

Kurzberichte

Homogenisierung der Säkularreihe der Jahresmitteltemperaturen von Bremen

H.-J. HEINEMANN, Bremen

Zusammenfassung. Am Beispiel der Säkularreihe der Jahresmitteltemperaturen von Bremen wird gezeigt, daß enthaltene Inhomogenitäten — insbesondere verursacht durch Stationsverlegungen — zu erheblichen Verfälschungen bei Aussagen über Klimatrends oder Klimaschwankungen führen. Dies trifft insbesondere auf zwei Verlegungen der Beobachtungsstation in diesem Jahrhundert — 1935/36 und 1978 — zu, die durch mehrjährige Parallelmessungen gut dokumentiert sind. Es wird deutlich, daß das gleichbleibende Temperaturniveau in der Originalreihe seit Ende der zwanziger Jahre mit großer Sicherheit auf diese Verlegungen zurückzuführen ist. In der homogenisierten Version zeigt die Bremer Temperaturreihe einen deutlichen Anstieg um ca. 1 Kelvin in den letzten 100 Jahren.

Homogenization of the centennial time series of annual mean temperatures of Bremen

Summary. The secular record of annual mean temperatures of Bremen shows that inhomogeneities — especially caused by station transfers — lead to serious problems concerning the interpretation of climatic trends or fluctuations. Especially two transfers of the meteorological observing station in Bremen within our century — 1935/36 and 1978 — caused significant inhomogeneities, well documented by parallel measurements for several years. Obviously the stagnation of the temperature level of the original data set is a result of these transfers. The homogenized record version reveals a significant warming trend of about 1 Kelvin within the last century.

1. Einleitung

Vor jeder Analyse von langen klimatologischen Zeitreihen ist als zentrales Problem die Frage nach der Homogenität zu lösen. Die häufig vorhandenen Inhomogenitäten können die unterschiedlichsten Ursachen haben. Zur Hauptsache handelt es sich um

- Änderungen der Meßgeräte und -methoden
- Stationsverlegungen
- Beobachterwechsel
- Änderungen der Auswertverfahren bzw. der Mittelbildung
- Veränderungen in der Stationsumgebung
- Stadtklima-Effekte

Nur wenn Inhomogenitäten erkannt und beseitigt werden, ist eine aussagekräftige statistische Aufbereitung und Interpretation einer Zeitreihe sinnvoll.

Zur Beseitigung von Inhomogenitäten ist zunächst eine möglichst lückenlose Dokumentation der Stationsgeschichte erforderlich. Als Hilfen zur Feststellung von Inhomogenitäten dienen geeignete Homogenitätstests, wie z. B. bei SCULTETUS (1969) und SCHÖNWIESE (1985) beschrieben.

Der erfolgversprechendste Ansatz zur Beseitigung von Unstetigkeiten liegt jedoch in der Durchführung ausreichend langer Parallelmessungen. Dies setzt natürlich Vermutungen bezüglich zu befürchtender Inhomogenitäten voraus, welche insbesondere

bei Stationsverlegungen allerdings immer erwartet werden sollten. Mit Hilfe von Parallelmessungen sind nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen zu auftretenden Reihenbrüchen gegeben.

2. Stationsgeschichte

Eine ausführliche Würdigung der Geschichte meteorologischer Beobachtungen in Bremen findet sich bei BERGHOLZ (1891) sowie bei BÄTJER und HEINEMANN (1980, 1983), eine tabellarische Zusammenstellung nochmals bei MÜLLER-WESTERMEIER (1992). Wichtig bleibt in diesem Zusammenhang festzuhalten, daß sich die gesamte Reihe im wesentlichen aus drei zusammenhängenden standortbezogenen Blöcken zusammensetzt, und zwar

- 1829 bis 1873 Privatstation Heineken/Toel
- 1895 bis 1935 Meteorologisches Observatorium, Hafenhafen-Freihafen
- 1936 bis heute Flughafen, Neuenlander Feld

1978 interne Verlegung zum Landebahnhaus

Damit sind die wesentlichen Zeitabschnitte dieser über 160jährigen Zeitreihe genannt. Lediglich von 1874 bis 1895 und in der Nachkriegszeit — 1945 bis 1949 — sind häufigere Verlegungen des Stationsstandortes zu verzeichnen und damit stärkere Probleme in bezug auf die Homogenität zu vermuten.

Bei weiterem Detailstudium der Stationsgeschichte läßt sich für die vorgenannten Hauptabschnitte der größte Teil der einleitend beschriebenen Inhomogenitätskriterien eliminieren.

Damit reduziert sich das Problem einer Reduktion auf den derzeitigen Stationsort im wesentlichen auf diese Bruch- bzw. Übergangsstellen, wobei die Verlegung vom Freihafen zum Flughafen im Januar 1936 und die Inbetriebnahme eines Landebahnbeobachtungshauses im Juni 1978 durch fünf- bzw. vierjährige Parallelmessungen abgesichert werden konnten.

Nicht außer Acht gelassen werden darf natürlich der Stadtklimaeinfluß (KARL und JONES 1989). Bremen ist auf Grund seiner geographischen Lage — angesiedelt rund 90 Kilometer von der Nordsee entfernt inmitten der norddeutschen Tiefebene und im Urstromtal der Weser — sowie durch seine städtische Ausrichtung entlang des Stromes quer zur Hauptwindrichtung (Südwest) in bezug auf stadtklimatische Effekte — Wärmeinsel — bevorzugt. Ein DWD-internes Forschungsprojekt aus dem Jahre 1987 (BÄTJER et al., unveröffentlicht) hat auch für Bremen eindeutige Stadtklima-Effekte nachgewiesen.

Man kann aufgrund dieser Untersuchung davon ausgehen, daß insbesondere der aktuelle Standort beim Landebahnbeobachtungshaus auf dem Flughafen Bremen weitgehend von stadtklimatischen Auswirkungen unbeeinflusst ist und damit nahezu ungestört die Verhältnisse im freien Umland repräsentiert.

Beim Übergang vom Freihafen zum Flughafen scheinen neben der Bebauung und Versiegelung großer Flächen auch die nahe Weser sowie die Hafenbecken des Freihafens wichtige Einflußgrößen gewesen zu sein, wie es die Parallelmessungen (Tab. 1) dokumentieren. Wasserflächen wirken im allgemeinen ausgleichend, nachts und besonders im Winterhalbjahr teilweise auch als Wärmequelle.

Man kann deshalb wohl ohne Bedenken diese Stationslage mit den mehr als vierzig Jahren der Privatstation Heineken in der Altstadt von Bremen (Am Wall/Fensterhütte nach Norden) vergleichen.

Selbstverständlich ist die Stadt Bremen seit Anfang des vorigen Jahrhunderts erheblich gewachsen, d. h. der anthropogene Einfluß auf meteorologische Messungen hat ganz ohne Frage

Tabelle 1. Differenzen bei Monats- und Jahresmitteltemperaturen [K], ermittelt durch Parallelmessungen.

A. BREMEN-Flughafen - BREMEN-Hafen (ehem. Observatorium) 1936 bis 1940 - nach REIDAT -													
B. BREMEN-Flughafen (Landebahnhaus) - BREMEN-Flughafen (alt) VI/1978 bis V/1982 - nach HEINEMANN													
	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
A	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-0,4	-0,3	-0,3	-0,5	-0,5
B	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-0,7	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,3	-0,5

zugenommen. Man darf allerdings dabei nicht übersehen, daß die wesentlichen Entwicklungen in dieser Richtung ohne Zweifel auf dieses Jahrhundert und insbesondere auf die zweite Hälfte entfallen. Während dieser Zeit war die meteorologische Station bereits am Flughafen, so daß stadtklimatisch ausgelöste Temperatureffekte nur noch zu sehr geringem Teil auf die Reihe der Jahresmitteltemperaturen durchschlagen konnten.

Bei sorgfältiger und eher konservativer Abschätzung ergibt sich für die Bremer Temperaturreihe ein durch den städtischen Wärmeinsel-Einfluß verursachter Erwärmungseffekt von 0,1 bis maximal 0,3 K in den letzten 100 Jahren.

3. Homogenisierung

Aus der Literatur (MALCHER und SCHÖNWIESE 1985, 1987; SCHÖNWIESE 1985; SCULTETUS 1969) sind eine Reihe von Verfahren und Tests zur Prüfung der Homogenität von Zeitreihen bekannt. Dabei wird zwischen absoluten und relativen Tests unterschieden. Die absoluten Testverfahren stützen sich nur auf die zu untersuchende Reihe selbst, die relativen benötigen eine oder besser mehrere homogene und möglichst eng korrelierte Referenzreihen. Diese sind jedoch meist nur äußerst schwierig zu erhalten.

Für diese Untersuchung konnten durch Prof. SCHÖNWIESE sowie von seiten des DWD die Reihen von Hamburg, Berlin, Hannover, Münster und Kassel herangezogen werden. Dabei bleibt allerdings schon vorab festzuhalten, daß alle diese betrachteten langen Reihen ebenfalls Inhomogenitäten aufweisen, so daß ein Abstützen nur auf diese Daten sicher zu erheblichen Fehlern geführt hätte.

Zunächst wurde die Bremer Reihe daher mit Hilfe eines absoluten Homogenitätstestes untersucht. Es wurde dabei auf das ABBESche Homogenitätskriterium (SCULTETUS 1969) zurückgegriffen, da bei diesem neben den Vorzeichen der Abweichungen $\hat{a}_i(t_i)$ vom Mittelwert $\bar{a}(t)$ auch die Beträge dieser Abweichungen \hat{a}_i eingehen.

Das ABBESche Kriterium

$$1 - \frac{1}{\sqrt{n-1}} \leq \frac{2A}{B} \leq 1 + \frac{1}{\sqrt{n-1}}$$

sollte bei Homogenität erfüllt sein. Dabei ist

$$A = \sum \hat{a}_i - \frac{\hat{a}_1^2 + \hat{a}_n^2}{2}$$

und

$$B = \sum (\hat{a}_i - \hat{a}_{i+1})^2$$

mit $(i = 1, \dots, n)$

Es zeigt sich erwartungsgemäß, daß die Gesamtreihe das ABBESche Kriterium nicht erfüllt. Dies ist ein Hinweis auf Inhomogenität. Dabei darf aber nicht übersehen werden, daß dieses Kriterium überkritisch sein kann, da die untersuchte Reihe auch bei vorhandenen relativ ausgeprägten langfristigen Schwan-

kungsanteilen natürlichen Ursprungs als inhomogen bewertet wird. Dieser Effekt kann jedoch durch geeignete Hochpaßfilterung vermieden werden.

Anschließend an das Gesamtkollektiv wurden die im Abschnitt 2 beschriebenen Abschnitte mit gleicher Stationslage getestet. Es ergab sich Homogenität für die Privatstation Heinen/Toel (1829–1873) und die Observatorium-Reihe (1896–1935). Die Teilreihe Flughafen ergab Inhomogenität. Dieses Ergebnis läßt sich entweder auf einen längerfristigen Trend oder auf schleichende Einflüsse durch zunehmende Bebauung in der Stationsumgebung zurückführen. Die Stationsgeschichte und die Kenntnisse des Autors lassen den zweiten Gesichtspunkt als signifikante Ursache vermuten.

Als nächster Schritt wurde jetzt mit Hilfe der vorliegenden Parallelmessungen (Tab. 1) eine Reduktion der Teilreihe von 1895 bis heute vorgenommen. Danach wurde versucht, diesen „first-guess“ mit den vorliegenden Reihen benachbarter Stationen abzugleichen. Hierbei ergaben sich häufig Schwierigkeiten, da schnell deutlich wurde, daß diese Reihen ebenfalls eine Reihe von Inhomogenitäten aufweisen. In Zweifelsfällen wurde immer den Parallelmessungen der Vorzug gegeben, was sicherlich auch wissenschaftlich vertretbar ist.

Der Anschluß der Teilreihe von 1829 bis 1895, also aus dem vorigen Jahrhundert, steht naturgemäß wissenschaftlich auf wesentlich schwächeren Füßen als der übrige Teil. Parallelmessungen fehlen, die älteren Reihen der Referenzorte sind ebenfalls von deutlich geringerer Qualität als die Daten aus diesem Jahrhundert und unsere Kenntnisse über Art und Ort dieser Messungen sind nur noch rudimentär. Da jedoch die Bremer Reihe glücklicherweise über 40 Jahre an einem Ort lag und von einem Beobachter mit konstanter Meßmethodik betreut wurde, kann dieser Abschnitt — wie auch der ABBE-Test ausweist — als homogen und in sich stimmig angesetzt werden. Um Fehler oder Unstimmigkeiten zu minimieren, wurde diese Teilreihe nahezu mit der Teilreihe des Observatoriums am Freihafen gleichgesetzt (Differenz 0,1 K). Die Übergangszeit mit den bekannten unterschiedlichen Stationslagen von 1874 bis 1895 wurde mit aller Vorsicht unter Zuhilfenahme der angesprochenen Referenzreihen reduziert.

Die auf diese Weise ermittelte vollständige Zeitreihe (Abb. 2) wurde erneut dem ABBESchen Homogenitätstest unterworfen und ergab nun Homogenität. Es kann also davon ausgegangen werden, daß die homogenisierte und auf den derzeitigen Standort reduzierte Reihe jetzt nur noch vernachlässigbare Fehler enthält und als aussagekräftige Datenbasis für alle aktuell anstehenden klimatologischen Fragestellungen zur Verfügung steht. Die gefundene Reihe könnte auch als relativ sichere Referenzreihe eingesetzt werden.

4. Ergebnisse

Die Originalreihe der Jahresmitteltemperaturen von Bremen seit 1829 ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei differenzierter Betrachtung zeigen sich hier einige Details, die erwähnenswert sind:

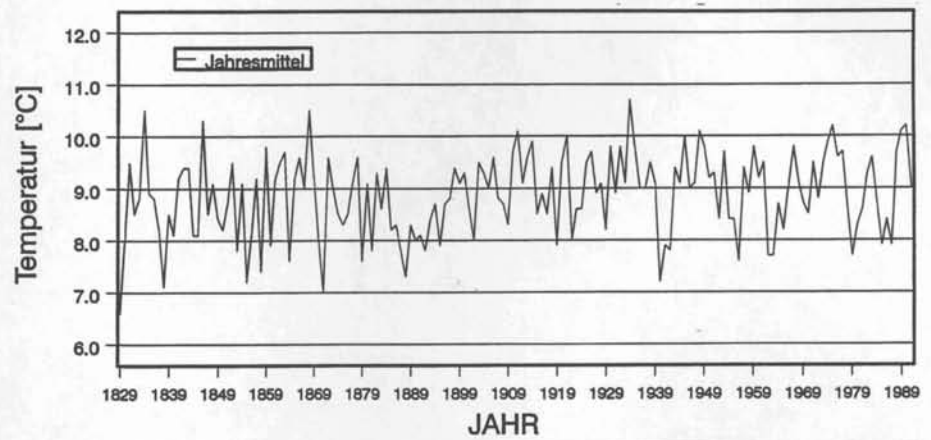


Abb. 1. Jahresmitteltemperatur [°C], Bremen, 1829 bis 1991 (Originalwerte).

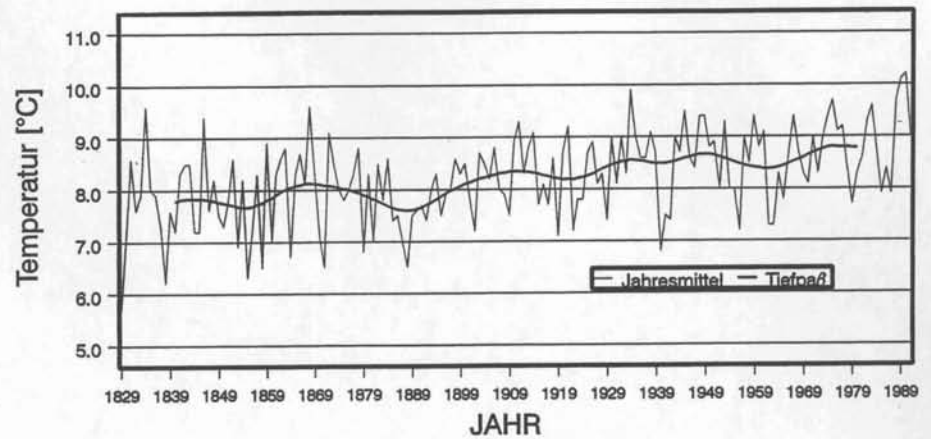


Abb. 2. Jahresmitteltemperatur [°C], Bremen, 1829 bis 1991 (homogenisiert).

- 1829 als das kälteste Jahr des Untersuchungszeitraumes mit $+6,6^{\circ}\text{C}$
- eine durchgehend relativ kalte Zehnjahresperiode zwischen 1885 und 1895 (Ausbruch des Krakatau 1883!)
- ein deutlich erkennbarer langfristiger Erwärmungstrend vom Ende des 19. Jahrhunderts bis in die dreißiger Jahre
- 1934 als das wärmste Jahr des Untersuchungszeitraums mit $+10,7^{\circ}\text{C}$
- die Kälteperiode um 1940, verursacht durch die drei extremen Kriegswinter von 1939/40 bis 1941/42
- ein anscheinend gleichbleibendes Temperaturniveau von den vierziger Jahren bis heute, allerdings auf niedrigerem Niveau als in den zwanziger und dreißiger Jahren

Insbesondere die letzte Aussage — verbunden mit dem Wissen um die Stationsverlegung zum Flughafen — war Ausgangspunkt dieser Untersuchung.

Die homogenisierte und auf den aktuellen Standort reduzierte Reihe zeigt Abbildung 2. Die statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Um Aussagen zum langfristigen Temperaturtrend abzusichern und deutlich zu machen, wurde die homogenisierte Reihe einer GAUSSschen Tiefpaßfilterung mit 23 Filtergewichten unterworfen. Durch diese Filtertechnik werden alle Schwankungsanteile mit einer Periode < 30 Jahre eliminiert. Es liegt in der Natur der Sache, daß die gefilterte Reihe kürzer als der zugrundeliegende Datensatz ist, da am Anfang und am Ende jeweils 11 Jahre fehlen, d. h. die tiefpaßgefilterte Reihe umfaßt den Zeitraum 1840 bis 1980.

Die homogene Reihe der Jahresmitteltemperaturen von Bremen verläuft bis 1935 mit nur geringen Unterschieden nahezu wie die Originalreihe, sie ist weitgehend lediglich zwecks Reduktion auf den aktuellen Standort zu insgesamt etwas niedrigerem Temperaturniveau parallelverschoben. Erst danach wirkt sich die Homogenisierung voll aus. Im Gesamtüberblick ergibt sich gegenüber der Originalreihe ein deutlich anderes, aber auch korrekteres Bild des Temperaturverlaufes in Bremen. Es zeigt

sich, daß das Temperaturniveau — ausgehend von dem kältesten Abschnitt um 1890 — auch in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts einen Erwärmungstrend — wenn auch mit Fluktuationen — beibehält. Dies wird am deutlichsten in der tiefpaßgefilterten Reihe: Ausgehend von einem Temperaturniveau um $7,8^{\circ}\text{C}$ erreicht der Temperaturtrend 1867/68 ein erstes relatives Optimum, um dann 1888 mit $7,6^{\circ}\text{C}$ das tiefste Niveau des Untersuchungszeitraumes zu erreichen. Danach folgt ein unregelmäßiger Anstieg mit relativen Maxima 1910/11 ($8,35^{\circ}\text{C}$), 1934 ($8,56^{\circ}\text{C}$), 1949 ($8,66^{\circ}\text{C}$) und 1975 ($8,80^{\circ}\text{C}$) sowie relativen Minima 1922 ($8,22^{\circ}\text{C}$), 1940 ($8,49^{\circ}\text{C}$) und 1961/62 ($8,38^{\circ}\text{C}$). Bei Betrachtung der Dezennien wird deutlich, daß insbesondere die sechziger Jahre dieses Jahrhunderts relativ kühl waren, während die siebziger und achtziger zu den wärmsten seit Beginn der Messungen gehören.

5. Schlußbemerkung

Die seit 1829 nahezu durchgehend vorliegende Reihe der Jahresmitteltemperaturen von Bremen wurde mit Hilfe der Stationsgeschichte sowie von Parallelmessungen und benachbarter Reihen homogenisiert und statistisch getestet. Die auf den aktuellen Standort reduzierte Reihe wurde tiefpaßgefiltert. Dabei konnte der aus der Literatur (SCHÖNWIESE 1979, SCHÖNWIESE et al. 1986) bekannte globale Erwärmungstrend auch für die Bremer Reihe nachgewiesen werden. Nach einem relativen Pessimum um 1888 zeigt der langfristige Trend stetig aufwärts und erreicht um 1975 einen vorläufigen Höchststand. Die Größenordnung dieser Erwärmung beträgt derzeit $1,2\text{ K}$ gegenüber 1888, bzw. $0,7\text{ K}$ gegenüber 1900. Der durch städtische Einflüsse und damit anthropogen verursachte Anteil an dieser Erwärmung kann mit $0,1$ bis maximal $0,3\text{ K}$ beziffert werden, so daß die unbeeinflusste Erwärmungsrate 1 K (bezogen auf 1888) bzw. $0,5\text{ K}$ (bezogen auf 1900) betragen dürfte.

Tabelle 2. Jahresmitteltemperatur [$^{\circ}\text{C}$], homogenisiert, Bremen, 1829–1991.

statistische Kenngrößen			
mittleres JAHRESMITTEL		8,2 $^{\circ}\text{C}$	
MEDIAN		8,3 $^{\circ}\text{C}$	
MODUS		8,6 $^{\circ}\text{C}$	
VARIANZ		0,66 K^2	
STANDARDABWEICHUNG		$\pm 0,81 \text{ K}$	
SCHIEFE		-0,5 K	
MAXIMUM		10,7 $^{\circ}\text{C}$ (1934) - Originalreihe 10,2 $^{\circ}\text{C}$ (1990) - homogen. Reihe	
MINIMUM		6,6 $^{\circ}\text{C}$ (1829) - Originalreihe 5,7 $^{\circ}\text{C}$ (1829) - homogen. Reihe	
SPANNWEITE		4,1 K - Originalreihe 4,5 K - homogen. Reihe	
Dezennien-Mittelwerte und "KLIMANORMALE"			
1831 - 1840	7,8 $^{\circ}\text{C}$		
1841 - 1850	8,0 $^{\circ}\text{C}$		
1851 - 1860	7,6 $^{\circ}\text{C}$	1841 - 1870	7,9 $^{\circ}\text{C}$
1861 - 1870	8,3 $^{\circ}\text{C}$		
1871 - 1880	8,0 $^{\circ}\text{C}$	1871 - 1900	7,9 $^{\circ}\text{C}$
1881 - 1890	7,5 $^{\circ}\text{C}$		
1891 - 1900	8,0 $^{\circ}\text{C}$		
1901 - 1910	8,2 $^{\circ}\text{C}$	1901 - 1930	8,2 $^{\circ}\text{C}$
1911 - 1920	8,3 $^{\circ}\text{C}$		
1921 - 1930	8,2 $^{\circ}\text{C}$		
1931 - 1940	8,6 $^{\circ}\text{C}$	1931 - 1960	8,6 $^{\circ}\text{C}$
1941 - 1950	8,7 $^{\circ}\text{C}$		
1951 - 1960	8,5 $^{\circ}\text{C}$		
1961 - 1970	8,3 $^{\circ}\text{C}$	1961 - 1990	8,7 $^{\circ}\text{C}$
1971 - 1980	8,8 $^{\circ}\text{C}$		
1981 - 1990	9,0 $^{\circ}\text{C}$		

Literatur

- Bätjer, D., H.-J. Heinemann, 1980: Eineinhalb Jahrhunderte meteorologische Beobachtungen in Bremen. — Abh. Naturw. Ver. Bremen 39, 185–261.
- 1983: Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland. Bremen. — Ber. d. Dt. Wetterd. 164; Eigenverlag DWD, Offenbach.
- Bergholz, P., 1891: Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen in Bremen 1803–1890. — Jb. Bremen Nr. 1.
- Karl, T. R., P. D. Jones, 1989: Urban bias in area-averaged surface air temperature trend. — Bull. Amer. Meteor. Soc. 70, 265–270.
- Malcher, J., Ch.-D. Schönwiese, 1987: Homogeneity, spatial correlation and spectral variance analysis of long European and North American air temperature records. — Theor. Appl. Climatol. 38, 157–166.
- Müller-Westermeier, G., 1992: Untersuchung einiger langer deutscher Temperaturreihen. — Meteorol. Z. 1, 155–171.
- Reidat, R., 1957: Klimadaten für Bauwesen und Technik Nr. 7, Bremen. — Deutscher Wetterdienst, Hamburg.
- Schönwiese, Ch.-D., 1979: Klimaschwankungen. — Springer Verlag, Berlin, 181 S.
- 1985: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. — Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 231 S.
- Schönwiese, Ch.-D., J. Malcher, 1985: Nicht-Stationarität oder Inhomogenität? Ein Beitrag zur statistischen Analyse klimatologischer Zeitreihen. — Wetter u. Leben 37, 181–193.
- Schönwiese, Ch.-D., J. Malcher, C. Hartmann, 1986: Globale Statistik langer Temperatur- und Niederschlagsreihen. — Ber. d. Inst. f. Met. u. Geophys. Nr. 65, Frankfurt.
- Scultetus, H. R., 1969: Arbeitsweisen Klimatologie. — Verlag Georg Westermann, Braunschweig, 163 S.

Dipl.-Met. H.-J. HEINEMANN
DWD, Wetteramt Bremen
Flughafendamm 45
D-28199 Bremen

Eingereicht: 22. 9. 1992, angenommen: 21. 8. 1993