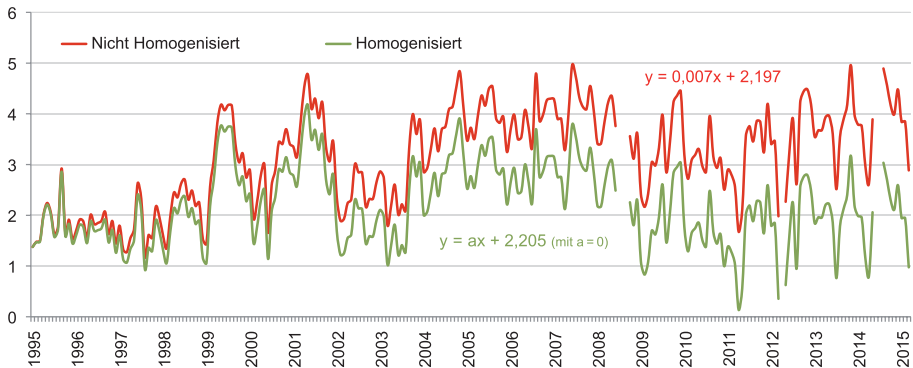


Bild 4: Vergleichende Darstellung der Differenzenreihe der Erdbodentemperatur in 50 cm Tiefe vor und nach der Korrektur. Hinweis: Formeln beziehen sich auf die Trendgerade.

sie nun eine andere Trendliniensteigung auf als zuvor, im besten Falle die Steigung Null. Zum besseren Verständnis dient **Bild 4**. Dargestellt sind die Differenzen-Zeitreihen des Sensors in 50 cm Bodentiefe. Die rote Linie stellt die Differenzenreihe vor der Korrektur dar, während die grüne Linie die Differenzen nach der Korrektur darstellt. Deutlich zu sehen ist der Unterschied in den jeweiligen Steigungen.

Überprüfung der Datenhomogenisierung mittels Doppelsummenanalyse

Die neu generierten Monatsmittelwerte für die Zeitreihen von Fürstenberg (a) müssen abschließend auf ihre statistische Richtigkeit und Präzision untersucht werden. Dazu eignet sich die Doppelsummenanalyse von SEARCY/HARDISON (1960). Dafür werden die homogenisierten Daten abermals in einem Diagramm mit den Daten von Klippeneck abgetragen. Diesmal werden allerdings die kumulierten Temperaturen voneinander subtrahiert. Ein Beispiel soll die Vorgehensweise verdeutlichen:

Man möchte testen, ob die homogenisierten Daten für die Lufttemperatur zuverlässig sind. Dazu werden alle Werte der Lufttemperatur nacheinander summiert. So ergibt sich aus dem ersten und zweiten Wert der dritte Wert und aus den ersten drei Werten der vierte Wert und so weiter. Dieses Vorgehen wird nun auch auf die Zeitreihe der Lufttemperatur der Station Klippeneck angewandt. Im Anschluss daran werden die beiden Zeitreihen subtrahiert und in einem Liniendiagramm aufgetragen.

Im Idealfall folgt daraus eine Gerade mit der Steigung eins: $f(x) = x$, auch als Winkelhalbierende bezeichnet. Verläuft die Linie in größerer Distanz zur Winkelhalbierenden, so sind die Daten nicht homogen. Folglich muss es das Ziel des Homogenitätstests sein, eine Linie zu konstruieren, die nahe an der Winkelhalbierenden verläuft (SEARCY/HARDISON 1960).

Trendanalysen an der Klimastation Fürstenberg

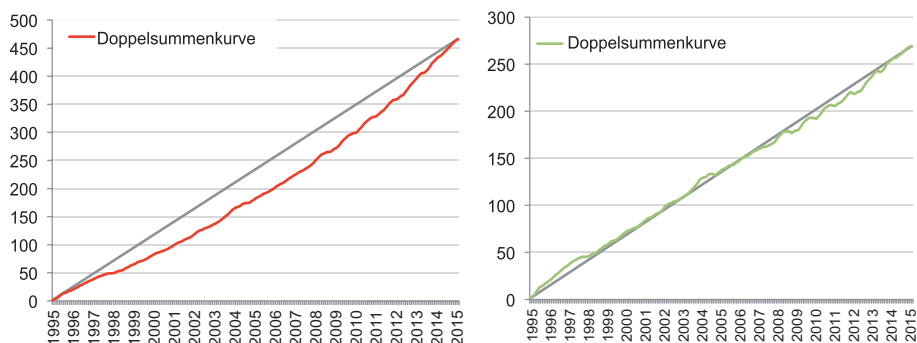


Bild 5: Vergleich der Doppelsummenkurven der Erdbodentemperatur in 10 cm Tiefe vor der Korrektur (rote Kurve) und nach der Korrektur (grüne Kurve).

Nach der Durchführung des Homogenitätstests konnte bestätigt werden, dass bei allen Sensoren, egal ob die der Luft- oder Erdbodentemperaturen, lineare Inhomogenitäten festzustellen waren. Alle Messgeräte haben durchweg zu hohe Temperaturen gemessen. Der Messfehler wurde mit zunehmendem Alter der Geräte größer. Unterschiede lassen sich zwischen den einzelnen Luft- und Erdbodentemperaturen dennoch erkennen. So sind es vor allem die Sensoren der oberflächennahen Lufttemperatur und der Bodentiefe 10 cm und 50 cm, deren Inhomogenitäten am größten sind.

Durch die Korrektur der einzelnen Zeitreihen konnten neue, korrekte Monatsmittelwerte berechnet werden. Den höchsten Korrekturfaktor erzielte dabei die Zeitreihe in 50 cm Tiefe von rund 1,91°C.

Bestätigt werden die Ergebnisse des Homogenitätstests durch die Ergebnisse der Doppelsummenanalyse. Auch hier zeigen alle homogenisierten Zeitreihen ein besseres Ergebnis auf als die nicht korrigierten Daten. **Bild 5** verdeutlicht die Aussage anhand des Beispiels der Zeitreihe in 10 cm Bodentiefe. Es ist deutlich zu erkennen, dass die grüne Linie (homogenisierte Zeitreihe) näher an der Winkelhalbierenden verläuft als die rote Linie (noch nicht homogenisierte Zeitreihe).

Ergebnisse der Trendanalysen in den Luft- und Erdbodentemperatur-Zeitreihen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Datenhomogenisierung können die Trendanalysen der Luft- und Erdbodentemperatur-Zeitreihen durchgeführt werden. Sie dienen zur Untersuchung von Temperaturveränderungen, die von linearen langfristigen Veränderungen des mittleren Temperaturniveaus der Zeitreihe ausgehen (SCHLITGEN/STREITBERGER 1999). Unter dem Begriff der Trendanalyse versteht man also eine Korrelation der Daten mit der Zeit (SCHÖNWIESE 2013a). Ein linearer Trend wird immer mit der Geradengleichung $y = ax + b$ angegeben, wobei „a“ die Steigung und „b“ der y-Achsenabschnitt darstellt. Bei der Erstellung von Trendlinien kann diese Geradengleichung und das Bestimmtheitsmaß ange-

TRV	Irrtumswahrscheinlichkeit	Bedeutung	Symbol
< 1	> 31,7 %	nicht signifikant	n.s.
> 1	< 31,7 %	schwach signifikant	(*)
> 1,282	< 20 %	signifikant	*
> 1,645	< 10 %	sehr signifikant	**
> 2,578	< 1 %	hoch signifikant	***

Bild 6: Zuordnung von Signifikanzen und deren Symbole zu den Werten des Trend-Rausch-Verhältnisses.

geben werden. Zur Überprüfung der Signifikanz eines Temperaturtrends dient das sogenannte Trend-Rausch-Verhältnis. Voraussetzung hierfür ist die Annahme einer Normalverteilung der Daten, die durch die Mittelung zu Monatswerten gewährleistet ist. Berechnet wurden in diesem Falle die Trends und deren Signifikanzen für die verschiedenen Luft- und Erdbodentemperaturen in allen Monaten gemäß der Formel des dimensionslosen Trend-Rausch-Verhältnisses (TRV):

$$\text{TRV} = T / s$$

Gemäß der Formel ist T der Betrag des absoluten Trends. Er entspricht der Differenz des tiefsten und höchsten Wertes der Trendlinie. Geteilt wird der Betrag durch die Standardabweichung s der betrachteten Zeitreihe. Sie gibt die mittlere Abweichung der einzelnen Werte der Trendgeraden an. Dieses Trend-Rausch-Verhältnis bestimmt auch die Signifikanz eines Trends. Mit Hilfe der Standardnormalverteilung lassen sich dem TRV bestimmte Signifikanzbereiche mit entsprechender Irrtumswahrscheinlichkeit zuordnen, die in **Bild 6** aufgelistet sind (BÖHME 2011).

Die WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION (WMO) empfiehlt für die Trendanalyse einen Beobachtungszeitraum von mindestens 30 Jahren, da in dieser Zeitspanne klimatische Charakteristika gut herausgearbeitet werden können. In dieser Arbeit reichen die Daten maximal 20 Jahre in die Vergangenheit zurück. Dennoch wurde eine Trendanalyse durchgeführt, um etwaige Trends abschätzen zu können.

Trends der Temperaturen in jährlicher Auflösung

In Fürstenberg hat sich im Zeitraum von 1995 bis 2008 die Lufttemperatur signifikant um fast genau 1°C erhöht. Dabei ergeben sich jedoch durch die relativ kurze Zeitreihe der Lufttemperatur Einschränkungen in der Aussagekraft dieses Wertes. Als Beispiel hierfür dient ein Vergleich der Temperaturen unterschiedlicher Zeiträume. FRANKENBERG/SIEGMUND publizierten bereits im Jahr 1996 in den *Schriften des Vereins für Geschichte und Naturgeschichte der Baar* erste

Ergebnisse der Station Fürstenberg. Damals wurde der Zeitraum 1990 bis 1994 untersucht und eine Jahresdurchschnittstemperatur der Luft von $7,9^{\circ}\text{C}$ festgestellt. Im Vergleich dazu beträgt die durchschnittliche Lufttemperatur des Zeitraums 2004 bis 2008 $7,8^{\circ}\text{C}$. In der von FRANKENBERG/SIEGMUND betrachteten Periode waren der August mit durchschnittlich $17,5^{\circ}\text{C}$ der wärmste und der Januar mit im Schnitt $-0,1^{\circ}\text{C}$ der kälteste Monat. In der Zeitspanne von 2004 bis 2008 war der wärmste Monat der Juli mit einer Durchschnittstemperatur der Luft von knapp 17°C . In dieser Periode war der Dezember mit $-0,9^{\circ}\text{C}$ der kälteste Monat. Trotz der niedrigeren Lufttemperaturen in der Periode 2004 bis 2008 gab es deutlich extremere Werte über das Jahr hinweg verteilt. Die Spanne reichte im Zeitraum von 1990 bis 1994 von $-2,5^{\circ}\text{C}$ bis $19,3^{\circ}\text{C}$. Im zuletzt untersuchten Zeitraum reichte die Spannweite von durchschnittlich $-4,1^{\circ}\text{C}$ im Januar 2006 bis $20,4^{\circ}\text{C}$ im Juli 2006. Hinzu kommt eine höhere Standardabweichung in den dargestellten Monaten.

Ein differenzierteres und belastbareres Bild ergibt sich bei den Erdbodentemperaturen. Hier konnten die Zeitreihen 1995 bis 2014 analysiert werden. Dabei ist festzustellen, dass der Anstieg der Erdbodentemperaturen in allen Tiefen, im Gegensatz zur Lufttemperatur, nicht signifikant ist. Außerdem sind die absoluten Trends deutlich geringer, jedoch allesamt positiv. Im vertikalen Profil ist eine nahezu kontinuierliche Abnahme der Trends mit der Tiefe zu erkennen. Mit einer Zunahme um $0,53^{\circ}\text{C}$ weist die Temperatur in 2 cm Tiefe noch die größte Veränderung auf. Die Temperaturänderungen nehmen bis in die Tiefe von 20 cm stetig ab, wo die Temperaturzunahme auf $0,1^{\circ}\text{C}$ innerhalb der letzten 20 Jahre begrenzt ist. Lediglich am Sensor in 50 cm Bodentiefe ist der Trend mit $0,29^{\circ}\text{C}$ nennenswert. Alle darunter liegenden Sensoren zeigen geringere Temperaturunterschiede im Zeitraum von 1995 bis 2014.

Auch bei den Erdbodentemperaturen ist ein Vergleich der Zeiträume möglich. Dabei wird die Periode 1990 bis 1994 mit der Periode 2010 bis 2014 verglichen. Im erstgenannten Zeitraum lag die jahresdurchschnittliche Erdbodentemperatur in 50 cm Tiefe bei $10,1^{\circ}\text{C}$. Am Anfang dieses Jahrzehnts lag dieser Wert in derselben Tiefe um rund 1°C höher. In 200 cm Tiefe ist die Jahresdurchschnittstemperatur in der Periode 2010 bis 2014 um $0,2^{\circ}\text{C}$ höher als noch 1990 bis 1994. Dieser Wert ist hoch einzustufen, da die Standardabweichung aufgrund der „Low-Pass-Filter“-Wirkung des Bodens in dieser Tiefe ungefähr $0,25^{\circ}\text{C}$ beträgt. Ähnlich der jährlichen Spannweite der Lufttemperaturen verhält es sich mit den Erdbodentemperaturen. So beträgt die Jahresamplitude im Jahr 2011 $10,5^{\circ}\text{C}$, wohingegen sie im Zeitraum 1990 bis 1994 nur $8,3^{\circ}\text{C}$ betrug.

Trotz der insgesamt relativ geringen Temperaturänderungen darf nicht vergessen werden, dass es sich um einen Beobachtungszeitraum von maximal 20 Jahren handelt. Würde man die Werte auf eine längere Periode umrechnen, so ist das Klimasignal deutlich größer als der bisher zu beobachtende Temperaturtrend. So würde beispielsweise die Erdbodentemperaturänderung in 2 cm Tiefe, hochgerechnet auf eine 100-jährige Periode, $2,65^{\circ}\text{C}$ betragen.

Entwicklung der Erdbodentemperaturen auf der Baar

Sensor	Merkmal	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lufttemperatur	Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	abs. Trend (°C)	0,37	-0,98	-0,54	2,38	1,23	1,89	0,73	-0,61	2	0,1	1,47	0,39
2 cm	Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	(*)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	*	n.s.
	abs. Trend (°C)	1,14	-0,31	0,12	1,38	-0,88	-0,03	0,67	0	1,87	-0,22	1,23	0,32
20 cm	Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	(*)	n.s.	n.s.	(*)	n.s.	(*)	n.s.	**	n.s.
	abs. Trend (°C)	0,42	-0,58	-0,33	1,11	-0,23	0,18	1,11	-0,2	1,43	0,81	1,54	0,49
50 cm	Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	abs. Trend (°C)	0,45	0,01	-0,05	1,41	0,42	0,6	1,48	0,34	1,08	0,75	0,77	0,53
200 cm	Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(*)	*	*	*	n.s.	n.s.
	abs. Trend (°C)	0,34	0,19	-0,22	-0,38	0,28	0,87	1,12	0,94	0,64	0,83	0,86	1,05

Bild 7: Signifikanzen und absolute Trends der Temperaturen ausgewählter Sensoren der Station Fürstenberg.

Trends in monatlicher Auflösung

Neben den jährlichen Zeitreihen wurden Trendanalysen auch auf kleiner zeitlicher Skala der Monate durchgeführt. So werden jahreszeitlich differenzierte Trends der Temperaturentwicklung deutlich. Auffallend sind unterschiedliche Signifikanzen bei gleichem Trend. Verursacht wird das durch die Unterschiede in den Standardabweichungen.

Die in **Bild 7** dargestellten monatlichen Temperaturtrends und deren Signifikanzen ergeben kein einheitliches Bild. Einige Auffälligkeiten lassen sich dennoch erkennen. So sind die absoluten Trends bei der Lufttemperatur erwartungsgemäß am größten, wohingegen die Trends in 200 cm Bodentiefe am geringsten sind. Die Signifikanzen der absoluten Trends nehmen jedoch mit der Tiefe zu. Zwar sind auch in 200 cm Tiefe nur wenige Monate mit einem signifikanten Trend zu verzeichnen, dennoch ist der TRV-Wert der nicht signifikanten Trends in derselben Tiefe relativ hoch im Vergleich zu den Trends der Lufttemperatur.

Die größten absoluten Trends sind im April und September an fast allen Sensoren festzustellen. In diesen Monaten hat sich die Lufttemperatur im Zeitraum von 1995 bis 2008 um mehr als 2°C erhöht. Besonders bemerkenswert ist die Änderung der Erdbodentemperatur bei 50 cm Tiefe im April. Hier beträgt der positive Trend 1,41°C. In 2 Meter Tiefe wird der ansonsten das Jahr über stark positive und signifikante Trend in sein Gegenteil verkehrt. Dort hat in einem zwanzigjährigen Zeitraum die Temperatur um 0,38°C abgenommen.

Die Monate mit den geringsten absoluten Trends liegen zeitlich unmittelbar vor den Monaten mit den größten Temperaturveränderungen. In den Monaten Februar, März und August sind die meisten Trends sogar negativ, das heißt es ist tendenziell eher kälter geworden. Der stärkste Temperaturrückgang ist mit -0,98°C auch bei der Lufttemperatur im Februar zu verzeichnen.

Vergleicht man die Signifikanzen der Monate April und September mit denen der Monate Februar, März und August, so ist erkennbar, dass starke positive Temperaturänderungen signifikanter sind als die rückläufigen oder jene mit geringen Trends. Somit ist es unsicher, ob es tatsächlich eine Abkühlung in diesen Monaten gab.

Regionaler und überregionaler Vergleich der Trends

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse müssen abschließend regional und überregional verglichen werden, damit sie eingehend beurteilt und abgesichert werden können. Die DWD-Station Klippeneck dient aufgrund ihrer vollständigen Zeitreihe zum regionalen Vergleich. Für die überregionale Betrachtung wird die DWD-Station Potsdam herangezogen. Trotz der länger währenden Zeitreihen der Lufttemperaturen beider Stationen werden diese aufgrund der Vergleichbarkeit zur Station Fürstenberg (a) nur bis 2008 betrachtet.

Die Änderung der Lufttemperatur in Fürstenberg ist mit 1°C etwas höher als auf dem Klippeneck. Dort beträgt der Anstieg im Zeitraum 1995 bis 2008 $0,84^{\circ}\text{C}$. Der Temperaturanstieg auf der Baar ist zu vergleichen mit dem der Station Potsdam, wo er 1°C beträgt. Gut zu sehen sind die jeweiligen Trends in **Bild 8**. Über das gesamte Bundesgebiet gemittelt ergibt sich im Zeitraum 1995 bis 2008 ein Anstieg von ebenfalls rund 1°C . Demnach liegt die Baar im bundesweiten Mittel und zeigt bei der Lufttemperatur keine Auffälligkeiten.

In der Bodentiefe von 20 cm sind die regionalen Unterschiede deutlicher ausgeprägt als bei der Lufttemperatur. So stieg die Erdbodentemperatur in besagter Tiefe auf dem Klippeneck um $0,8^{\circ}\text{C}$ an, wohingegen es in Fürstenberg (a) nur eine leichte Erhöhung um gerade einmal $0,1^{\circ}\text{C}$ gab. Hier ist der Anstieg der Erdbodentemperaturen auf der Baar im überregionalen Vergleich relativ gering. In Potsdam beträgt die positive Temperaturveränderung $1,39^{\circ}\text{C}$. Ähnlich verhält es sich auch in der Tiefe von 50 cm. Abermals weist die Station Fürstenberg (a) den geringsten absoluten Trend von $0,29^{\circ}\text{C}$ auf. Mit einem Anstieg von $0,62^{\circ}\text{C}$ innerhalb von 20 Jahren hat sich der Boden auf dem Klippeneck stärker erwärmt

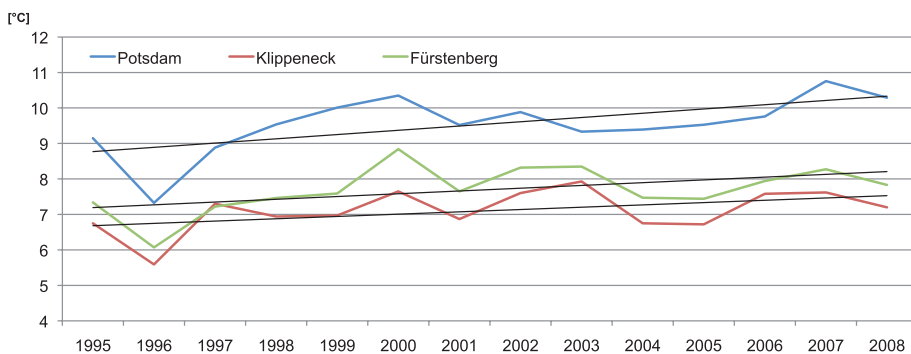


Bild 8: Vergleich der Lufttemperatur-Zeitreihen der Stationen Potsdam, Klippeneck und Fürstenberg im Zeitraum von 1995–2008.

Entwicklung der Erdbodentemperaturen auf der Baar

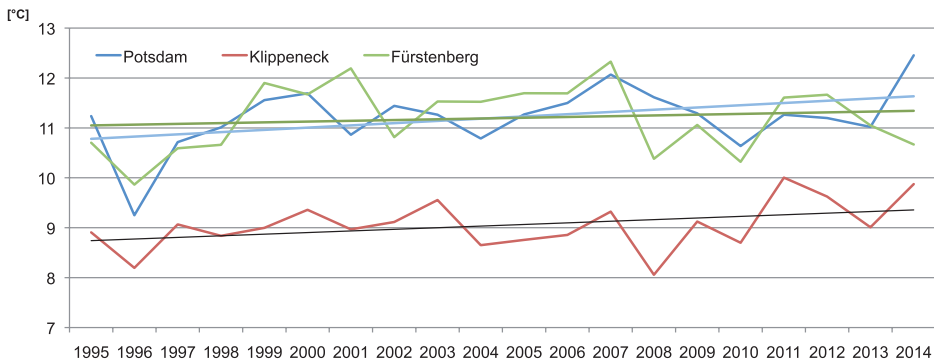


Bild 9: Vergleich der Erdbodentemperatur-Zeitreihen in 50 cm Tiefe der Stationen Potsdam, Klippeneck und Fürstenberg im Zeitraum von 1995–2014.

als in Fürstenberg. Die Baar weist auch in dieser Bodentiefe geringere Temperaturänderungen als Potsdam auf, wo die Erwärmung rund $0,85^{\circ}\text{C}$ beträgt (Bild 9).

Auffälligkeiten der Temperaturentwicklung auf der Baar – ein Fazit

Aus den vorgestellten Ergebnissen lassen sich einige Schlüsse über die Temperaturentwicklung auf der Baar ziehen. Im bundesweiten Durchschnitt ist die Baar eine Region mit einem über die Jahre 1995 bis 2008 gemittelten, für Deutschland normalen Temperaturanstieg der Luft.

Wie der Vergleich der Lufttemperatur der Zeiträume 1990 bis 1994 und 2004 bis 2008 gezeigt hat, kann es vorkommen, dass jüngere Perioden nicht unbedingt wärmer sein müssen als vergangene, obwohl der generelle Trend eine Erwärmung andeutet. Dies liegt daran, dass durch natürliche Klimaschwankungen einzelne Perioden innerhalb eines längeren Trends über oder unter den Durchschnittswerten liegen können. Daher sind für finale Aussagen über langfristige Trends noch längere Zeitreihen nötig, die sich an der Klimastation Fürstenberg bisher auf 20 Jahre beschränken.

Typisch für den Klimawandel in den mittleren Breiten ist eine Zunahme von Temperaturextremen, wodurch auch in Zukunft mit einer größeren Amplitude der Temperaturen im Jahresverlauf gerechnet werden muss. Heiße Sommertage werden häufiger und heißer als bisher. Kalte Wintertage nehmen zwar ab, dennoch treten auch in Zukunft noch sehr kalte Temperaturen auf. An der Station Fürstenberg lässt sich die Vergrößerung der Jahresamplitude, also das Auftreten neuer Temperaturextreme, nachweisen. Der kälteste Monat der Lufttemperatur des Zeitraums 2004 bis 2008 löste den des letzten Zeitraums 1990 bis 1994 ab. Damals war es der Februar 1991 mit $-2,5^{\circ}\text{C}$, der den kältesten Monat der Periode markierte. Zwischen 2004 bis 2008 war es der Januar 2006 mit $-4,1^{\circ}\text{C}$. Er war damit rund $1,6^{\circ}\text{C}$ kälter. Der heißeste Monat war in der jüngeren Periode um $1,1^{\circ}\text{C}$ wärmer als 1990 bis 1994. Hier war es der Juli 2006 mit $20,4^{\circ}\text{C}$.

Die jährlichen Trends der Erdbodentemperaturen zeigen, dass in jeder Bodentiefe eine Erwärmung zu beobachten ist, nicht aber bei Betrachtung der monatlichen Trends. So sind vor allem die Monate Februar, März und August von einem rückläufigen Trend betroffen, während die Frühlings- und Herbstmonate deutlich positive Temperaturveränderungen zeigen. Eine klare Aussage über die Stärke der Trends in Abhängigkeit von der Bodentiefe ist nicht möglich. Es ist lediglich zu beobachten, dass die absoluten Trends in größerer Bodentiefe geringer sind als die nahe der Bodenoberfläche.

Die Untersuchungen zu den Trends der Luft- und Erdbodentemperaturen im untersuchten Zeitraum von 1994 bis 2008 und bis 2015 machen auch auf der Baar einen Klimawandel deutlich sichtbar. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind dabei aufgrund der bisher noch beschränkten Länge der Zeitreihen nur als erste Tendenz anzusehen. Um exakte Aussagen treffen zu können, bedarf es längerer Zeitreihen. Deshalb ist es notwendig, die Aufzeichnung an der Station Fürstenberg weiterzuführen. Diese Studie hat vor allem auch gezeigt, dass es möglich ist, durch entsprechende statistische Methoden auch mit unvollständigen Datensätzen Zeitreihenanalysen durchzuführen. Darüber hinaus hat die Studie mit ihrer Methodik zur Datenhomogenisierung bewiesen, dass nicht nur die gängigsten der in der Literatur verwendeten Methoden zum Ziel führen können, sondern auch einfachere Verfahren zu guten Ergebnissen kommen.

Die eingangs erwähnte Vermutung, dass die Erdbodentemperatur ein besserer Indikator für den Klimawandel sei als die Lufttemperatur, kann in dieser Studie nicht eindeutig bestätigt werden. Dafür sind die Signifikanzen der Temperaturtrends in größerer Tiefe zu gering. Das liegt aber vor allem an den recht kurzen Zeitreihen an der Klimastation Fürstenberg von etwa 20 Jahren. Durch die geringe Anzahl an Werten fallen Ausreißer bei der Berechnung der Standardabweichung stärker ins Gewicht. Die Erhöhung der Lufttemperaturen und der Erdbodentemperaturen auf der Baar ist dennoch deutlich.

Autoren

TOBIAS LENHART

Jahrgang 1993, absolvierte seinen Bachelor of Science im Fach Geographie mit dem Schwerpunkt Geowissenschaften an der Universität Heidelberg. Zur Zeit studiert er Umweltp lanung und Ingenieurökologie (MSc.) an der TU München mit den Kernbereichen Geoinformationssysteme, Climate Change und Bodenschutz. Nebenbei arbeitet er dort als studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Bodenkunde.

Tobias Lenhart · Am Steinlech 31
84036 Landshut · tobi.ft@hotmail.de

PROF. DR. ALEXANDER SIEGMUND

ist geboren in Hüfingen, aufgewachsen in Fürstenberg und hat sein Abitur am Fürstenberg-

Gymnasium in Donaueschingen absolviert.

Nach dem Studium in Mannheim und Zwischenstation in Karlsruhe ist er seit 2004 Professor für Physische Geographie und ihre Didaktik an der Pädagogischen Hochschule in Heidelberg und Honorarprofessor an der Universität Heidelberg. In zahlreichen Publikationen hat er sich unter anderem auch mit dem speziellen Klima auf der Baar befasst. Seine Forschungsaktivitäten als Leiter verschiedener nationaler und internationaler Projekte führten ihn nahezu auf alle Kontinente unserer Erde.

Prof. Dr. Alexander Siegmund
Pädagogische Hochschule Heidelberg und
Universität Heidelberg, Abteilung Geographie –
Research Group for Earth Observation (rgeo)
Cernyring 22 / 11–12 · 69115 Heidelberg
siegmund@ph-heidelberg.de

Literatur

- AGUILAR, E. et al. (2003): Guidelines on climate metadata and homogenization. World Meteorological Organisation.
- ALEXANDERSSON, H. / MOBERG, A. (1997): Homogenization of swedish temperature data. Part 1: Homogeneity Test for linear trends. In: International Journal of Climatology, 17 (Seite 25–34).
- BEHRENDT, J. / ZIMMERMANN, K. (2008): Qualitätskontrolle historischer Daten. In: Deutscher Wetterdienst (Hg.): Klimastatusbericht 2008. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main.
- BÖHME, M. (2011): Statistische Aufarbeitung der Bodentemperaturreihen der Säkularstation Potsdam. Bachelorarbeit. Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften. Leipzig.
- BRÜMMER, G. W. / BLUME, H. P. (2010): Einleitung: Böden – die Haut der Erde. In: SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg (Seite 1–6).
- BUISHAND, T. A. (1982): Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. In: Journal of Hydrology, 58 (Seite 11–27).
- DEUTSCHE METEOROLOGISCHE GESELLSCHAFT (2015): Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. zum Klimawandel. 21. September 2015.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2015 a): Klimapressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes am 10. März 2015 in Berlin. Zahlen und Fakten zum Klimawandel in Deutschland.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2015 b): Temperatur: langjährige Mittelwerte 1981. Bezugsstandort.
- FRANKENBERG, P. / SIEGMUND, A. (1996): Das Klima der Südbaar. Eine Zwischenbilanz fünfjähriger Messungen an der Klimastation Fürstenberg. In: Schriften des Vereins für Geschichte und Naturgeschichte der Baar (Band 39). Donaueschingen (Seite 59–82).
- HERZOG, J. / MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1998): Homogenitätsprüfung und Homogenisierung klimatologischer Meßreihen im Deutschen Wetterdienst (= Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Band 202). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014): Climate Change 2014. Synthesis Report. Summary for Policymakers. Genf.
- LÜERS, J. et al. (2014): 160 Jahre Bayreuther Klimazeitreihe. Homogenisierung der Bayreuther Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten. Arbeitsergebnisse der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth (Band 56).
- PAESLER, M. (1983): Homogenisierung. In: promet, 13-1/2 (Seite 3–7).
- SCHLITTEGEN, R. / STREITBERG, B. H. (1999): Zeitreihenanalyse. 8. Auflage. Oldenbourg Verlag. München / Wien.
- SCHÖNWIESE, C. D. (2013 a): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 5. Auflage. Gebrüder Borntraeger. Berlin / Stuttgart.
- SEARCY, J. K. / HARDISON, C. H. (1960): Double-Mass Curves. In: Manual of Hydrology, Part 1 (Seite 31–66).
- SIEGMUND, A. (1999): Das Klima der Baar. Regionalklimatische Studien einer Hochmulde zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb (= Mannheimer Geographische Studien, Band 51). Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Mannheim.

Datengrundlage

- Deutscher Wetterdienst (2015): Stationsdaten. Online unter: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/> [zuletzt abgerufen am 25.10.2016].