

Die Entwicklung des Klimas in Münster/Westfalen

CHRISTOPH BÖWER

Examensarbeit an der Westfälischen Wilhelms-
Universität Münster für das Lehramt der
Sekundarstufe II

2006

THEMENSTELLER:
PROF. DR. OTTO KLEMM

Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	III
	Tabellenverzeichnis	V
1.	Einleitung	1
2.	Einführung in den Klimabegriff	2
2.1	Klimafaktoren	2
2.1.1	Die Sonne	2
2.1.2	Plattentektonik	3
2.1.3	Rückstrahlung	4
2.1.4	Meteoriteneinschläge	5
3.	Das Stadtklima	6
4.	Klimaelemente	9
4.1	Niederschlag	9
4.1.1	Niederschlagsmessung	9
4.2	Temperatur	12
4.2.1	Temperaturmessung	13
4.3	Luftfeuchtigkeit	16
4.3.1	Messung der Luftfeuchte	17
4.4	Sonnenscheindauer	18
4.4.1	Messung der tatsächlichen Sonnenscheindauer	19
4.5	Wind	20
4.5.1	Messung der Windrichtung	21
4.5.2	Messung der Windgeschwindigkeit	21
5.	Beschreibung der Datenkollektive	23
5.1	Die Messstationen	23
5.2	Die Messzeiträume	23
5.3	Die Datenkollektive	24
5.3.1	Daten des Niederschlages	24
5.3.2	Daten für Temperatur und Feuchte	24
5.3.3	Daten für die Sonnenscheindauer	24
5.3.4	Daten für Windrichtung und Windgeschwindigkeit	25
6.	Vergleichbarkeitsuntersuchung der Stationen Münster und Greven	26

6.1	Methoden zur Untersuchung auf Vergleichbarkeit der Daten	26
6.2	Vergleich der Niederschlagsdaten	27
6.3	Vergleich der Daten für Temperatur und Feuchte	28
6.4	Vergleich der Daten für die Sonnenscheindauer	28
6.5	Vergleich der Winddaten	29
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	30
7.	Die Klimaentwicklung in Münster	32
7.1	Methodenauswahl zur Trendanalyse	32
7.2	Die Entwicklung des Niederschlags in Münster von 1891 bis 2005	33
7.2.1	Die Entwicklung der Jahresniederschläge	33
7.2.2	Die Niederschlagsentwicklung der Jahreszeiten	36
7.2.3	Die Entwicklung der Jahresniederschläge von 1951 bis 2005	37
7.3	Die Entwicklung der Temperatur in Münster von 1948 bis 2005	40
7.3.1	Die Entwicklung der Jahrestemperaturen	40
7.3.2	Die Temperaturentwicklung in den Jahreszeiten	42
7.4	Die Entwicklung der Sonnenscheindauer in Münster von 1951 bis 2005	44
7.4.1	Die Entwicklung der jährlichen Sonnenscheindauer	44
7.4.2	Die Entwicklung der Sonnenscheindauer in den Jahreszeiten	45
7.5	Die Entwicklung der relativen Feuchte in Münster von 1948 bis 2005	48
7.5.1	Die Entwicklung der jährlichen relativen Feuchte	48
7.5.2	Die jahreszeitliche Entwicklung der relativen Feuchte	49
7.6	Die Entwicklung des Windes in Münster von 1982 bis 2005	51
7.6.1	Die Entwicklung der Windgeschwindigkeit von 1982 bis 2005	51
7.6.2	Auswertung der Daten für die Windrichtung von 1982 bis 2005	52
8.	Vergleich der Ergebnisse für Münster mit nationalen und globalen Trenduntersuchungen	54
	Abbildung 11 bis 26	56
	Literaturverzeichnis	72
	Dank	74
	Anhang	A1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Plattentektonik (Quelle: BERNER und STREIF 2004, S.23) ..	4
Abb. 2	Das Klimasystem (Quelle: BERNER und STREIF 2004, S.16)	5
Abb. 3	Regenmesser nach Hellmann an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück	10
Abb. 4	„Wippe“ zur Registrierung des Niederschlags (Quelle: HÄCKEL 1999, S.363)	11
Abb. 5	Registrierender Niederschlagsmesser mit Wippenprinzip an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück	12
Abb. 6	Wetterhütte mit Messinstrumenten an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück	14
Abb. 7	Wetterhütte der Flugwetterwarte am Flughafen Münster-Osnabrück	16
Abb. 8	Sonnenscheinautograph ohne Registrierpapier an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück	19
Abb. 9	Skizze des Sonnenschein-Sensors SONI e (Quelle: DEUTSCHER WETTERDIENST [2])	20
Abb. 10	Schalenkreuzanemometer (Quelle: HÄCKEL 1999, S.373) ..	22
Abb. 11	Trend für die Jahresniederschläge in Münster 1891-2005	56
Abb. 12	Trends für die Niederschlagshöhe im Frühling und Winter in Münster 1891-2005	57
Abb. 13	Trends für die Niederschlagshöhe im Sommer und Herbst in Münster 1891-2005	58
Abb. 14	Trend für die Jahresniederschläge in Münster 1951-2005	59
Abb. 15	Trend für die Jahresmitteltemperaturen in Münster 1948-2005	60
Abb. 16	Trends für die Eistage (Maximum < 0 °C) und die Heißen Tage (Maximum > 30 °C) in Münster 1948-2005	61
Abb. 17	Trends für die Mitteltemperaturen der Jahreszeiten in Münster 1949-2005	62
Abb. 18	Trend für die mittlere Sonnenscheindauer pro Jahr in Münster 1951-2005	63

Abb. 19	Trends für die mittlere Sonnenscheindauer der Jahreszeiten in Münster 1952-2005	64
Abb. 20	Trend für die mittlere relative Feuchte pro Jahr in Münster 1948-2005	65
Abb. 21	Trends für die mittlere relative Feuchte der Jahreszeiten in Münster 1949-2005	66
Abb. 22	Trend für die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in Greven 1982-2005	67
Abb. 23	Trends für die Windgeschwindigkeit der Jahreszeiten in Greven 1983-2005	68
Abb. 24	Häufigkeit der Winde nach Windrichtungen in % für die Station Münster 1975-1991	69
Abb. 25	Häufigkeit der Winde nach Windrichtungen in % für die Stationen Münster und Greven 1982-1991	70
Abb. 26	Häufigkeit der Winde nach Windrichtungen in % für die Station Greven 1982-2005	71

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Abweichung des Stadtklimas gegenüber dem Umlandklima (Quelle: HÄCKEL 1999, S.328, verändert)	8
Tab. 2	Geographische Lage der Messstationen	23
Tab. 3	Stationsbezogene Messzeiträume der vorliegenden Klima- elemente	23
Tab. 4	Ergebnisse der Vergleichstests für die Niederschlagsdaten der Stationen Münster und Greven	28
Tab. 5	Ergebnisse der Vergleichstests für die Daten der Sonnen- scheindauer der Stationen Münster und Greven	29
Tab. 6	Ergebnisse der Vergleichstests für die Daten der Windge- schwindigkeit der Stationen Münster und Greven	30
Tab. 7	Veränderung der jährlichen Niederschlagssummen aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1891-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann- Kendall-Tests	33
Tab. 8	Trendwerte des Niederschlags aus den Mittelwerten über 30 Jahre in mm	34
Tab. 9	Abweichung der mittleren Niederschläge der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel	34
Tab. 10	Niederschlagsreichste Jahre, Abweichung vom langjährigen Mittel	35
Tab. 11	Niederschlagsärmste Jahre, Abweichung vom langjährigen Mittel	36
Tab. 12	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Niederschlagsdaten von 1891 bis 2005	36
Tab. 13	Veränderung der Niederschlagssummen in den Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1891- 2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann- Kendall-Tests	37
Tab. 14	Abweichung der 30-jährigen Jahreszeitenmittelwerte des Niederschlags vom langjährigen Mittel in mm	37

Tab. 15	Veränderung der jährlichen Niederschlagssummen aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1951-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	38
Tab. 16	Abweichung der mittleren Niederschläge der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel für die Stationen Münster und Münster (Schleuse) von 1951-2005	38
Tab. 17	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Niederschlagsdaten von 1951 bis 2005 für die Stationen Münster und Münster (Schleuse)	39
Tab. 18	Veränderung der mittleren, jährlichen Temperatur aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	40
Tab. 19	Trendwerte für die Temperatur aus den Mittelwerten über 30 Jahre in K	40
Tab. 20	Abweichung der mittleren Jahrestemperaturen der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel	41
Tab. 21	Wärmste Jahre seit 1948	41
Tab. 22	Kälteste Jahre seit 1948	42
Tab. 23	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Temperaturdaten von 1948 bis 2005	42
Tab. 24	Veränderung der mittleren Temperaturen für die Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	43
Tab. 25	Abweichung der mittleren Jahreszeitentemperaturen der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel	43
Tab. 26	Veränderung der mittleren, jährlichen Sonnenscheindauer aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1951-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	44
Tab. 27	Trendwerte für die Sonnenscheindauer aus den Mittelwerten über 30 Jahre in Stunden	44

Tab. 28	Abweichung der mittleren, jährlichen Sonnenscheindauer der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel	45
Tab. 29	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Daten für die Sonnenscheindauer von 1951 bis 2005	45
Tab. 30	Veränderung der mittleren Sonnenscheindauer für die Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1951-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	46
Tab. 31	Abweichung der mittleren Sonnenscheindauer (SD) der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel bezogen auf die Jahreszeiten	46
Tab. 32	Veränderung der jährlichen relativen Feuchte aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	48
Tab. 33	Trendwerte für die relative Feuchte aus den Mittelwerten über 30 Jahre in %	48
Tab. 34	Abweichung der jährlichen relativen Feuchte der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel	49
Tab. 35	Veränderung der mittleren relativen Feuchte für die Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests	49
Tab. 36	Abweichung der mittleren relativen Feuchte der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel bezogen auf die Jahreszeiten	50
Tab. 37	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für die jährliche Windgeschwindigkeit in Greven von 1982-2005	52
Tab. 38	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Windgeschwindigkeit von 1982-2005 für die Station Greven	52
Tab. 39	Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für die Windgeschwindigkeit in Greven von 1982-2005 bezogen auf die Jahreszeiten	52

1. Einleitung

Die Themen Klima und Klimawandel sind in den letzten Jahren immer mehr in der Öffentlichkeit präsent geworden. In den Medien und dabei vor allem in den Nachrichten werden die Menschen Woche für Woche mit dem Klimawandel konfrontiert. Ob Überschwemmungen, Wirbelstürme, Hitzeperioden oder enorme Schneemengen, fast jeder ist in irgendeiner Form bereits betroffen gewesen.

Ziel dieser Arbeit ist es nicht Prognosen über bevorstehende Katastrophen für die Region Münster abzugeben, vielmehr sollen Trends für das 20. Jahrhundert rekonstruiert werden. Neben den wichtigsten Klimaelementen Niederschlag und Temperatur werden hierbei auch Analysen für die Sonnenscheindauer, die relative Luftfeuchte und den Wind durchgeführt. Bevor dies geschieht, sollen Grundkenntnisse hinsichtlich der das Klima beeinflussenden Faktoren und der Messung der genannten Klimaelemente erörtert werden.

Da Ende der 1990er-Jahre eine Verlegung der Klimastation von Münster nach Greven stattgefunden hat, ist es vor der Datenauswertung unumgänglich, die beiden Stationen hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit zu testen.

Nach Beendigung der Datenauswertungen und Darstellung der Ergebnisse folgt der Vergleich der gewonnenen Erkenntnisse mit den nationalen und globalen Trenduntersuchungen.

2. Einführung in den Klimabegriff

Der Begriff Klima spielt eine zentrale Rolle dieser Arbeit. Um verstehen zu können, was dieser bedeutet, ist die Definition von HÄCKEL hilfreich. Nach ihm kennzeichnet das Klima

„die für einen Ort typischen meteorologischen Bedingungen [...]. Man versucht [...], aus langjährigen Wetterbeobachtungen mit Hilfe statistischer Verfahren einfache Kenngrößen zu errechnen, die eine Vorstellung über die für den Ort charakteristischen Atmosphärenzustände ermöglichen. Dazu gehören in erster Linie Mittelwerte und deren Standardabweichungen, absolute und mittlere Maximum- und Minimumwerte, Schwellenwerte, Kälte- und Wärmesummen, Häufigkeitsverteilungen sowie mittlere und extreme Tages- und Jahrsabläufe. Neben diese einfache Statistik treten aber auch Verfahren höherer Ordnung: Varianzen, Korrelationen, Spektren und vieles anderes mehr.“ (HÄCKEL 1999, S.293f).

Diese Definition grenzt den Klimabegriff somit eindeutig vom Wetter ab, das den momentanen Zustand der Atmosphäre eines Ortes charakterisiert, wobei dies sowohl mittels meteorologischer Kenngrößen, wie z.B. Temperatur, Luftdruck oder Windrichtung, als auch mit Hilfe von Zustandsbeschreibungen, wie z.B. ob die Sonne scheint oder ob Niederschlag fällt, geschieht.

Damit Klimadaten auch statistisch und klimatologisch angemessen ausgewertet werden können, schreibt die World Meteorological Organization (WMO), die der UNO angehört, einen Beobachtungszeitraum von mindestens 30 Jahren vor. Aktuell kennzeichnet der Zeitabschnitt von 1961 bis 1990 die neueste Normalperiode (vgl. ebd., S.293ff).

2.1 Klimafaktoren

Um die Entwicklung des Klimas in vergangenen Zeiten zu verstehen, ist es wichtig, dass mehrere Komponenten in Betracht gezogen werden. Dabei wird zwischen internen und externen Klimafaktoren unterschieden (vgl. BERNER und STREIF 2004, S.15).

2.1.1 Die Sonne

Die größte Bedeutung besitzt eindeutig die Sonne, da ohne sie kein Leben auf der Erde möglich wäre. Seit der Entstehung der Erde vor ca. 4,6 Milliarden

Jahren hat die Energiemenge, die von der Sonne ausgestrahlt wurde und in die Erdatmosphäre eingedrungen ist, stetig zugenommen. Für die Erklärung, wie diese Zunahme zustande gekommen ist, gibt es mehrere Modelle, die hier nicht genauer erläutert werden. Fakt ist jedoch, dass eine Verschiebung der Erdumlaufbahn um die Sonne unser Klima enorm beeinflusst hat. So verlängerte sich die Tageslänge von 20 auf 24 Stunden und die Zahl der Tage eines Jahres sank von 420 auf 365 Tage. Des Weiteren pendelt der Neigungswinkel der Erdrotationsachse in einem Zyklus von 41.000 Jahren zwischen 22° und $24,8^\circ$, was ein Schwanken der eingehenden Energiemenge auf die Nord- und Südhalbkugel zur Folge hat.

Außerdem ist es erwiesen, dass Sonnenflecken, die in einer Periode von acht bis 15 Jahren in wechselnder Menge auftreten, die abgestrahlte Energiemenge beeinflussen. Dabei lässt sich konstatieren, dass mit zunehmender Fleckenzahl der Energieeintrag in die Atmosphäre steigt (vgl. ebd., S.16ff).

2.1.2 Plattentektonik

Die Plattentektonik befasst sich mit der Theorie über den Krustenbau der Erde sowie die Entwicklung der Kontinente und der Ozeane. Ursache dafür sind die Strömungen, die im äußeren Erdkern stattfinden. Diese wirken auf den darüber liegenden Erdmantel ein, dessen Konvektionsbewegungen wiederum eine Verschiebung der Kontinentalplatten in der sich anschließenden Erdkruste verursachen.

Folge dieser Bewegung ist z.B. eine Zunahme der Landmasse, deren Rückstrahlung höher ist als die des Meeres. Dazu sorgt die Auffaltung von Gebirgen für einen Eingriff in die atmosphärische Zirkulation, sowie für Veränderungen der Meeresströmungen. Zudem kommt es zu Vulkanausbrüchen, die eine Verstärkung des Treibhauseffektes hervorrufen, da mehr Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Methan die von der Erde ausgehende Strahlung zurückreflektieren. Schwefelverbindungen und Staub hingegen wirken eher abkühlend, weil sie die von der Atmosphäre eintreffende Energie zurückstrahlen (vgl. ebd., S.22ff).

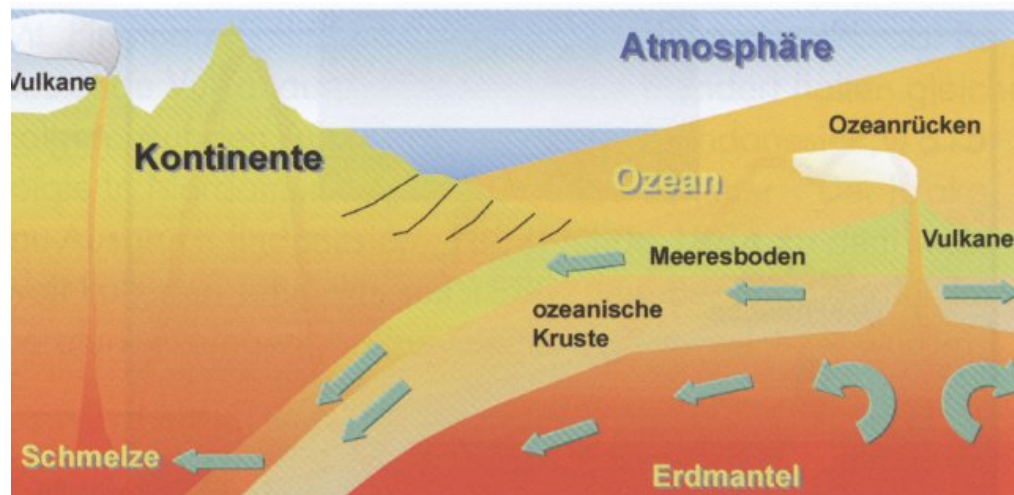


Abb. 1: Plattentektonik. Gewaltige, sehr langsam ablaufende Zirkulationsprozesse im Erdmantel verschieben Teile der Erdkruste gegeneinander. Dort, wo ozeanische Kruste unter die Ränder von Kontinenten gepresst wird, entstehen Gebirge; tief versenkte und aufgeschmolzene ozeanische Kruste dringt in der Erdkruste nach oben und erreicht über Vulkane z. T. die Oberfläche. In den sich allmählich ausdehnenden Ozeanbecken tritt von unten nachdrückende Lava an Spalten aus und bildet im Laufe der Zeit die Mittelozeanischen Rücken (Quelle: BERNER und STREIF 2004, S.23).

2.1.3 Rückstrahlung

In der Atmosphäre lässt sich ein Gemisch verschiedenster Gase finden, dessen Hauptbestandteile Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Wasserdampf und Kohlendioxid sind. Neben dem wichtigsten Treibhausgas Wasserdampf haben auch Stickoxide, Ozon und Methan die Eigenschaft Energie aufzunehmen. Diese Treibhausgase spielen eine entscheidende Rolle für das Leben auf der Erde. Ohne sie läge die Durchschnittstemperatur bei -18°C anstelle von $+15^{\circ}\text{C}$ auf unserem Planeten. Tritt nun der Fall ein, dass sich der Gehalt eines Treibhausgases verändert, würde dies auch für die Temperatur Konsequenzen haben. Die Zunahme hätte einen Temperaturanstieg zur Folge, eine Abnahme hingegen das Absinken der Temperatur. Dies zeigt den enormen Einfluss der Strahlungsbilanz auf unser Klima. Besonders erwähnenswert ist die Tatsache, dass beispielsweise in Folge eines Anstiegs der Temperatur weitere Mechanismen in Gang gesetzt werden. Das daraus resultierende Schmelzen der Eismassen an den Polen oder die Veränderung von Meeresströmungen macht den starken Zusammenhang einzelner Faktoren und die Instabilität des Systems sichtbar (vgl. ebd., S.25ff).

2.1.4 Meteoriteneinschläge

Meteoriteneinschläge haben, mag es auch für uns unwahrscheinlich klingen, das Leben auf dem Blauen Planeten nachweislich verändert. Vor rund 65 Millionen Jahren sorgte der Aufprall eines Asteroiden vor ungefähr zehn Kilometern Durchmesser im heutigen Mexiko für ein Massensterben von Tieren und Pflanzen. Staub und Ruß verhinderten die Sonneneinstrahlung für mehrere Dekaden. Auch der Kohlendioxidgehalt erhöhte sich durch die Verbrennung der Vegetation und durch die Verdunstung des Wassers gilt dies ebenso für den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre. In Deutschland sind das Nördlinger Ries und das Steinheimer Becken zwei Krater, die bei einem Doppelschlag vor vermutlich 15 Millionen Jahren entstanden. Glücklicherweise zerplatzten Objekte mit einem Durchmesser unter 30 Metern beim Eintritt in die Atmosphäre, so dass die Erdbevölkerung zumeist ohne Schaden davonkommt (vgl. ebd., S.40ff).

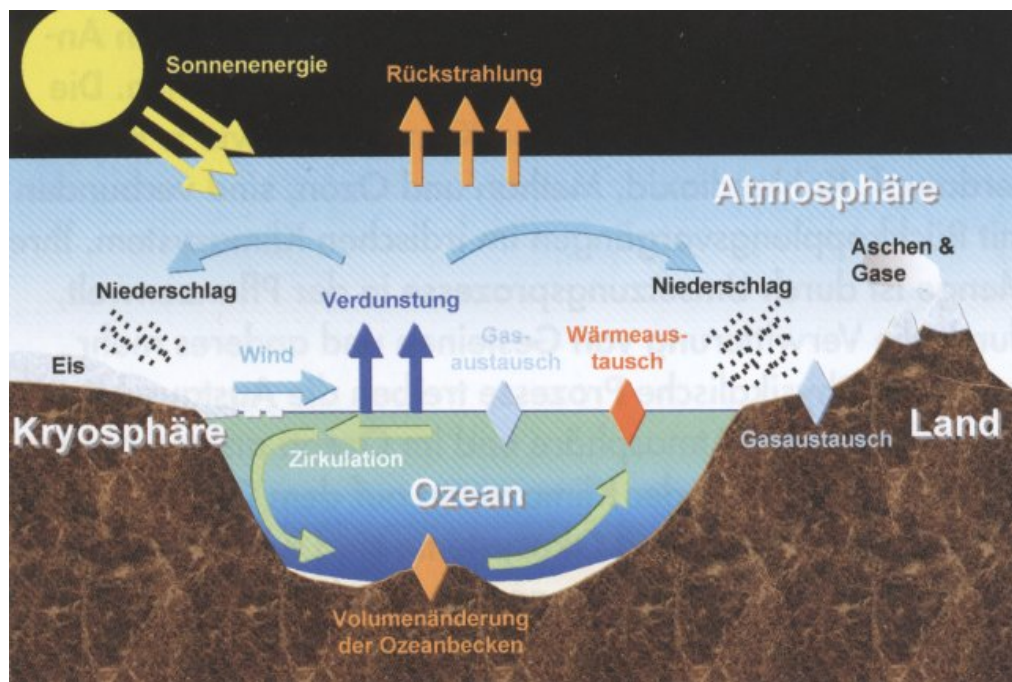


Abb. 2: Das Klimasystem. Im Klimasystem, das durch die Sonne angetrieben wird, sind die Atmosphäre, die Ozeane, das Land und die Eisflächen über vielfältige und wechselseitige Kreisläufe verbunden (Quelle: BERNER und STREIF 2004, S.16).

3. Das Stadtklima

Neben aufgelockerter Bebauung mit zahlreichen Grünflächen in Villengegenden sorgen vor allem Hochhäuser, Baukomplexe, Parkplätze sowie Industrieanlagen für eine strukturierte Oberfläche. Dadurch lässt sich das Stadtklima eindeutig von dem des Umlandes abgrenzen. (vgl. HÄCKEL 1999, S.327).

Wissenschaftler sprechen dabei vom Wärmeinseleffekt, der dafür verantwortlich ist, dass die Temperaturen in der Stadt im Vergleich zum Umland um ca. ein bis drei Kelvin höher sind. Allerdings ist auch zu beachten, dass die Temperaturunterschiede tagsüber geringer ausfallen als beispielsweise an relativ windstillen Abenden oder nachts. Welche Gründe diesem Effekt zugrunde liegen, soll im Folgenden verdeutlicht werden (vgl. ebd., S.329).

Die verschiedenen Geländeoberflächen in Stadt und Umland weisen jeweils unterschiedliche Strahlungsbilanzen auf, wodurch die Differenzen bezüglich der Temperatur erklärt werden können. Die in der Stadt verwendeten Baumaterialien, wie z.B. Asphalt, Beton oder Stahl, besitzen eine hohe Wärmespeicherkapazität, letzterer ist dazu ein sehr guter Wärmeleiter. Hinzu kommt die größere Fläche, die die Stadt durch die dreidimensionale Struktur für den Energie- und Strahlungsumsatz anbietet.

Des Weiteren muss die Versiegelung der Bodenoberfläche angesprochen werden. Durch den schnellen Abfluss des Niederschlages in die Kanalisation kann dieser nicht für die energieaufwändige Transpiration von Pflanzen oder für die Evaporation an der Bodenoberfläche genutzt werden. Da nun weniger Wasser verdunstet, muss auch weniger Energie aufgewendet werden um latente Wärme zu produzieren. Dieser Überschuss kommt der sensiblen Wärme zugute, die die Geländeoberfläche und die Luft am Tag und in der Nacht erwärmt.

Ein weiterer Faktor ist die anthropogene Wärmeerzeugung, die sich aus Heiz- und Klimaanlage, Industrieanlagen, Kraftwerken und dem Verkehr zusammensetzt. Je größer dabei die Stadt ist, umso mehr wirkt sich der Wärmeinseleffekt aus (vgl. KLEMM und MÜSKENS 2006, S.57f).

Warum die Temperaturunterschiede insbesondere nachts zwischen Stadt und Umland so gravierend sind, zeigt ein Blick auf den charakteristischen Tagesverlauf des Windes während einer schwachwindigen und sonnenreichen Wetterlage. Die Erwärmung der Luft geht von der Erdoberfläche aus, die Temperatur nimmt also mit der Höhe ab. Am frühen Nachmittag wird meist die Tageshöchsttemperatur erreicht, weshalb der Temperaturrückgang dann stärker ausfällt und einen vertikalen Austausch von Luftpaketen zur Folge hat. Konsequenz ist das Absinken von Luftmassen an anderen Stellen und die daraus resultierenden horizontalen Luftbewegungen. Die Luft wird somit besser durchmischt und große Temperaturunterschiede können sich erst gar nicht entwickeln.

Bis zum Sonnenaufgang des folgenden Tages kühlen sich die bodennahen Luftmassen jedoch mehr und mehr ab, was im Umland eine Strahlungsinversion bewirkt. Da diese Luftschichtung eine hohe Stabilität aufweist, ist sie nur schwer durch vertikale Bewegungen zu erwärmen. Damit kommt es ebenfalls nicht mehr zu Luftbewegungen in Bodennähe und die Durchmischung der Luftmassen findet nicht statt. Jetzt wirkt sich die von den Gebäuden der Stadt gespeicherte Wärme aus. Mit ihr können die höheren nächtlichen Temperaturen im Stadtgebiet erklärt werden (vgl. ebd., S.58f).

Die relative Luftfeuchtigkeit im Stadtgebiet ist niedriger als diejenige im Umland, was auf die höheren Temperaturen und den geringeren Wasserdampfgehalt aufgrund von verminderter Evapotranspiration zurückzuführen ist. Interessanterweise ist es möglich, dass nachts, durch frühzeitige Taubildung und damit einhergehende Bindung des Wasserdampfes, die Luft im Stadtumland trockener sein kann als in der Stadt. Grundlage für diesen kurzfristig auftretenden höheren Wasserdampfgehalt in der Luft für die städtischen Gebiete ist die zugeführte Wassermenge aus Industrie, Gewerbe und Haushalten. Dabei darf aber nicht übersehen werden, dass die dafür bereitgestellte Energie ihren Ursprung in anthropogenen Quellen hat (vgl. HÄCKEL 1999, S.330).

Tab. 1: Abweichung des Stadtklimas gegenüber dem Umlandklima
(Quelle: HÄCKEL 1999, S.328, verändert)

1) Lufttemperatur in Bodennähe		
am Tag	+0,5K bis	+2K
in der Nacht	+2K bis	+10K
im Mittel	+1K bis	+3K
Lufttemperatur in 2 m Höhe		
Jahresmittel	+0,5K bis	+1,5K
Minima im Winter	+1K bis	+2K
2) Strahlung		
Globalstrahlung	-10% bis	-20%
Sonnenscheindauer	-5% bis	-15%
3) relative Feuchte in Bodennähe		
im Winter	-2% bis	-10%
im Sommer		-2%
		-8%
4) Niederschlag		
Niederschlagshöhe	+5% bis	+10%
Zahl der Regentage		+10%
Schneefall	-5% bis	-10%
5) Wolken und Nebel		
Bewölkungsgrad	+5% bis	+10%
Nebel im Winter		+100%
Nebel im Sommer	+20% bis	+30%
6) Windverhältnisse		
Windgeschwindigkeit	-10% bis	-30%
Windstille	+5% bis	+30%
7) Luftbeimengungen		
gasförmige	+5 bis	+25fach
Kondensationskerne	+10 bis	+100fach
Staub	+10 bis	+50fach

Die effektivste Maßnahme zur Verbesserung des Stadtklimas ist die Erhaltung und Anlage von Grünflächen. Diese können Niederschläge speichern und durch Verdunstung für eine Kühlung der Luft sorgen. Von enormer Bedeutung ist die Frischluftzufuhr für die Stadt. Blockieren Hochhausbauten das Einströmen der Frischluft, wird der Wärmeinseleffekt noch verstärkt. Existieren hingegen breite Schneisen in der Hauptwindrichtung, ist dies fast eine Garantie für saubere Luft in der Stadt (vgl. ebd., S.331f).

4. Klimaelemente

In diesem Kapitel werden einige Parameter genauer beschrieben, die kennzeichnend für die Bestimmung des Klimas sind. Neben der Betrachtung von Niederschlag und Temperatur werden die Sonnenscheindauer, die Luftfeuchte sowie Windrichtung- und geschwindigkeit behandelt.

4.1 Niederschlag

Niederschlag ist die „Gesamtbezeichnung für das aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche gelangende Wasser“ (LESER 2001, S.563).

Etwas genauer definiert HÄCKEL den Niederschlag. „Unter Niederschlag versteht man jede flüssige oder feste, aus [...] Wasser gebildete und herabfallende Ausscheidung aus Wolken und Nebel.“ (1999, S.112).

4.1.1 Niederschlagsmessung

Die Maßeinheit für Niederschlag wird in mm Niederschlagshöhe angegeben, wobei sich folgende Äquivalenzen ergeben: $1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$. Ein gebräuchliches Gerät zur Erfassung der Niederschlagsmenge ist der Regenmesser nach Hellmann (Abb. 3). Die Auffangöffnung in 1 m Höhe hat eine Fläche von 200 cm^2 , deren Rand nach innen abgeschrägt ist. Das Auffanggefäß ist mit einem Trichter verlötet, der mit Hilfe eines Abflussrohres den gefallen Niederschlag direkt in die darunterstehende Sammelkanne leitet. Meist ist das von einem Schutzgehäuse umgebene Gerät an einem Pfahl befestigt. Die Messung erfolgt, indem nach Öffnen des Regenmessers die Sammelkanne in einen Messzylinder entleert wird. Dies geschieht im amtlichen deutschen Messnetz täglich um 7 Uhr.

Durch stetige Verbesserung der Konstruktion werden immer mehr mögliche Messfehler ausgeschaltet. Der abgeschrägte Rand der Auffangöffnung bewirkt, dass auftreffende Regentropfen nicht aus dem Auffanggefäß herausgespritzt werden. Des Weiteren wird durch die Schutzhülle das Erwärmen der Sammelkanne minimiert und somit vor Verdunstung geschützt, was auch ein Grund für die Ausrichtung nach Norden ist. Nichtsdestotrotz lassen sich nicht alle

Fehler vollständig ausräumen, denn die Standortwahl kann nicht immer perfekt sein. Grundsätzlich sollten Gebäude und auch Bäume oder andere Hindernisse mindestens so weit vom Messinstrument entfernt sein, wie diese hoch sind. Der Einfluss des Windes kann zwar durch Schutzvorrichtungen verringert werden, völlig auszuschalten ist er aber nicht. Dabei kann sowohl zu viel als auch totale Abschottung vom Windfeld zu Ungenauigkeiten führen.



Abb. 3: Regenmesser nach Hellmann an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück

Indem bei Schneefall ein Blechkreuz in das Auffanggerät positioniert wird, kann der gefallene Schnee nicht herausgeweht werden. Zur Bestimmung der Niederschlagsmenge ersetzt ein anderes Messgerät das benutzte. Letzteres wird in einen kühlen, frostfreien Raum gestellt, bis der Schnee vollständig geschmolzen ist (vgl. ebd., S.361f).

Eine weitere Möglichkeit der Niederschlagsmessung bietet der registrierende Regenmesser (Abb. 5), der zusätzlich zur gefallen Menge auch den zeitlichen Verlauf der Intensität aufzeichnet. Der Unterschied zum Regenmesser

nach Hellmann ist eine Kippwaage (Abb. 4), auch Wippe genannt. Wie zu sehen ist, trennt eine Wand in der Mitte die beiden spitz nach außen zulaufenden

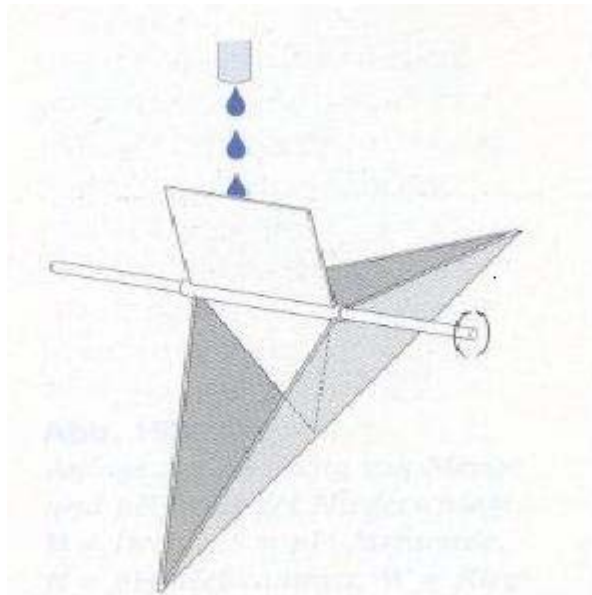


Abb. 4: „Wippe“ zur Registrierung des Niederschlags (Quelle: HÄCKEL 1999, S.363)

Auffanggefäße voneinander, so dass im Beispiel der Abbildung nur die rechte Hälfte über die Niederschlagszuführung gefüllt wird. Der Schwerpunkt verlagert sich dabei immer mehr nach rechts, bis die Wippe kippt und die andere Seite unter die Zuführung klappt.

Dies geschieht immer genau dann, wenn sich 0,1 mm Niederschlag in der Kippwaage befinden. Damit kann z.B. mit Hilfe einer Lichtschranke die Niederschlagsmenge anhand der Wippenumschläge elektronisch festgestellt und dazu auch die zeitliche Komponente berücksichtigt werden (vgl. ebd., S.363f).

Nennenswert ist ebenfalls der Regenmelder, der ausschließlich die Information bereitstellt, ob Niederschlag gefallen ist. Eine geheizte Kunststoffplatte und Leiterbahnen mit positiver bzw. negativer Spannung sind die elementaren Bestandteile dieser Konstruktion. Trifft Niederschlag auf die Leiterbahnen wird elektrischer Strom zwischen ihnen erzeugt, der ein Meldesignal verursacht. Die Funktion der Kunststoffplatte besteht darin, die Oberfläche schnellstmöglich wieder zu trocknen (vgl. ebd., S.364f).



Abb. 5: Registrierender Niederschlagsmesser mit Wippenprinzip an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück

4.2 Temperatur

„Nach der kinetischen Gastheorie ist die Temperatur ein Ausdruck für die Intensität der Molekularbewegung.“, erläutert HÄCKEL und er ergänzt, dass „sich die Teilchen eines Gases im Mittel um so schneller [bewegen], je höher ihre Temperatur ist. Weiter sagt diese Theorie, daß bei gleicher Temperatur die schweren Teilchen langsamer und die leichten Teilchen schneller fliegen.“ (ebd., S.13).

Eine weitere Definition bietet SCHÖNWIESE an. „Definiert ist die Temperatur [...] mikroskopisch über die mittlere molekularkinetische Energie [...] von Materie, im Fall der Atmosphäre eines Luftquantums: Je geringer die Eigenge-

schwindigkeit der Atome und Moleküle ist, um so geringer ist die Temperatur und umgekehrt“ (SCHÖNWIESE 2003, S.67).

4.2.1 Temperaturmessung

Der Schwede Anders Celsius legte bereits 1742 die nach ihm benannte und heute international amtliche Skala für die Messung der Temperatur fest. Diese orientiert sich am Siedepunkt (100 °C) und am Gefrierpunkt (0 °C) von reinem Wasser unter dem Normaldruck von 1013,2 mbar.

In angelsächsischen Staaten ist auch die Maßeinheit Fahrenheit gebräuchlich, wobei gilt: $^{\circ}\text{F} = 32 + 9/5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Für einige Berechnungen ist es praktischer die Temperatur im Absolutmaß mit der Einheit Kelvin darzustellen. Unter diesen Umständen ist 1 K zahlenmäßig zwar mit 1 °C gleichzusetzen, absolut hingegen muss bei der Umrechnung jedoch die Formel $\text{K} = \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15$ verwendet werden (vgl. HÄCKEL 1999, S.350f).

Im Gegensatz zu Celsius war es vermutlich um 1611 Galilei, der das erste Flüssigkeitsthermometer (5 in Abb. 6) erfunden hat, das heute mit Quecksilber, Toluol oder Alkohol gefüllt ist. Die Funktionsweise besteht darin, dass sich die Flüssigkeit bei steigender Temperatur ausdehnt und dadurch in einer schmalen Kapillare aufsteigt. An der Höhe des Anstiegs kann mit Hilfe einer Skala die momentane Lufttemperatur abgelesen werden. Allerdings nimmt die Genauigkeit von Quecksilberthermometern ab ca. -30 °C ab, da die Flüssigkeit bei -39 °C sich verfestigt. Auch Alkoholthermometer haben diesbezüglich eine Schwachstelle bei hohen Temperaturen, weil dann durch Destillation oberhalb des Alkoholfadens kleine Tropfen entstehen.

Zwar ist diese Art von Thermometern nicht zur Registrierung geeignet, aber es besteht die Möglichkeit, dass die Maximum- bzw. Minimumtemperatur abgelesen werden kann. Beim Maximumthermometer (1 in Abb. 6) wird während des Temperaturanstieges das Quecksilber durch eine Engstelle der Kapillare gepresst, an der der Faden beim Absinken abreißt. Damit ist der Höchstwert gekennzeichnet und durch Schleudern des Messgerätes wird es wieder in seinen Ausgangszustand versetzt.

Ein Stift, der das Aussehen einer Hantel hat, ist elementarer Bestandteil des Minimumthermometers (2 in Abb. 6). Bei waagerechter Lagerung schiebt die Oberflächenspannung des Fadens den Stift zurück, bewegt ihn jedoch nicht, wenn die Flüssigkeit bei Erwärmung wieder zurückfließt. Die minimale Temperatur des Messzeitraumes lässt sich so einfach ablesen und durch die Verlagerung in die Senkrechte mit dem Vorratsgefäß nach oben schiebt sich der Stift bis zum Ende des Alkoholfadens und eine neue Messung kann beginnen. Entscheidend für das Funktionieren der Extremthermometer ist die waagerechte Positionierung (vgl. ebd., S.351ff).

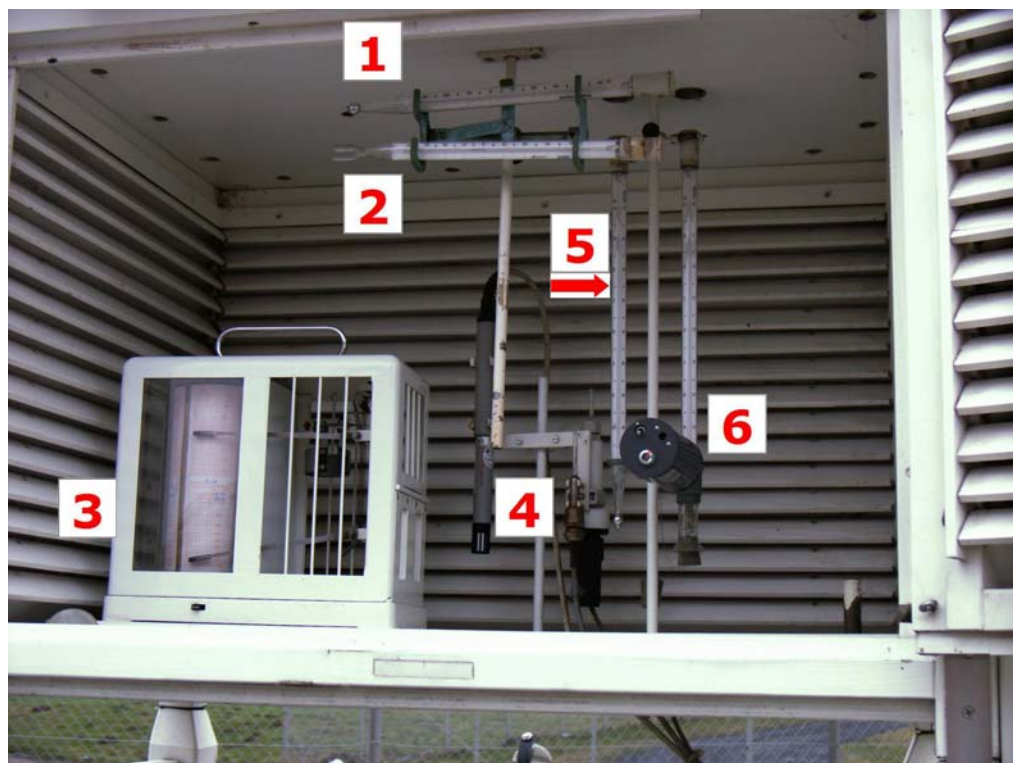


Abb. 6: Wetterhütte mit Messinstrumenten an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück; 1 = Maximumthermometer (Quecksilber), 2 = Minimumthermometer (Alkohol), 3 = Bimetallthermograph (oben) und Haarhygrometer (unten), 4 = Pt-100-Widerstandsthermometer (links) und Elektrischer Feuchtemesser (rechts), 5 = Trockenthermometer, 6 = Feuchttthermometer

Soll mehr als nur die Extremwerte ermittelt werden, kommt der Bimetallthermograph zum Einsatz (3 in Abb. 6), der es ermöglicht den Temperaturverlauf zu rekonstruieren. Ein Bimetallring, der aus zwei miteinander verbundenen Metallstreifen besteht, die sich bei Erwärmung unterschiedlich stark ausdehnen, verändert seine Form bei einer Veränderung der Lufttemperatur. Mittels

einer ausgeklügelten Technik wird diese Veränderung über einen Schreibarm auf Registrierpapier festgehalten, auf dem dann die Entwicklung der Temperatur nachvollzogen werden kann. Die Abweichungen von der realen Temperatur sind mit 0,5 bis 1 K recht hoch, weshalb auch dieses Gerät nicht hochwertige Messergebnisse erzielen kann (vgl. ebd., S.353).

Für derzeitige Messungen wird häufig das Platin-(Pt)-100-DIN-Verfahren genutzt. Durch die Änderung des elektrischen Widerstandes eines genormten Platindrahtes wird die Lufttemperatur erfasst, weshalb das Messgerät auch als Widerstandsthermometer (4, links in Abb. 6) bezeichnet wird. Der technische Fortschritt ist dafür verantwortlich, dass dieses elektrische Messverfahren mit einer Genauigkeit von 0,1 bis 0,2 K arbeitet, je nachdem welche Qualität der Messfühler aufweist (vgl. ebd., S.354f).

Auch bei der Temperaturmessung müssen eine Reihe von Anforderungen beachtet werden um exakte Messungen durchführen zu können. Da jedes Thermometer stets die eigene Temperatur wiedergibt, liegt die Schwierigkeit darin, es auf die Temperatur der umgebenden Luft zu bringen, so dass die gewünschten Werte ermittelt werden können. Deshalb gibt es die Wetterhütte, wie sie in Abb. 7 zu sehen ist. Sie schützt tagsüber vor direkter Sonneneinstrahlung, was sonst zu überhöhten Werten führen würde, und nachts vor zu starker Abkühlung, was den gegenteiligen Effekt zur Folge hätte. Eine Reihe von Maßnahmen, wie z.B. der weiße Anstrich, die Ausrichtung nach Norden, luftdurchlässige Jalousien, ein abgeschrägtes Dach und das Fehlen eines Bodens, sorgen dafür, dass die Zu- bzw. Abstrahlung minimiert und die Hütte gleichzeitig gut durchlüftet wird. Auch die Messung über Gras in 2 m Höhe reduziert die Einflüsse, die der Erdboden auf die Messgeräte ausüben könnte und vereinheitlicht dadurch die Messung (vgl. ebd., S.355f).



Abb. 7: Wetterhütte der Flugwetterwarte am Flughafen Münster-Osnabrück

4.3 Luftfeuchtigkeit

In Bezug auf die Luftfeuchtigkeit sind mehrere Begriffe zu erläutern und eindeutig voneinander abzugrenzen. Unter absoluter Feuchtigkeit oder absoluter Feuchte wird der Wasserdampfgehalt der Luft verstanden. Wasserdampf ist hierbei meteorologisch ein für uns nicht sichtbares Gas und nicht etwa eine Wolke. Da die Maßeinheit g Wasserdampf/m^3 Luft ist und sich Luftmassen in ihrem Volumen ändern, wenn sie auf ein anderes Niveau steigen oder sinken, bevorzugt die Wissenschaft die Angabe in g Wasserdampf in 1 kg feuchter Luft und nennt dies spezifische Feuchtigkeit oder spezifische Feuchte.

Der Begriff Sättigungsfeuchte steht für das Maximum an Wasserdampf, den die Luft aufnehmen kann. Dabei kann diese bei hohen Temperaturen mehr Wasserdampf aufnehmen als bei niedrigen. Wird die spezifische Feuchte

durch die Sättigungsfeuchte geteilt und mit 100 multipliziert, so liefert das Ergebnis den für die Meteorologie wichtigen Begriff der relativen Feuchte. Mit ihr wird der Prozentsatz der Wasserdampfsättigung der Luft bestimmt. Dieser nimmt bei steigenden Temperaturen und gleich bleibender spezifischer Feuchte ab und erhöht sich, sobald es kälter wird (vgl. ebd., S.54ff).

4.3.1 Messung der Luftfeuchte

Das hygrometrische Verfahren ist wohl das Bekannteste zur Feststellung der relativen Feuchte. Die Messung erfolgt mit Unterstützung menschlicher Haare, die bei einer 10-prozentigen Abnahme der relativen Feuchte mit einer Längenabnahme von ca. 0,25% reagieren und andersherum. Ein ganzes Bündel von Haaren, auch Haarharfe genannt, setzt bei einer Veränderung der Haarlänge eine Hebelmechanik in Gang, die dann die Daten über einen Schreibarm auf eine mit Registrierpapier belegte Trommel überträgt (3, unten in Abb. 6).

Eine Genauigkeit von lediglich 3% bis 5% und eine durch die Alterung der Haare bedingte Fehleranfälligkeit sind die gravierenden Mängel des Haarhygrometers. Dennoch spricht die Temperaturunabhängigkeit für die Verwendung von Haaren und die Änderung der Länge ist eine leicht zu realisierende Möglichkeit die relative Luftfeuchte zu ermitteln (vgl. ebd., S.367f).

Ein weiteres bedeutendes Messgerät zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Luft ist das Psychrometer. Es macht sich die Eigenschaft zunutze, dass für die Verdunstung von Wasser Energie nötig ist. Wird über eine feuchte Fläche Luft geblasen, verdunstet Wasser durch Energiefreisetzung der vorüberziehenden Luft, wodurch sich die nasse Oberfläche abkühlt. Je nach Feuchte der Luft, nimmt diese viel oder wenig Wasserdampf auf. Trockene Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen und senkt die Temperatur der Oberfläche umso mehr. Die entstehende Differenz in der Temperatur zwischen Luft und feuchter Oberfläche bestimmt dann den Gehalt an Wasserdampf in der Luft (vgl. ebd., S.369).

Dementsprechend setzt sich das Psychrometer aus einem feuchten und einem trockenen Thermometer zusammen. Die Besonderheit des feuchten Thermometers ist ein Stoffstrumpf, der das Thermometergefäß bedeckt und ständig

befeuchtet wird. Je nachdem wie viel Wärme durch das Verdunsten abgegeben und wie viel Wärme von der Luft aufgenommen werden kann, sinkt die Temperatur des feuchten Thermometers, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Mit einem Ventilator kann dieser noch schneller erzielt werden.

Assmanns Aspirationspsychrometer eignet sich hierbei am besten zur Bestimmung der Luftfeuchte. Bei dieser Art Psychrometer wird sowohl das feuchte als auch das trockene Psychrometer mit einer Ventilationsgeschwindigkeit von etwa 2,5 m/sec ventiliert, so dass nach 3-5 Minuten das Messergebnis ablesbar ist (vgl. DEUTSCHER WETTERDIENST [1]).

Aber auch im Bereich der Messung der Luftfeuchte existieren mittlerweile elektronische Messverfahren, wobei die kapazitive Methode von Bedeutung ist. Es ist wichtig zu wissen, dass hierbei die Kapazität eines Kondensators vom Material zwischen den Kondensatorplatten bestimmt wird.

Zur Messung wird ein ca. 2 cm langer und 0,5 cm breiter Folienstreifen aus einem Polymerkunststoff als Feuchtesensor verwendet. Dieser ist beidseitig mit einer Metallschicht bedampft und hat somit die Funktion des Kondensators. Um die Schichten zu schützen, sind diese mit einer wasserdampfdurchlässigen Schutzfolie überzogen. Schließlich ist nach gewisser Zeit ein Gleichgewichtszustand zwischen der relativen Feuchte der Luft und dem Wassergehalt des Kunststoffes erreicht.

Normalerweise erfolgt die Wartung ein- bis zweimal pro Jahr. Ist der Kondensatorfühler allerdings verdreht, muss er umgehend gereinigt werden um weiterhin eine Messgenauigkeit von 1% bis 5% zu erzielen (vgl. HÄCKEL 1999, S.370f).

4.4 Sonnenscheindauer

„Die maximal mögliche Sonnenscheindauer ist die Zeit, die die Sonne am betrachteten Standort an den einzelnen Tagen des Jahres längstens über dem Horizont stehen kann. Letzten Endes geht es dabei also um eine Horizontvermessung.“ (ebd., S.381). „Als [tatsächliche] Sonnenscheindauer bezeichnet man die [...] direkte Sonneneinstrahlung an einem bestimmten Ort innerhalb

eines längeren Zeitraumes (Tag, Woche, Monat, Jahreszeit, Jahr).“ (DEUTSCHER WETTERDIENST [1]).

4.4.1 Messung der tatsächlichen Sonnenscheindauer

Ein Instrument zur Messung der tatsächlichen Sonnenscheindauer ist der Sonnenscheinautograph (Abb. 8). Eine Glaskugel ist dabei von einer konzentrischen Kugelschale umgeben, welche in Entfernung der Brennweite der Kugel befestigt ist. Auf der Kugelschale wird ein Registrierpapierstreifen mit einer Zeitskala angebracht, auf dem bei Sonnenschein eine Brennschneise hinterlassen wird, so dass am Tagesende die tatsächliche Sonnenscheindauer abgelesen werden kann. Die Form des Papiers wechselt mit der Jahreszeit, da auch der Sonnenstand sich im Jahresverlauf ändert. Ebenso ist die entsprechende Neigung je nach geographischer Breite einzustellen.

Fehler treten unter Umständen beim Ablesen auf oder wenn das Papier feucht wird und den Einbrennvorgang hinauszögert (vgl. HÄCKEL 1999, S.381f).



Abb. 8: Sonnenscheinautograph ohne Registrierpapier an der Flugwetterwarte des Flughafens Münster-Osnabrück

Die moderne Variante ist der Sonnenenergie-Sensor, der durch Abtasten des Himmels mit Hilfe einer sich drehenden Schlitzblende die Strahlungsstärke der Sonne ermittelt. Die Schlitzöffnung hat eine Größe von $1,2^\circ \times 90^\circ$ (Azimut x Höhe), wodurch die Sonne einmalig pro Umdrehung in diese scheint. Die Rotation dauert sechs Sekunden und falls der nötige Schwellenwert erreicht wird, nimmt ein Fotodetektor über einen Lichtleiter das Signal auf und registriert die Sonnenscheindauer (vgl. DETUSCHER WETTERDIENST [2]).

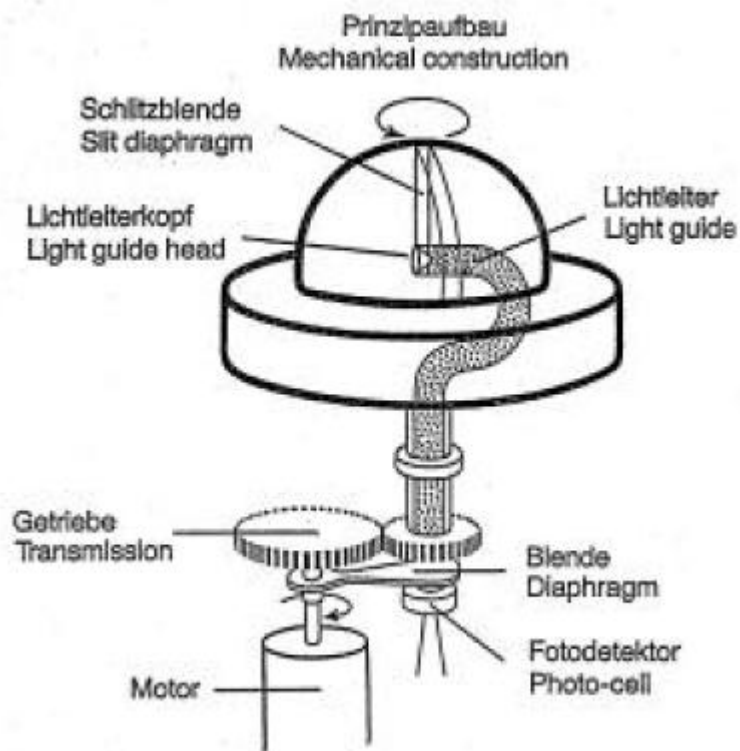


Abb. 9: Skizze des Sonnenschein-Sensors SONI e (Quelle: DEUTSCHER WETTERDIENST [2]).

4.5 Wind

HÄCKEL sagt, „daß Wind immer dann entsteht, wenn an zwei Orten unterschiedlicher Luftdruck herrscht [und] daß der Wind solange aufrechterhalten bleibt, bis sich die Luftdruckgegensätze ausgeglichen haben.“ (ebd., S.233).

Eine weitere Definition versteht Wind als „horizontale Bewegung von Luftmassen [, wobei alle] Winde [...] Ausgleichsströmungen infolge von Luftdruckunterschieden“ sind (LESER 2001, S.997).

„Im Gegensatz zu den anderen meteorologischen Parametern ist der Wind ein Vektor, d.h. er besitzt eine Richtung und eine Geschwindigkeit. Eine korrekte Angabe verlangt also zwei Messungen.“ (HÄCKEL 1999, S.373).

4.5.1 Messung der Windrichtung

Das gebräuchlichste Instrument zur Bestimmung der Windrichtung ist die Windfahne (W in Abb. 10). Um dieser zusätzliche Stabilität zu verleihen, wird häufig mehr als ein Blech verwendet, wodurch sie dann ruhiger im Wind steht. Die Blechplatten zeigen immer in die zur Windrichtung entgegengesetzte Himmelsrichtung. Der Windschreiber ist dann dafür zuständig, dass die Position der Windfahne, also die Windrichtung, mechanisch übertragen wird.

Auf die exakte Funktionsweise soll hier nicht näher eingegangen werden. Generell orientiert sich die Ermittlung der Windrichtung an der Himmelsrichtung bzw. an einer 360- oder 36-teiligen Windrose (vgl. ebd., S.373f).

4.5.2 Messung der Windgeschwindigkeit

Soll die Geschwindigkeit des Windes mitgeteilt werden, kann dies in Kilometer pro Stunde (km/h), Meter pro Sekunde (m/s) oder in Knoten (1 Knoten = 1 nautische Meile) geschehen. Die Messung erfolgt normalerweise in einer Höhe von 10 m über dem Erdboden.

Weltweit wird das rotierende Schalenkreuzanemometer, wie es in Abb. 10 zu sehen ist, am häufigsten verwendet. Ein drei- oder vierzackiger Stern mit Halbkugeln an den Zacken dreht sich dabei um seine eigene Achse. Durch die gleichmäßige Anordnung prallt der Wind immer auf eine konvexe und eine konkave Fläche, wobei letztere diesem mehr Strömungswiderstand entgegengesetzt. Aus diesem Grund setzt die Drehung des Sterns ein und mit zunehmender Windgeschwindigkeit rotiert er immer stärker.

Das Schalenkreuzanemometer funktioniert also losgelöst von der Windrichtung, was eine ständige Neuausrichtung erspart und ein enormer Vorteil des Gerätes ist. Jedoch beginnt die Rotation aufgrund von Reibung erst bei 0,2 m/s

und durch seine Trägheit können Windböen nicht exakt erfasst werden, da eine gewisse Beschleunigungszeit notwendig ist.

Zur Registrierung der Windgeschwindigkeit werden der bereits erwähnte Windschreiber oder elektrische Verfahren genutzt. Fast ohne Reibung wird bei den elektrischen Methoden die Drehung des Schalensterns über einen Schleifkontakt, einen Magneten oder eine Lichtschranke abgetastet und Impulse in eine mittlere Windgeschwindigkeit umgerechnet.

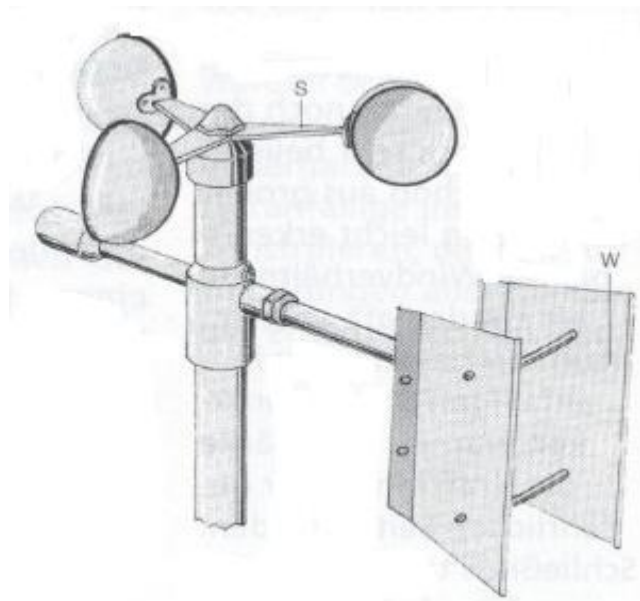


Abb. 10: Schalenkreuzanemometer. W = Windfahne, S = Schalenkreuz (Quelle: HÄCKEL 1999, S.373).

Damit auch Böen aufgezeichnet werden können, wird auf der Achse des Schalenkreuzes ein Dynamo befestigt, wodurch dessen erzeugte Spannung der Rotationsgeschwindigkeit, also quasi der Windgeschwindigkeit, proportional ist (vgl. ebd., S.375f).

5. Beschreibung der Datenkollektive

5.1 Die Messstationen

Die vorhandenen Daten sind von drei verschiedenen Stationen gemessen bzw. aufgezeichnet worden, eine genauere Beschreibung dieser ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Geographische Lage der Messstationen

Stationsname	Höhe über N.N.	Breite	Länge
Greven (Flugwetterwarte)	48 m	52°08	07°42
Münster	62 m	51°57	07°35
Münster (Schleuse)	57 m	51°59	07°40

Die Stationen Greven und Münster liefern Daten für Niederschlag, Temperatur, Feuchte, Sonnenscheindauer, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu ist die Station Münster (Schleuse) eine reine Niederschlagsstation.

5.2 Die Messzeiträume

Es ist wichtig zu wissen, dass die Messungen an der Flugwetterwarte Greven erst im Jahr 1989 begonnen worden sind, selbige in Münster jedoch 1991 endeten. Tabelle 3 liefert eine Übersicht über die Messzeiträume der oben genannten Klimaelemente an der jeweiligen Station.

Tab. 3: Stationsbezogene Messzeiträume der vorliegenden Klimaelemente

Messparameter	Stationsname	Messbeginn	Messende
Niederschlag	Münster	01.01.1891	30.12.1944
		01.01.1947	31.12.1991
Niederschlag	Greven	01.10.1989	31.12.2005
Niederschlag	Münster (Schleuse)	01.01.1951	31.12.2005
Temperatur/Feuchte	Münster	01.01.1948	30.09.1989
Temperatur/Feuchte	Greven	01.10.1989	31.12.2005
Sonnenscheindauer	Münster	01.01.1951	31.12.1991
Sonnenscheindauer	Greven	01.10.1989	31.12.2005
Wind	Münster	01.01.1965	31.12.1991
Wind	Greven	01.01.1982	31.12.2005

5.3 Die Datenkollektive

Im Folgenden sollen nacheinander die Datenkollektive für den Niederschlag, die Temperatur und Feuchte, die Sonnenscheindauer sowie für Windrichtung und Windgeschwindigkeit erläutert werden.

5.3.1 Daten des Niederschlages

Die vorhandenen Daten der Stationen Münster und Greven sind in 1/10 mm angegebene Tageswerte, die sekundlich mit dem Niederschlagsmesser ermittelt und zu Tageswerten aufaddiert werden.

Die Station Münster (Schleuse) ist eine reine Niederschlagsstation und misst ausschließlich den gefallenen Niederschlag eines Tages.

5.3.2 Daten für Temperatur und Feuchte

Die Auswertung von Temperatur und relativer Feuchte erfolgt stündlich um H+30 MEZ und gibt Momentanwerte in 1/10 °C und in % wieder. Aktuell findet die Messung für die Temperatur mit dem Widerstandsthermometer Pt-100 und die der relativen Feuchte mit dem elektrischen Feuchtemesser Rotronic MP101A statt. Dabei werden die Momentanwerte, von denen vier pro Sekunde registriert werden, zu einem Stundenmittel hochgerechnet.

5.3.3 Daten für die Sonnenscheindauer

Der Sonnenschein-Sensor SONI e3 ist zuständig für die Ermittlung der tatsächlichen Sonnenscheindauer. Alle sechs Sekunden stellt er dabei fest, ob die vorhandene Strahlungsstärke als Sonnenschein gewertet werden kann. Die vorliegenden Daten sind in Minuten angegebene Stundenwerte, die bis Juli 1995 mit dem Sonnenscheinautographen in 1/10 Stunden angegeben wurden. Seitdem ist die Messung also wesentlich genauer geworden.

5.3.4 Daten für Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Am 1.1.1975 wurde die Windrichtungsermittlung von der 32-teiligen auf die 36-teilige Windrose umgestellt, so dass Daten, die davor gemessen wurden, schwer mit denen der aktuellen Skala vergleichbar sind. Die Windgeschwindigkeit ist aufbereitet in 1/10 Meter pro Sekunde und wird ebenso wie die Windrichtung mit einem Schalenkreuzanemometer ermittelt. Im Normalfall stellen die Winddaten einen 10-Minuten-Mittelwert dar, bei signifikanten Änderungen kann sich dieses Mittel aber bis auf einen 2-Minuten-Mittelwert reduzieren. Die vorliegenden Daten entsprechen den Stundenwerten.

6. Vergleichbarkeitsuntersuchung der Stationen in Münster und Greven

Die Entwicklung des Flughafens Münster/Osnabrück ca. 20 km nördlich von Münster erforderte dort die Einrichtung einer Flugwetterwarte. Die offiziellen Aufzeichnungen der Wetterdaten begannen im Oktober 1989, parallel dazu wurden jedoch die Messungen an der bestehenden Station in Münster bis einschließlich Dezember 1991 fortgeführt. Nach Information des Deutschen Wetterdienstes erfolgte die Weiterführung als Klimastation mit ehrenamtlichen Mitarbeitern und aufgrund der geringfügigen Qualität der Daten wurde daraufhin zum 31.12.1991 die Einstellung der Messungen veranlasst.

In diesem Kapitel soll deshalb die Vergleichbarkeit der Daten der Stationen in Münster und Greven untersucht werden, indem mit Hilfe statistischer Tests der Überschneidungszeitraum von Oktober 1989 bis Dezember 1991 genauer unter die Lupe genommen wird. Die Auswertung erfolgt hierbei mit Stunden-, Tages- und 10-Tageswerten.

6.1 Methoden zur Untersuchung auf Vergleichbarkeit der Daten

Zunächst wurden die Datensätze auf Normalverteilung mit dem Kolmogoroff-Smirnow-Test bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ untersucht. Die Referenzwerte sind ZÖFEL (1992) und MADANSKY (1988) entnommen, wobei die geforderten Werte des zuletzt genannten strenger sind als jene von ZÖFEL.

Im Falle der Normalverteilung werden die Mittelwerte durch den t-Test und die Varianzen durch den F-Test mit SCHÖNWIESE (2000, S.286ff) jeweils auf dem 5%-Niveau auf Gleichheit getestet.

Außerdem wird mit Hilfe des Signifikanztestes für den Korrelationskoeffizienten nach Pearson die Stärke des Zusammenhanges der beiden Datensätze getestet. Die Nullhypothese geht dabei von Unkorreliertheit aus.

Handelt es sich um Stichproben, deren Verteilung unbekannt ist, kommt stattdessen der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman zum Einsatz, den SCHÖNWIESE (2000, S.224) zum Vergleich zweier Messreihen bei einer

Standortverlegung der Messstation empfiehlt. Mit dem Test über den Koeffizienten r kann dann der statistische Zusammenhang der zu untersuchenden Variablen getestet werden. Liegt r nahe 0, besteht ein geringer Zusammenhang, ist die Differenz zu 1 klein, wird von einem hohen Zusammenhang gesprochen. Auch bei Spearman besagt die Nullhypothese, dass ein Zusammenhang nicht existiert.

Des Weiteren prüft der U-Test nach Mann-Whitney die Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz. Er testet die Nullhypothese, dass die Mittelwerte identisch sind. Mit Hilfe des auf Standardnormalverteilung zu testenden Z-Wertes kann dann überprüft werden, ob die Nullhypothese auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ abgelehnt werden kann oder nicht.

Schließlich findet noch der Kolmogoroff-Smirnow-Anpassungstest seine Anwendung. Dieser testet die Gleichheit der Verteilungen ebenfalls auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$, indem er das Maximum des Abstands zwischen den beiden empirischen Verteilungen betrachtet. Die Nullhypothese lautet, dass die Verteilungen gleich sind. Anhand eines auf Normalverteilung getesteten Z-Wertes wird festgestellt, ob diese abgelehnt werden kann oder nicht.

Wird ein Wert mit der Standardnormalverteilung geprüft, muss dieser hier größer als 1,96 sein, damit die Nullhypothese abgelehnt werden kann (vgl. SCHÖNWIESE 2000, S.283).

6.2 Vergleich der Niederschlagsdaten

Da für die Tages- und 10-Tageswerte keine Normalverteilung vorliegt, werden hier die nichtparametrischen Tests angewandt. Die Korrelationskoeffizienten betragen 0,89 und 0,96 (vgl. Tab. 4), so dass von einem hohen bzw. sehr hohen Zusammenhang gesprochen werden kann mit eindeutigen Signifikanzwerten, die die Nullhypothese verwerfen. Die Z-Werte von 0,49 und 0,22 sind kleiner als der Referenzwert der Standardnormalverteilung von 1,96. Folglich kann die Nullhypothese, dass die Stichproben bezüglich ihrer zentralen Tendenz gleich sind, nicht abgelehnt werden. Gleiches gilt für die Ergebnisse des Kolmogoroff-Smirnow-Anpassungstestes, der die Nullhypothese, die von der Gleichheit der Verteilungen ausgeht, nicht verwirft.

Tab. 4: Ergebnisse der Vergleichstests für die Niederschlagsdaten der Stationen Münster und Greven

Tageswerte (n=821)		Signifikanzwert
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,89	< 0,01
Mann-Whitney Z	0,49	0,62
Kolmogoroff-Smirnow Z	0,62	0,84
10-Tageswerte (n=82)		
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,96	< 0,01
Mann-Whitney Z	0,22	0,82
Kolmogoroff-Smirnow Z	0,47	0,98

6.3 Vergleich der Daten für Temperatur und Feuchte

Bereits in Tab. 3 zeigt sich, dass ein Vergleich der Klimaelemente Temperatur und Feuchte nicht möglich ist, da es keinen Überschneidungszeitraum der vorhandenen Datensätze gibt.

6.4 Vergleich der Daten für die Sonnenscheindauer

Zunächst muss erwähnt werden, dass in der Messreihe der Station Münster Werte fehlen, weshalb diese in beiden Datensätzen entfernt wurden um die Datenvergleichbarkeit zu gewährleisten.

Für die Stunden- und Tageswerte liegt keine Normalverteilung vor. Spearmans Rangkorrelationskoeffizient liefert Werte von 0,89 und 0,97 (Tab.5), was auf einen hohen bzw. sehr hohen Zusammenhang schließen lässt und durch die Signifikanzwerte untermauert wird. Wie schon bei den Niederschlagswerten kann auch beim Mann-Whitney-Test für die Daten der Sonnenscheindauer die Nullhypothese nicht abgelehnt werden. Die Werte in Tab. 5 liefern das gleiche Resultat für den Kolmogoroff-Smirnow-Anpassungstest, wodurch die Nullhypothese nicht zurückgewiesen werden kann.

Die 10-Tageswerte hingegen sind normalverteilt. Dabei gibt der Korrelationskoeffizient nach Pearson mit 0,99 einen sehr hohen Zusammenhang wieder.

Das Ergebnis des t-Testes besagt, dass die Unterschiede der 10-Tagesmittelwerte der Station Münster (2673,4 Min.) und der Station Greven (2693 Min.) nicht zufällig sind, was dann einem Unterschied von 2 Minuten pro Tag entspricht. Auch die Überprüfung der Varianzen mit dem F-Test führt zu der Schlussfolgerung, dass ein Unterschied nicht festgestellt werden kann, da $1,05 < 1,45$ (vgl. SCHÖNWIESE 2000) und somit die Nullhypothese nicht verworfen werden kann. Die Standardabweichung für Münster beträgt 1637, jene für Greven 1681.

Tab. 5: Ergebnisse der Vergleichstests für die Daten der Sonnenscheindauer der Stationen Münster und Greven

Stundenwerte (n=14363)		Signifikanzwert
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,89	< 0,01
Mann-Whitney Z	1,00	0,32
Kolmogoroff-Smirnow Z	0,61	0,85
Tageswerte (n=797)		
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,97	< 0,01
Mann-Whitney Z	0,17	0,86
Kolmogoroff-Smirnow Z	0,38	0,99
10-Tageswerte (n=79)		
Normalverteilung	Ja (nach ZÖFEL)	
Korrelationskoeffizient	0,99	< 0,01
t-Test	0,08	0,94
F-Test	1,05	0,81

6.5 Vergleich der Winddaten

Für den Vergleich der Datensätze mussten mehr als 1000 Stundenwerte entfernt werden, weil für einen Monat der Messreihe Greven keine Daten vorliegen. Da jedoch noch mehr als 86000 Werte vorliegen, stellt dies kein gravierendes Problem dar.

Die Werte der Korrelationskoeffizienten sind alle größer als 0,7 und sprechen somit noch für eine hohe Korrelation. Sie können jedoch nicht so überzeugen, wie diejenigen der vorherigen Berechnungen, lediglich die Tageswerte bilden eine Ausnahme. Weil die jeweiligen Nullhypothesen des Mann-Whitney-Tests

und des Kolmogoroff-Smirnov-Tests für alle Zeiteinheiten verworfen werden (Tab. 6), kann eindeutig festgestellt werden, dass die beiden Messreihen der Windgeschwindigkeit sich weder in Bezug auf ihre zentrale Tendenz noch auf ihre Verteilung gleichen.

Tab. 6: Ergebnisse der Vergleichstests für die Daten der Windgeschwindigkeit der Stationen Münster und Greven

Stundenwerte (n=86177)		Signifikanzwert
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,72	< 0,01
Mann-Whitney Z	5,01	< 0,01
Kolmogoroff-Smirnow Z	2,76	< 0,01
Tageswerte (n=3588)		
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,91	< 0,01
Mann-Whitney Z	13,06	< 0,01
Kolmogoroff-Smirnow Z	5,64	< 0,01
Monatswerte (n=116)		
Normalverteilung	Nein	
Korrelationskoeffizient	0,86	< 0,01
Mann-Whitney Z	49,93	< 0,01
Kolmogoroff-Smirnow Z	20,98	< 0,01

6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass hohe bis sehr hohe Korrelationen vorliegen. Vor allem die Daten für die Sonnenscheindauer liefern hierfür überzeugende Werte. Die Resultate für die Niederschlagsdaten sind zwar nicht so gut wie jene der Sonnenscheindauer, lassen aber durchaus den Vergleich zu. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel davon ausgegangen, dass sich die Messreihen trotz des Stationswechsels sinnvoll fortsetzen und analysieren lassen.

Da für die beiden untersuchten Klimaelemente die Analysen positiv ausgefallen sind, soll dies auch für die Daten der Temperatur und Feuchte angenommen werden. Weil jedoch keine statistischen Untersuchungen vorgenommen werden können, sind die Auswertungen mit besonderer Vorsicht zu genießen.

Bei den Daten der Windgeschwindigkeit kann allerdings nicht von Vergleichbarkeit der beiden Messstationen gesprochen werden. Das weitere Vorgehen für die Auswertung der Windgeschwindigkeit und –richtung wird in Kapitel 7.6 begründet beschrieben.

7. Die Klimaentwicklung in Münster

Ziel dieses Abschnittes ist die Beschreibung der Klimaentwicklung des 20. Jahrhunderts in Münster. Vorrangig werden die Klimaelemente Niederschlag, Temperatur und Sonnenscheindauer analysiert. Die Trends für die relative Feuchte und den Wind werden hingegen in geringerem Umfang dargestellt.

Zudem gilt, dass von hier an nicht mehr zwischen den Wetterstationen Münster und Greven unterschieden wird. Analysen, die sich bis ins Jahr 2005 ausdehnen, sind ab dem 01.10.1989 mit den Daten der Station in Greven fortgeführt worden. In den Abbildungen ist dies auch durch die Verwendung unterschiedlicher Signaturen sichtbar.

Die langjährigen Mittel beziehen sich nicht auf die in Kapitel 2 vorgestellte Normalperiode von 1961-1990, sondern stellen die Durchschnittswerte für die gesamte jeweilige Messreihe dar. Es ist das Ziel, lokale Entwicklungen dadurch einfacher aufdecken zu können.

Zusätzlich muss darauf hingewiesen werden, dass die Daten für die Entwicklung jeglicher Trends der Jahreszeit Winter immer erst ein Jahr nach Messbeginn anfangen, da die klimatologische Jahreszeit Winter sich aus den Monaten Dezember, Januar und Februar zusammensetzt und daher jeweils der Dezember vor Beginn der Aufzeichnungen fehlt.

7.1 Methodenauswahl zur Trendanalyse

Ob überhaupt ein Trend vorliegt, wird mit dem parameterfreien Mann-Kendall-Test überprüft. Für jede Trenduntersuchung ergibt sich ein Mann-Kendall-Statistik-Wert S mit einer dazugehörigen Sicherheitswahrscheinlichkeit α . Ist der S -Wert positiv, zeigt dies einen positiven Trend an, ein negativer S -Wert steht stellvertretend für einen negativen Trend. Um von einem Trend sprechen zu können, muss eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von mindestens 0,95 vorliegen. Allerdings ist es nicht möglich konkrete numerische Angaben über die Stärke des Trends zu machen (vgl. GILBERT 1987, S.208ff).

Jene Trendstärke kann mit Hilfe der linearen Regression berechnet werden, falls für die Messwerte Normalverteilung vorliegt. Dabei wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen den zu untersuchenden Variablen hergestellt. Die

Steigung der linearen Gleichung beschreibt dadurch die Veränderung pro Zeiteinheit (vgl. SCHÖNWIESE 2000, S.163f).

Des Weiteren spielen die Bildung und der Vergleich von Mittelwerten eine wichtige Rolle bei der Datenanalyse.

7.2 Die Entwicklung des Niederschlags in Münster von 1891 bis 2005

Zu Beginn dieses Abschnittes sei nochmals darauf hingewiesen, dass eine Datenlücke für die Station Münster vom 01.01.1945 bis 31.12.1946 existiert. Dies ist in den Berechnungen berücksichtigt, wird jedoch nicht explizit in jeder Tabelle und Abbildung erwähnt.

Nach MADANSKY (1988) liegt für die Jahresmittelwerte und die Mittelwerte des Niederschlags bezogen auf die Jahreszeiten sowohl für die Station Münster als auch für die Station Münster (Schleuse) Normalverteilung vor.

7.2.1 Die Entwicklung der Jahresniederschläge

Für die Entwicklung des Niederschlags in Münster seit 1891, dessen jährlicher Mittelwert bei 757,7 mm liegt, lässt sich kein genereller Trend erkennen (Tab. 7, Abb. 11). Zwar spiegelt die Analyse der Tageswerte einen signifikant negativen Trend wieder, dieser kann jedoch durch Betrachtung der Monats- und Jahreswerte widerlegt werden.

Tab. 7: Veränderung der jährlichen Niederschlagssummen aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1891-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests. Positive S-Werte stehen im Folgenden für positive Tendenzen, negative Werte für S für negative Tendenzen und α für die Sicherheitswahrscheinlichkeit.

	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	-5203069	1510	6
α	0,97	0,54	0,50
Veränderung in mm: -0,69			

Das heißt jedoch nicht, dass die Niederschlagsentwicklung ohne Trends verlaufen ist. Ein Blick in Tab. 8 zeigt signifikante Entwicklungen von 1921-1950 und 1941-1970. Dies liegt vor allem daran, dass die zehn Jahre von 1921-1930 sowie von 1961-1970 sehr nass waren. Dennoch sind diese Werte mit einer gewissen Vorsicht zu bewerten, da in diese Perioden die angesprochene Datenlücke der 40er-Jahre fällt, die mit Abstand die trockensten zehn Jahre (679 mm) gewesen sind (Tab. 9).

Tab. 8: Trendwerte des Niederschlags aus den Mittelwerten über 30 Jahre in mm (Signifikanzniveau blaue Werte: $\alpha > 0,9$; rote Werte: $\alpha > 0,95$)

Zeitraum	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
1891-1920	-38,58	-31,83	-18,95	40,25	-48,54
1901-1930	-28,02	0,04	57,39	20,87	50,77
1911-1940	16,00	-7,81	29,63	-46,78	-1,24
1921-1950	-16,04	-30,26	-59,38	-3,79	-125,85
1931-1960	-30,75	52,37	-21,26	12,20	15,40
1941-1970	67,80	32,91	27,88	17,31	160,80
1951-1980	46,54	-51,77	-5,95	-4,59	-21,55
1961-1990	-20,89	-38,65	15,82	10,87	-30,76
1971-2000	0,37	14,30	74,99	51,25	131,20
1976-2005	-0,93	35,27	57,80	6,78	84,15

Tab. 9: Abweichung der mittleren Niederschläge der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel

Jahrzehnte	Mittel Dekade in mm	Abweichung in mm	Abweichung in %
1891-1900	786,22	28,52	3,76
1901-1910	759,99	2,29	0,30
1911-1920	752,05	-5,65	-0,75
1921-1930	800,61	42,91	5,66
1931-1940	736,36	-21,34	-2,82
1941-1950	679,28	-78,43	-10,35
1951-1960	737,81	-19,89	-2,63
1961-1970	800,44	42,74	5,64
1971-1980	702,08	-55,62	-7,34
1981-1990	762,90	5,20	0,69
1991-2000	780,22	22,52	2,97
1996-2005	805,21	47,51	6,27
Langjähriges Mittel 1891-2005: 757,7 mm			

Unbestritten hingegen ist der Aufwärtstrend von 1971-2000 (131,20 mm, Tab. 8), was auch mit der sehr trockenen Dekade von 1971-1980 zusammenhängt. Erwähnenswert ist auf jeden Fall auch, dass die vergangenen zehn Jahre mit einem durchschnittlichen Wert von 805 mm den Spitzenplatz belegen (Tab. 9).

Drei der zehn niederschlagsreichsten Jahre (Tab. 10) traten seit 1993 auf. Da die 20er- und 60er-Jahre ebenfalls mit zwei Werten vertreten sind, mag dies ein Indiz dafür sein, dass momentan eine Phase mit hohen Niederschlagsmengen herrscht. Besonders erwähnenswert ist die überdurchschnittliche Niederschlagshöhe von 1998 (1046,9 mm).

Im Kontrast zu der erwiesenermaßen sehr feuchten Periode von 1921-1930 steht, dass trotzdem zwei der zehn niederschlagsärmsten Jahre in diese Dekade fallen. Mit 1942 und 1949 sind jedoch auch zwei Jahre der sehr trockenen 40er-Jahre dabei. Extrem trocken war das Jahr 1959 mit nur 396,9 mm.

Tab. 10: Niederschlagsreichste Jahre, Abweichung vom langjährigen Mittel

Jahr	Mittlere Niederschlagshöhe in mm	Abweichung in mm	Abweichung in %
1998	1046,9	289,2	38,17
1966	969,4	211,7	27,94
1926	957,1	199,4	26,32
1965	935	177,3	23,40
1923	933,4	175,7	23,19
1961	911,9	154,2	20,35
1894	909,5	151,8	20,03
1993	906,9	149,2	19,69
1936	906,3	148,6	19,61
2002	899	141,3	18,65
Langjähriges Mittel 1891-2005: 757,7 mm			

Tab. 11: Niederschlagsärmste Jahre, Abweichung zum langjährigen Mittel

Jahr	Mittlere Niederschlagshöhe in mm	Abweichung in mm	Abweichung in %
1959	396,9	-360,8	-47,62
1921	513	-244,7	-32,30
1911	514,8	-242,9	-32,06
1929	567,5	-190,2	-25,10
1933	570,7	-187	-24,68
1953	578,9	-178,8	-23,60
1989	589,5	-168,2	-22,20
1949	595,6	-162,1	-21,39
1971	596,8	-160,9	-21,24
1942	597,8	-159,9	-21,10
Langjähriges Mittel 1891-2005: 757,7 mm			

Keines der untersuchten Perzentile (Tab. 12) weist einen signifikanten Auf- oder Abwärtstrends auf. Das heißt, dass sich weder die Häufigkeit sehr starker bzw. sehr geringer Niederschläge bedeutsam verändert hat.

Tab. 12: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Niederschlagsdaten von 1891 bis 2005

Perzentil	P 0,95	P 0,9	P 0,75	P 0,5	P 0,25	P 0,1	P 0,05
S-Wert	217	161	-393	118	0	0	0
α	0,70	0,65	0,84	0,61	0,5	0,5	0,5

7.2.2 Die Niederschlagsentwicklung in den Jahreszeiten

Auch bei der Betrachtung der jahreszeitlichen Niederschläge treten keine signifikanten Trends für die letzten 115 Jahre auf (Tab. 13). Allerdings lassen sich Tendenzen erkennen, dass der Niederschlag im Sommer zurückgeht und im Herbst dafür zunimmt (Tab.13, Abb. 13). Im Frühling und Winter fehlen derartige Tendenzen hingegen vollständig (Abb.12).

Tab. 13: Veränderung der Niederschlagssummen in den Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1891-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Veränderung in mm	4,94	-30,00	24,45	-0,29
S-Wert	223	-522	398	90
α	0,71	0,90	0,84	0,59

Diese zuvor genannten Entwicklungen erscheinen auch in den Abweichungen der 30-jährigen Jahresmittelwerte (Tab. 14). Insbesondere die Werte ab 1961 unterstützen die Vermutung. Hierbei fällt auch auf, dass vor allem im Sommer und im Herbst verhältnismäßig große Abweichungen auftreten.

Nur für den Herbst (1901-1930) und den Frühling (1940-1970) sind mit Tab. 8 zwei signifikante Aufwärtstrends zu beobachten. Allerdings darf nicht übersehen werden, dass für die Zeit von 1971-2000 sowohl im Herbst als auch im Winter annähernd diese Signifikanz erreicht wird.

Tab. 14: Abweichung der 30-jährigen Jahreszeitenmittelwerte des Niederschlags vom langjährigen Mittel in mm

Zeitraum	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
1891-1920	2,09	13,68	-13,33	6,50
1901-1930	-2,27	5,00	5,79	5,93
1911-1940	-4,32	-5,25	8,43	3,35
1921-1950	-6,97	-9,96	8,58	-4,62
1931-1960	-16,72	2,98	-13,29	-10,98
1941-1970	-7,76	9,40	-12,43	0,69
1951-1980	-0,02	10,50	-15,34	-7,94
1961-1990	9,11	-10,94	7,94	1,66
1971-2000	4,52	-15,44	9,81	-1,93
1976-2005	6,53	-15,88	13,02	5,75
Mittel	161,6 mm	221,0 mm	190,2 mm	186,1 mm

7.2.3 Die Entwicklung der Jahresniederschläge von 1951 bis 2005

Aufgrund der Tatsache, dass die Daten der Station Schleuse erst ab 1951 vorliegen und alle Messreihen der anderen Klimaelemente auch zu diesem Zeitpunkt oder kurz zuvor beginnen, soll hier nochmals explizit auf den Zeitraum von 1951-2005 eingegangen werden.

Die Ergebnisse in Tab. 15 sprechen ebenso dafür, dass kein aussagekräftiger Trend von 1951-2005 stattgefunden hat. Ein Vergleich der Mittelwerte der Dekaden seit 1971 mit dem langjährigen Mittel (Tab. 16) lässt einen Aufwärtstrend erkennen, was auch mit der niederschlagsarmen Dekade von 1971-1980 (Münster 702 mm, Schleuse 688 mm) zusammenhängt. Insgesamt ist also eine leichte Tendenz zunehmender Niederschläge für die vergangenen 35 Jahre zu erkennen (Abb. 14).

Tab. 15: Veränderung der jährlichen Niederschlagssummen aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1951-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

Münster			
	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	-993715	7566	117
α	0,85	0,91	0,80
Veränderung in mm: 51,11			
Münster (Schleuse)			
	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	809700	6485	103
α	0,80	0,87	0,77
Veränderung in mm: 52,40			

Tab. 16: Abweichung der mittleren Niederschläge der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel für die Stationen Münster und Münster (Schleuse) von 1951-2005

Dekaden	Mittel Dekade in mm		Abweichung in mm		Abweichung in %	
	Münster	Schleuse	Münster	Schleuse	Münster	Schleuse
1951-1960	737,81	727,62	-22,72	-23,03	-2,99	-3,07
1961-1970	800,44	790,17	39,91	39,52	5,25	5,26
1971-1980	702,08	688,65	-58,45	-62,00	-7,69	-8,26
1981-1990	762,90	747,84	2,37	-2,81	0,31	-0,37
1991-2000	780,22	775,55	19,69	24,90	2,59	3,32
1996-2005	805,21	772,99	44,68	22,34	5,87	2,98
Mittel 1951-2005: Münster 760,5 mm; Münster (Schleuse) : 750,6mm						

Eindeutig ist dagegen die Zunahme starker Niederschlagsereignisse für die Station Münster (Tab. 17). Da dies für die Station Münster (Schleuse) aber nicht zutrifft, kann der Trend nicht eindeutig bestätigt werden.

Tab. 17: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Niederschlagsdaten von 1951 bis 2005 für die Stationen Münster und Münster (Schleuse)

Münster							
Perzentil	P 0,95	P 0,9	P 0,75	P 0,5	P 0,25	P 0,1	P 0,05
S-Wert	355	143	-83	-47	0	0	0
α	0,99	0,85	0,73	0,64	0,5	0,5	0,5
Münster (Schleuse)							
Perzentil	P 0,95	P 0,9	P 0,75	P 0,5	P 0,25	P 0,1	P 0,05
S-Wert	157	158	13	49	0	0	0
α	0,87	0,87	0,54	0,64	0,5	0,5	0,5

7.3 Die Entwicklung der Temperatur in Münster von 1948 bis 2005

Für die Jahresmittelwerte der Temperatur und die Mittelwerte der jährlichen Jahreszeitentemperatur liegt nach ZÖFEL (1992) Normalverteilung vor.

7.3.1 Die Entwicklung der Jahrestemperaturen

Für den Verlauf der Temperatur lässt sich ein positiver und mit geringen Einschränkungen bei den Monatswerten signifikanter Trend feststellen (Tab. 18, Abb. 15). Die Temperaturzunahme wird mit 1,03 °C beziffert, was auch Tab. 19 unterstreicht. Insbesondere scheint es so zu sein, dass dieser Zuwachs sich hauptsächlich in den letzten 30 Jahren vollzogen hat.

Tab. 18: Veränderung der mittleren, jährlichen Temperatur aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Stundenwerte	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	3402699349	6266212	8606	507
α	> 0,99	> 0,99	0,92	> 0,99
Veränderung in °C: 1,03				

Für die Dekaden seit 1961 ist ein stetiger Anstieg der Durchschnittstemperatur festzustellen. Erreichte diese in der 60er-Jahren so eben die Marke von 9 °C, zeigte das Thermometer im vergangenen Jahrzehnt bereits durchschnittlich mehr als 10 °C an (Tab. 20) und damit 0,56 °C über dem langjährigen Mittel von 9,50 °C.

Tab. 19: Trendwerte für die Temperatur aus den Mittelwerten über 30 Jahre in K (Signifikanzniveau blaue Werte: $\alpha > 0,9$; rote Werte: $\alpha > 0,95$)

Zeitraum	Frühling in K	Sommer in K	Herbst in K	Winter in K	Jahr in K
1951-1980	0,23	0,75	0,15	1,35	0,56
1961-1990	0,66	0,54	0,25	1,68	0,79
1971-2000	1,50	0,41	0,24	-0,02	0,51
1976-2005	1,50	1,31	0,16	1,40	1,09

Tab. 20: Abweichung der mittleren Jahrestemperaturen der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel

Dekade	Mitteltemperatur in °C	Differenz in K
1951-1960	9,16	-0,34
1961-1970	9,01	-0,49
1971-1980	9,52	0,02
1981-1990	9,53	0,03
1991-2000	9,82	0,32
1996-2005	10,06	0,56
Langjähriges Mittel: 9,50 °C		

Ein weiterer Beleg für diese aussagekräftige Zunahme der Temperatur veranschaulichen Tab. 21 und Tab. 22. Neun der zehn wärmsten Jahre in Münster ereigneten sich seit 1989. In den Jahren 1999 und 2000 lagen die Durchschnittstemperaturen sogar 1,19 bzw. 1,20 °C über dem langjährigen Mittel. Die meisten kalten Jahre fielen in den Zeitraum vor 1967. Obwohl das Jahr mit 7,95 °C das viertkälteste seit 1948 war, ist dennoch die mittlere Temperatur der letzten zehn Jahre vergleichbar hoch.

Tab. 21: Wärmste Jahre seit 1948

Jahr	Mittlere Temperatur in °C	Differenz in K
2000	10,70	1,20
1999	10,69	1,19
2002	10,55	1,05
1990	10,47	0,97
1994	10,38	0,88
1989	10,37	0,87
2003	10,36	0,86
2005	10,29	0,79
1992	10,26	0,76
1975	10,20	0,70
Langjähriges Mittel 1948-2005: 9,50 °C		

Tab. 22: Kälteste Jahre seit 1948

Jahr	Mittlere Temperatur in °C	Differenz in K
1963	7,83	-1,67
1956	7,84	-1,66
1962	7,88	-1,62
1996	7,95	-1,55
1985	8,28	-1,22
1987	8,43	-1,07
1955	8,53	-0,97
1965	8,53	-0,97
1979	8,72	-0,78
1952	8,73	-0,77
Langjähriges Mittel 1948-2005: 9,50 °C		

Auffällig sind ebenfalls die bedeutsamen Aufwärtstrends für die Perzentile P 0,95 und P 0,1 (Tab. 23). Das heißt, dass die Häufigkeit hoher Temperaturen zunimmt und zugleich die Anzahl der Tage, an denen Frost herrscht, abnimmt. Die Trends für die Eistage und die heißen Tage (Abb. 16) unterstützen diese These.

Tab. 23: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Temperaturdaten von 1948 bis 2005

Perzentil	P 0,95	P 0,9	P 0,75	P 0,5	P 0,25	P 0,1	P 0,05
S-Wert	465	143	240	44	214	385	199
α	0,999	0,82	0,945	0,61	0,92	0,995	0,91

7.3.2 Die Temperaturentwicklung in den Jahreszeiten

Die Untersuchung der jahreszeitlichen Trends zeigt, dass bis auf den Herbst alle anderen Jahreszeiten signifikante Anstiege verzeichnen (Tab. 24, Abb. 17). Für den Frühling und den Sommer sind vornehmlich die vergangenen 30 Jahre aussagekräftig mit Trendwerten von 1,50 und 1,31 °C (Tab. 19).

Tab. 24: Veränderung der mittleren Temperaturen für die Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Veränderung in °C	1,27	1,40	0,31	1,27
S-Wert	397	387	82	242
α	>0,99	>0,99	0,71	0,95

Der Vergleich der Durchschnittstemperaturen der Dekaden mit den Mittelwerten ergibt einen kontinuierlichen Anstieg für den Frühling und den Sommer seit 1961 (Abb. 25). Dass die 50er-Jahre in den beiden Jahreszeiten etwas wärmer waren, ist mit Sicherheit den vergleichsweise hohen Temperaturen im Jahr 1959 zuzuschreiben (Abb. 17). Die Abweichungen im Herbst hingegen fallen deutlich niedriger aus und die Entwicklung im Winter ist wesentlich sprunghafter als jene im Frühling und Sommer, weshalb vermutlich kein belegbarer Trend für die Zeit von 1976 bis 2005 vorliegt (Abb. 25).

Tab. 25: Abweichung der mittleren Jahreszeitentemperaturen der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel

Dekade	Frühling		Sommer	
	Mitteltemperatur in °C	Differenz in K	Mitteltemperatur in °C	Differenz in K
1951-1960	8,44	-0,46	16,34	-0,44
1961-1970	8,41	-0,49	16,31	-0,47
1971-1980	8,61	-0,29	16,77	-0,01
1981-1990	8,93	0,03	16,68	-0,10
1991-2000	9,57	0,67	17,25	0,47
1996-2005	9,64	0,74	17,49	0,71
	Langjähriges Mittel: 8,90 °C		Langjähriges Mittel: 16,78 °C	
Dekade	Herbst		Winter	
	Mitteltemperatur in °C	Differenz in K	Mitteltemperatur in °C	Differenz in K
1951-1960	9,88	-0,11	1,85	-0,46
1961-1970	10,10	0,11	1,21	-1,10
1971-1980	9,75	-0,24	2,94	0,63
1981-1990	10,17	0,18	2,34	0,03
1991-2000	9,76	-0,23	2,65	0,34
1996-2005	10,26	0,27	2,69	0,38
	Langjähriges Mittel: 9,99 °C		Langjähriges Mittel: 2,31 °C	

7.4 Die Entwicklung der Sonnenscheindauer in Münster von 1951 bis 2005

Nach ZÖFEL (1992) sind die Mittelwerte der jährlichen Sonnenscheindauer normalverteilt. Die Mittelwerte der Jahreszeiten erfüllen nach MADANSKY (1988) ebenfalls diese Forderung.

7.4.1 Die Entwicklung der jährlichen Sonnenscheindauer

Für die Jahreswerte der Sonnenscheindauer lässt sich kein eindeutiger Trend feststellen, dafür sind die Signifikanzwerte zu niedrig (Tab. 26). Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass das Jahr 1959 mit 2065 Stunden Sonnenschein mehr als 500 Stunden über dem Durchschnittswert von 1552,6 Std. liegt (Abb. 18). Das wirkt sich auch auf die Jahrestrends in Tab. 27 aus, die ab 1961 positiv ausfallen. Eine leichte Tendenz des Anstiegs der Sonnenscheindauer ist zu erkennen, für eine signifikante Aussage reicht dies allerdings nicht.

Tab. 26: Veränderung der mittleren, jährlichen Sonnenscheindauer aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1951-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Stundenwerte	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	760234260	1299478	1850	85
α	> 0,99	0,91	0,63	0,73
Veränderung in Std.: 44,98				

Tab. 27: Trendwerte für die Sonnenscheindauer aus den Mittelwerten über 30 Jahre in Stunden (Signifikanzniveau rote Werte: $\alpha > 0,95$)

Zeitraum	Frühling in Std.	Sommer in Std.	Herbst in Std.	Winter in Std.	Jahr in Std.
1951-1980	-23,81	-0,51	-7,14	-0,34	-90,19
1961-1990	29,47	7,90	-6,17	7,09	112,52
1971-2000	7,81	5,56	-4,71	6,68	49,10
1976-2005	-1,84	7,22	15,00	7,60	80,93

Die besonders hohe Sonnenscheindauer des Jahres 1959 wirkt sich auch auf die Mittelwerte der Dekaden aus. Die 50er-Jahre beanspruchen den Höchstwert für sich, gefolgt vom Mittel von 1991-2000 (Tab. 28). Für die letzten

zehn Jahre ergibt sich hingegen wieder ein Durchschnittswert unterhalb des langjährigen Mittels. Der niedrige Wert der 60er-Jahre erklärt zudem den hohen Trendwert von 112,52 für den Zeitraum von 1961-1990 in Tab. 27.

Tab. 28: Abweichung der mittleren, jährlichen Sonnenscheindauer der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel

Dekade	Mittlere Sonnenscheindauer in Std.	Differenz in Std.
1951-1960	1583,9	31,3
1961-1970	1495,9	-56,7
1971-1980	1517,2	-35,4
1981-1990	1567,4	14,8
1991-2000	1575,4	22,8
1996-2005	1535,6	-17,0
Langjähriges Mittel: 1552,6 Std.		

Die Auswertungen der Perzentile ergeben einen statistisch aussagekräftigen Anstieg für alle Perzentile bis auf P 0,1 und P 0,05 (Tab. 29). Das bedeutet, dass im Verlauf des Jahres sowohl in der Spitze als auch im Durchschnitt länger die Sonne scheint pro Tag.

Tab. 29: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Daten für die Sonnenscheindauer von 1951 bis 2005

Perzentil	P 0,95	P 0,9	P 0,75	P 0,5	P 0,25	P 0,1	P 0,05
S-Wert	234	352	322	368	435	0	0
α	0,954	0,995	0,99	0,996	0,999	0,5	0,5

7.4.2 Die Entwicklung der Sonnenscheindauer für die Jahreszeiten

Bei Betrachtung der Sonnenscheindauer bezogen auf die Jahreszeiten, fällt vor allem der Aufwärtstrend von 12,6 Stunden im Winter auf (Tab. 30, Abb. 19). Für den Sommer und den Herbst sind nur weniger inhaltsreiche Tendenzen zu erkennen und im Frühling ist die Entwicklung sogar rückläufig.

Tab. 30: Veränderung der mittleren Sonnenscheindauer für die Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1951-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Veränderung in Std.	-6,18	7,20	0,36	12,60
S-Wert	-115	63	-2	386
α	0,80	0,67	0,50	>0,99

Die Ursache für den Rückgang der Sonnenscheindauer scheint in der Zeit von 1951-1960 zu liegen (Tab. 31). Mit diesem überaus hohen Wert kann auch der Abwärtstrend von 23,81 Stunden in der Phase von 1951-1980 interpretiert werden. Für die Zeit von 1971-2000 ist die Entwicklung wieder positiv gewesen, wogegen selbige für die vergangenen 30 Jahre wieder leicht rückläufig ist (Tab. 27). Sommer und Winter verzeichnen Tendenzen für eine Zunahme der Sonnenscheindauer seit 1961 (Tab. 27, Abb. 19), wobei diese im Sommer wie-

Tab. 31: Abweichung der mittleren Sonnenscheindauer (SD) der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel bezogen auf die Jahreszeiten

Dekade	Frühling		Sommer	
	Mittlere SD in Std.	Differenz in Std.	Mittlere SD in Std.	Differenz in Std.
1951-1960	178,6	16,0	193,9	-1,9
1961-1970	149,4	-13,2	193,0	-2,8
1971-1980	159,5	-3,1	192,6	-3,2
1981-1990	163,8	1,2	198,2	2,4
1991-2000	162,4	-0,2	202,5	6,7
1996-2005	156,2	-6,4	190,8	-5,0
	Mittel: 162,6 Std.		Mittel: 195,8 Std.	
Dekade	Herbst		Winter	
	Mittlere SD in Std.	Differenz in Std.	Mittlere SD in Std.	Differenz in Std.
1951-1960	106,1	1,8	50,8	-4,3
1961-1970	105,7	1,4	50,4	-4,7
1971-1980	101,3	-3,0	52,6	-2,5
1981-1990	101,9	-2,4	58,3	3,2
1991-2000	100,5	-3,8	58,9	3,8
1996-2005	105,3	1,0	60,3	5,2
	Mittel: 104,3 Std.		Mittel: 55,1 Std.	

der leicht rückläufig ist (Tab. 31). Die Analyse für den Herbst liefert keine Ansätze von Trends, allerdings zeigt Tab. 27 einen Trendwert von 15,00 Stunden seit 1976, was vermutlich an den ansteigenden Werten seit 2002 liegt (Abb. 19).

7.5 Die Entwicklung der relativen Feuchte in Münster von 1948 bis 2005

Sowohl für die jährlichen Mittelwerte der relativen Feuchte als auch für die Mittelwerte der Jahreszeiten gilt Normalverteilung nach ZÖFEL (1992).

7.5.1 Die Entwicklung der jährlichen relativen Feuchte

Für die Entwicklung der relativen Feuchte ist seit 1948 ein Abwärtstrend von 1,86 % zu verzeichnen, der für alle untersuchten Zeiteinheiten signifikant ist (Tab. 32, Abb. 20).

Mit Tab. 33 wird deutlich, dass die Abnahme hauptsächlich im Zeitraum von 1951-1980 stattgefunden hat, in welchem ein Trendwert von -3,45 % vorliegt. Dass der Gesamtwert dieses Ausmaß nicht erreicht, ist der Entwicklung der zurückliegenden 20 bis 25 Jahre zuzuschreiben.

Tab. 32: Veränderung der jährlichen relativen Feuchte aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Stundenwerte	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	-1476613536	-5449136	-10961	-429
α	> 0,99	> 0,99	0,96	> 0,99
Veränderung in %: -1,86				

Tab. 33: Trendwerte für die relative Feuchte aus den Mittelwerten über 30 Jahre in % (Signifikanzniveau blaue Werte: $\alpha > 0,9$; rote Werte: $\alpha > 0,95$)

Zeitraum	Frühling in %	Sommer in %	Herbst in %	Winter in %	Jahr in %
1951-1980	-3,28	-5,04	-2,16	-3,38	-3,45
1961-1990	-3,12	-1,87	0,14	-0,48	-1,33
1971-2000	1,97	-0,49	3,66	2,33	1,97
1976-2005	1,82	-1,10	2,18	1,93	1,23

Ganz deutlich wird dies bei Betrachtung der Werte für die Dekaden (Tab. 34). Das Jahrzehnt von 1971-1980 hatte mit Abstand den geringsten Durchschnittswert und zwar mit 1,29 % unter dem langjährigen Mittel von 79,49 %.

Damit kann der Abwärtstrend bis 1980 bzw. der Aufwärtstrend seit 1971 erklärt werden. Nichtsdestotrotz befinden sich die Werte der zuletzt untersuchten Zeiträume immer noch unter denen der 50er- und 60er-Jahre.

Tab. 34: Abweichung der jährlichen relativen Feuchte der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel

Dekade	Mittlere Feuchte in %	Differenz in %
1951-1960	80,36	0,87
1961-1970	80,33	0,84
1971-1980	78,20	-1,29
1981-1990	79,23	-0,26
1991-2000	79,32	-0,17
1996-2005	79,31	-0,18
Langjähriges Mittel: 79,49 %		

7.5.2 Die jahreszeitliche Entwicklung der relativen Feuchte

Die Trendberechnung für die Jahreszeiten (Tab. 35) ergibt Signifikanz lediglich für den Sommer, der eine negative Abweichung von 5,11 % aufweist. Frühling und Winter verfehlten den Signifikanzbereich knapp, im Herbst dagegen ist nicht annähernd ein Trend über den gesamten Untersuchungszeitraum zu erkennen (Abb. 22).

Tab. 35: Veränderung der mittleren relativen Feuchte für die Jahreszeiten aus der Trendberechnung für die Station Münster von 1948-2005 inklusive Signifikanzbestimmung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Veränderung in %	-2,13	-5,11	0,49	-0,81
S-Wert	-229	-519	-67	-219
α	0,94	>0,99	0,67	0,94

Erwähnenswert sind dafür umso mehr die Tendenzen, die in den Trendwerten über die 30-jährigen Mittelwerte auftreten. Der scheinbar wenig beeinflusste Herbst verbucht für die Periode von 1951-1980 einen Negativtrend, dem eine positive Entwicklung von 1971-2000 gegenübersteht (Tab. 33). Für Sommer

und Winter kann ein signifikanter negativer Trend für den Zeitraum von 1951-1980 vermerkt werden.

Festzuhalten ist auch, dass die Entwicklung der relativen Feuchte der Dekaden für den Sommer fast durchgängig negativ ist, was sich auch in der zuvor erwähnten Signifikanz ausdrückt. Im Herbst und im Winter ist von 1971-2000 eine Steigerung der relativen Feuchte zu registrieren, wohingegen die Werte für den Frühling seit den 80er-Jahren stagnieren.

Tab. 36: Abweichung der mittleren relativen Feuchte der Jahrzehnte vom langjährigen Mittel bezogen auf die Jahreszeiten

Dekade	Frühling		Sommer	
	Mittlere Feuchte in %	Differenz in %	Mittlere Feuchte in %	Differenz in %
1951-1960	74,74	0,35	77,30	2,31
1961-1970	76,09	1,70	76,05	1,06
1971-1980	72,85	-1,54	74,01	-0,98
1981-1990	74,20	-0,19	74,52	-0,47
1991-2000	74,21	-0,18	73,25	-1,74
1996-2005	74,20	-0,19	73,52	-1,47
	Langjähriges Mittel: 74,39 %		Langjähriges Mittel: 74,99 %	
Dekade	Herbst		Winter	
	Mittlere Feuchte in %	Differenz in %	Mittlere Feuchte in %	Differenz in %
1951-1960	83,32	-0,26	86,07	1,10
1961-1970	83,79	0,21	85,29	0,32
1971-1980	82,25	-1,33	83,71	-1,26
1981-1990	83,64	0,06	84,57	-0,40
1991-2000	84,60	1,02	85,20	0,23
1996-2005	84,30	0,72	85,09	0,12
	Langjähriges Mittel: 83,58 %		Langjähriges Mittel: 84,97 %	

7.6 Die Entwicklung des Windes in Münster von 1982 bis 2005

Das Vorgehen bei der Auswertung der Winddaten erweist sich als komplizierter. Wie bereits Kapitel 6.6 gezeigt hat, sind die Daten der Windgeschwindigkeit der Stationen Münster und Greven nicht miteinander vergleichbar. Erschwerend kommt noch hinzu, dass zum 1.1.1975 die 32-teilige Windrose durch eine 36-teilige ersetzt wurde. Zudem kam es höchstwahrscheinlich zu Beginn der 80er-Jahre zu einer Beeinflussung des Windfeldes durch den Bau des Westfälischen Museums für Naturkunde. Beim Vergleich der beiden Messreihen in Abb. 24 fällt eine Verschiebung der Hauptwindrichtung um ca. 20 Grad von Süd nach West auf. Ob die starke Abnahme nördlicher Winde ebenfalls damit zusammenhängt, erscheint fraglich. Aus genannten Gründen kann lediglich eine reduzierte Darstellung der Ergebnisse erfolgen und somit die Windwerte vor 1975 keinerlei Beachtung finden. Außerdem kann aufgrund der nicht vorhandenen Vergleichbarkeit bezüglich der Windgeschwindigkeit die Entwicklung dieser erst ab 1982 für die Station Greven ausgewertet werden.

Im Gegensatz zu den bisher behandelten Klimaelementen liegt für die Jahres- und Jahreszeitenwerte der Station Greven bezogen auf die Windgeschwindigkeit keine Normalverteilung vor. Aus diesem Grund fehlen aussagekräftige, quantitative Angaben über deren Entwicklung. Dennoch sind in den Abbildungen 22 und 23 lineare Trends angegeben um die Entwicklung zu verdeutlichen. Streng genommen wäre hierfür Normalverteilung notwendig.

7.6.1 Die Entwicklung der Windgeschwindigkeit von 1982 bis 2005

Die an der Station in Greven gemessenen Windgeschwindigkeiten verdeutlichen einen statistisch inhaltsreichen Negativtrend. Alle Signifikanzwerte erreichen eine Sicherheitswahrscheinlichkeit jenseits von 0,99 (Tab. 37). Auch Abb. 22 illustriert diese Gegebenheit anschaulich und lässt auf einen geschätzten Rückgang der Windgeschwindigkeit um 0,5 m/s schließen.

Tab. 37: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für die jährliche Windgeschwindigkeit in Greven von 1982-2005

	Stundenwerte	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte
S-Wert	-1541469753	-1582743	-7708	-114
α	> 0,99	> 0,99	> 0,99	> 0,99

Dass diese Veränderung nicht auf eine Verschiebung der extremsten Werte zurückzuführen ist, veranschaulichen die Ergebnisse der Perzentil-Untersuchungen (Tab. 38). Insbesondere für die Perzentile P 0,25 bis P 0,75 ergeben sich sehr signifikante, negative Trends, was die These einer generellen Abnahme der Windgeschwindigkeit zusätzlich bekräftigt.

Tab. 38: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den jährlichen Perzentilen (P) der Windgeschwindigkeit von 1982-2005 für die Station Greven

Perzentil	P 0,95	P 0,9	P 0,75	P 0,5	P 0,25	P 0,1	P 0,05
S-Wert	-58	-78	-121	-108	-113	-83	-43
α	0,928	0,975	0,999	0,997	0,998	0,981	0,862

Die beschriebene negative Entwicklung ist auf alle Jahreszeiten übertragbar (Tab. 39). Von Frühling bis Winter setzt sich der Abwärtstrend signifikant durch. Mit Hilfe von Abb. 23 ist erkennbar, dass die Abnahme der Windgeschwindigkeit in allen Jahreszeiten annähernd parallel verläuft.

Tab. 39: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für die Windgeschwindigkeit in Greven von 1982-2005 bezogen auf die Jahreszeiten

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
S-Wert	-115	-88	-77	-87
α	> 0,99	0,99	0,98	0,99

7.6.2 Auswertung der Daten für die Windrichtung von 1982 bis 2005

Der Vergleich der Windrichtungen für die Stationen Münster und Greven von 1982-1991 (Abb. 25) zeigt, dass eine hohe Übereinstimmung in Bezug auf die Hauptwindrichtung West-Südwest vorliegt. Etwa ein Viertel aller Winde weht

in beiden Messreihen aus dieser Himmelsrichtung. Die Station Münster registriert im Vergleich zu Greven mehr Nordwinde, wogegen in Greven eine Häufung von Winden aus Ost-Südost vorliegt. Für die verbleibenden Windrichtungen weisen beide Stationen ähnliche Häufigkeiten auf.

Die Windrose in Abb. 26 veranschaulicht, dass sich die Häufigkeit der Winde nach Windrichtungen in Greven seit 1991 kaum verändert hat. Die Hauptwindrichtung ist weiterhin West-Südwest und rund zehn Prozent aller Winde wehen aus Ost-Südost. Es bleibt festzuhalten, dass anhand der Abbildungen kein Trend festzustellen ist.

8. Vergleich der Ergebnisse für Münster mit nationalen und globalen Trenduntersuchungen

Abschließend erfolgt der Vergleich der Trendanalysen von Münster mit dem internationalen und auf Deutschland bezogenen Forschungsstand. Der Schwerpunkt wird hierbei auf die Vergleichswerte für Niederschlag und Temperatur gelegt.

Die Klimaforschungs-Arbeitsgruppe des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I) ermittelte einen durchschnittlichen Anstieg der Niederschlagsmenge von 7-12 % für unsere Breiten, betonte jedoch auch, dass dies kein einheitlicher Trend sei, sondern regionale Unterschiede vorliegen. Die Zunahme sei vor allem an die Jahreszeiten Herbst und Winter geknüpft und habe sich insbesondere von 1976-1999 ereignet (vgl. HOUGHTON 2001, S.142f).

Auch RAPP (2000) bestätigt einen signifikanten Anstieg der Niederschlagsmenge um 50-150 mm von 1896-1995, der größtenteils auf die Wintermonate zurückzuführen ist. Für den Sommer stellt er keine gravierenden Verschiebungen fest. In der Periode von 1966-1995 beziffert RAPP das Anschwellen der Niederschlagshöhe auf bis zu 10 %, wobei ebenfalls auf dem Winter und auch auf dem Herbst der Schwerpunkt der Verlagerung liegt. Für die Sommermonate ermittelt er hingegen ein Defizit, das lokal sogar Signifikanz aufweist (vgl. RAPP 2000, S.69ff).

Im Gegensatz zu den soeben genannten Trendwerten, ist für Münster kein signifikanter Aufwärtstrend für den Niederschlag im 20. Jahrhundert zu erkennen (Tab. 7). Dasselbe gilt für die Entwicklung in den Jahreszeiten, auch hier sind Tendenzen nicht eindeutig verifizierbar (Tab. 13). Ob dies damit zusammenhängt, dass die Messreihe für Münster länger ist als die Vergleichsreihen, kann nicht eindeutig beantwortet werden.

Für die vergangenen 30 bis 40 Jahre existiert zwar kein signifikanter, positiver Trend (Tab. 15), aber die Niederschlagshöhen seit 1971 (Tab. 16) verdeutlichen einen kontinuierlichen Zuwachs.

Eine größere Übereinstimmung lässt sich bei den Trends für die Temperatur ausmachen. Das IPCC gibt eine durchschnittliche Erhöhung der Lufttemperatur seit 1976 von 0,17 °C pro Dekade an, die sich insbesondere auf den Frühling und den Winter verteilt. Ihren Analysen zufolge waren die 90er-Jahre das wärmste Jahrzehnt des Jahrhunderts (vgl. HOUGHTON 2001, S.101).

Die Auswertungen für Deutschland von RAPP offenbaren einen ähnlichen Erwärmungstrend. Abgesehen von regionalen Abweichungen kennzeichnet er für Frühling und Sommer Erwärmungsraten von 0,5-1,8 °C im Zeitraum von 1966-1995. Im Winter liegen diese sogar im Bereich von 1-2 °C, sind jedoch im Vergleich zum Sommer weniger aussagekräftig. Die Ausbildung einer Erwärmung im Herbst fehlt dagegen völlig (vgl. RAPP 2000, S.73).

Einen nachweisbaren Trend für die Temperaturzunahme vermerken auch die für Münster durchgeführten Untersuchungen (Tab. 18, Tab. 19). Von 1971 bis 2000 konnte ein Trendwert von 0,51 °C berechnet werden, der dem des IPCC sehr nahe kommt. Für diesen Zeitabschnitt kann desgleichen der Anstieg von 1,3 °C im Frühling ergänzt werden. Die Trends für Sommer und Winter fallen zwar nicht so hoch aus, ein Blick auf die vergangenen 30 Jahre lässt dafür den von RAPP diagnostizierten Anstieg erkennen und unterstützt die Aussage, dass der Herbst diesbezüglich keine Rolle spielt.

Der vom IPCC erforschten jährlichen Zunahme der Luftfeuchtigkeit von 0,04 % seit 1980 (vgl. HOUGHTON 2001, S.103) kann für Münster annähernd zugestimmt werden (Tab. 33). Wenngleich diese auch nicht signifikant ist, so ist der Aufwärtstrend gut erkennbar.

Es bleibt abschließend festzustellen, dass die Trends für Münster größtenteils mit denen der nationalen und globalen Untersuchungen übereinstimmen. Lediglich für die Niederschlagsentwicklung des 20. Jahrhunderts kann ein Aufwärtstrend nicht bestätigt werden.

Abb. 11: Trend für die Jahresniederschlagshöhe in Münster 1891 - 2005

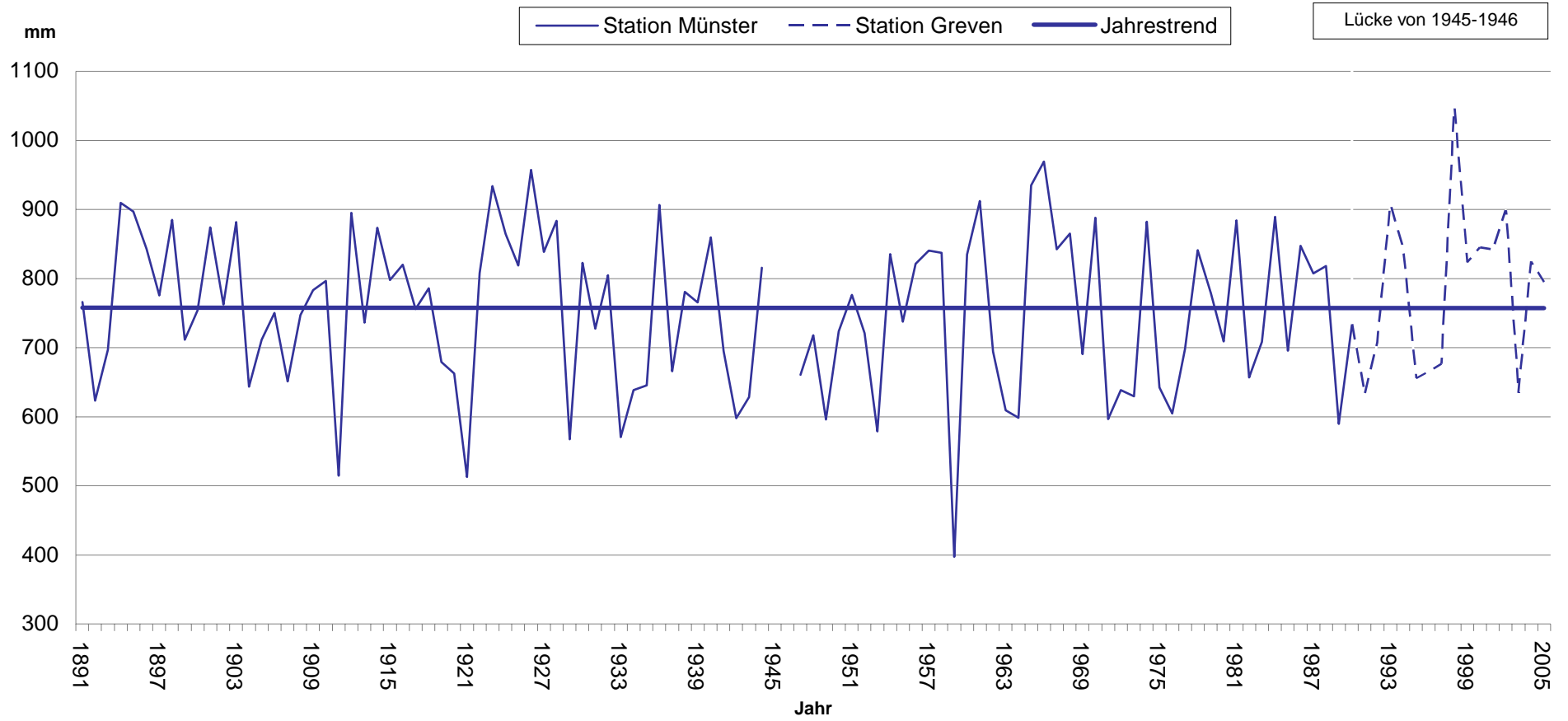


Abb. 12: Trends für die Niederschlagshöhe im Frühling und Winter in Münster 1891 - 2005

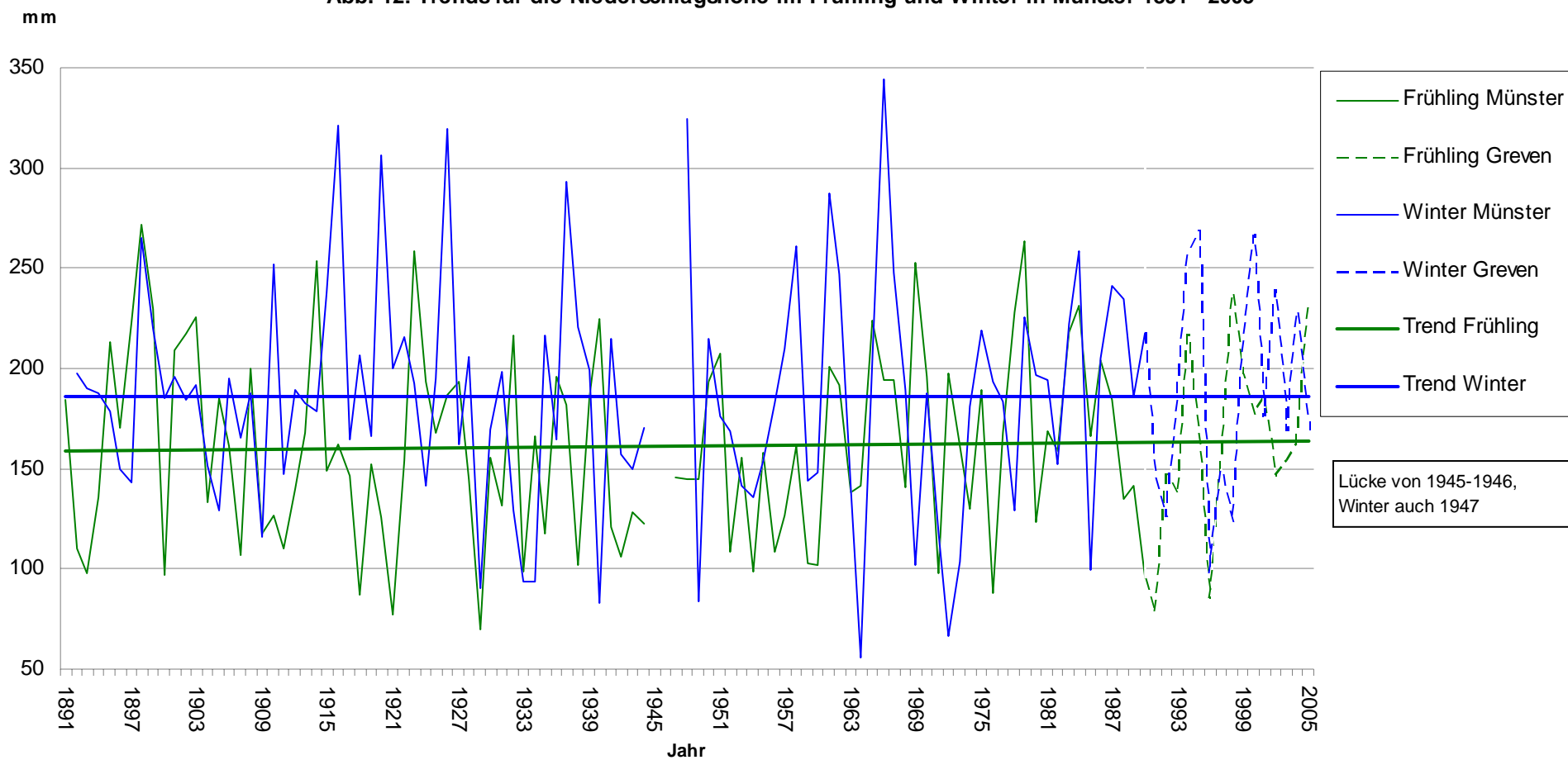


Abb. 13: Trends für die Niederschlagshöhe im Sommer und Herbst in Münster 1891 - 2005

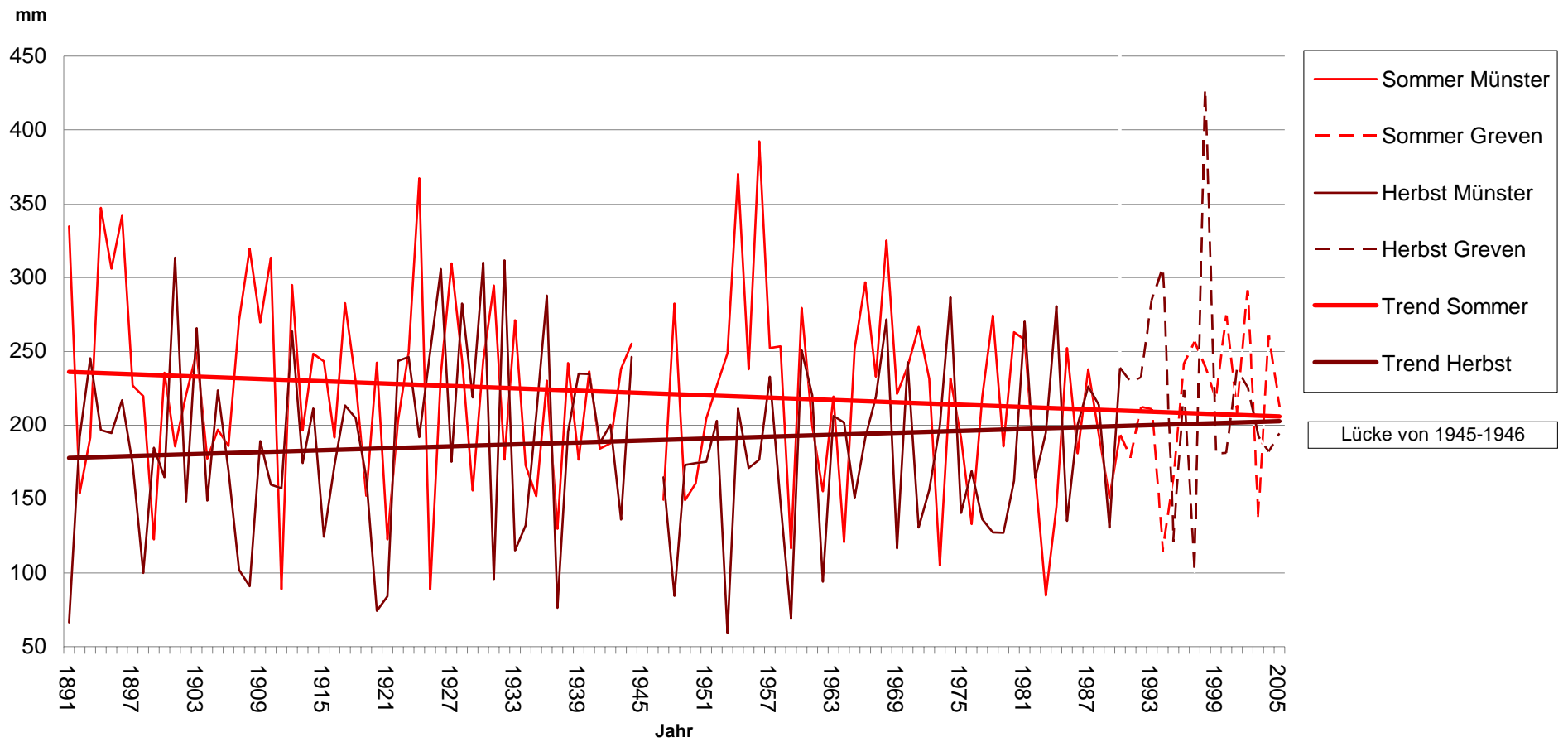


Abb. 14: Trend für die Jahresniederschlagshöhe in Münster 1951 - 2005

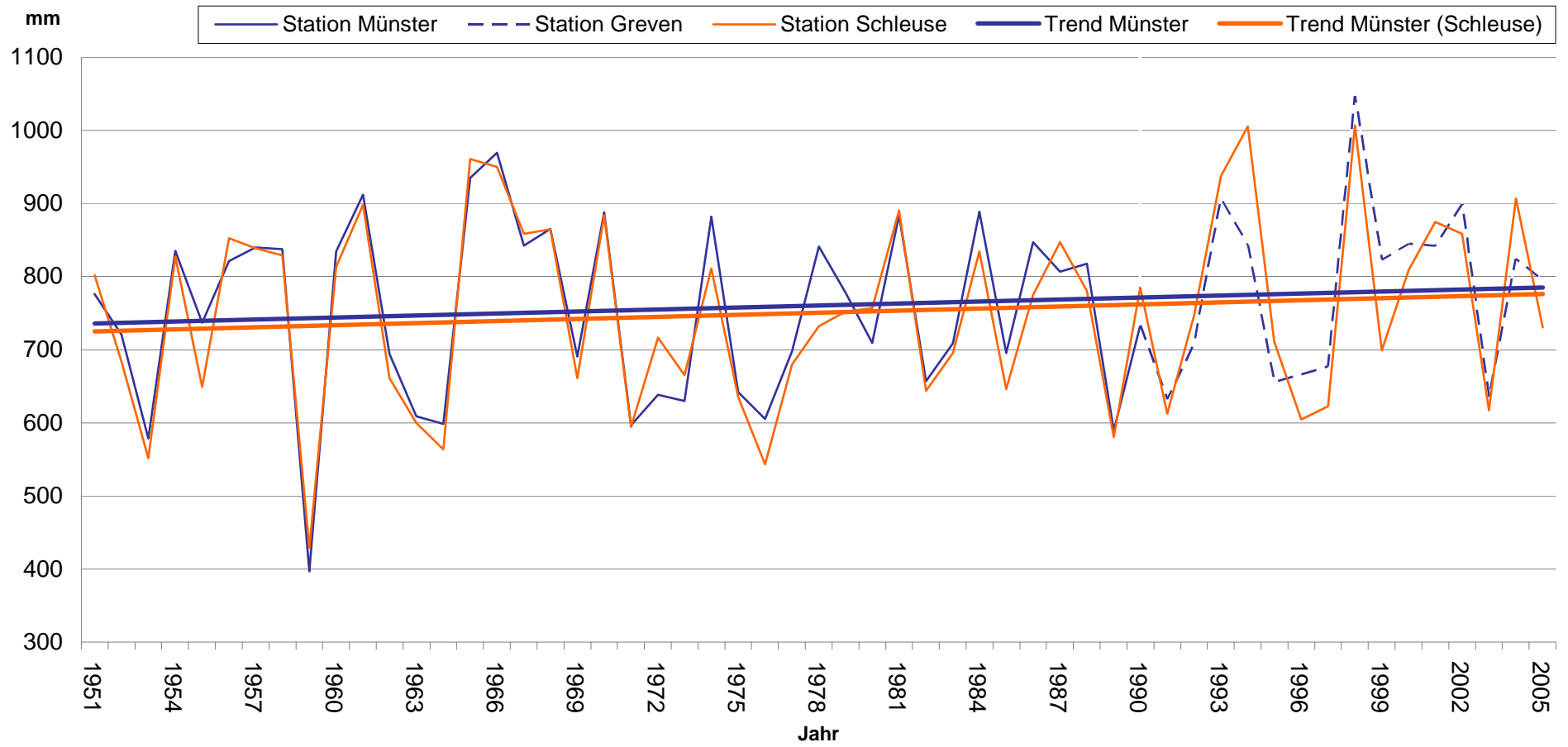


Abb. 15: Trend für die Jahresmitteltemperaturen in Münster 1948 - 2005

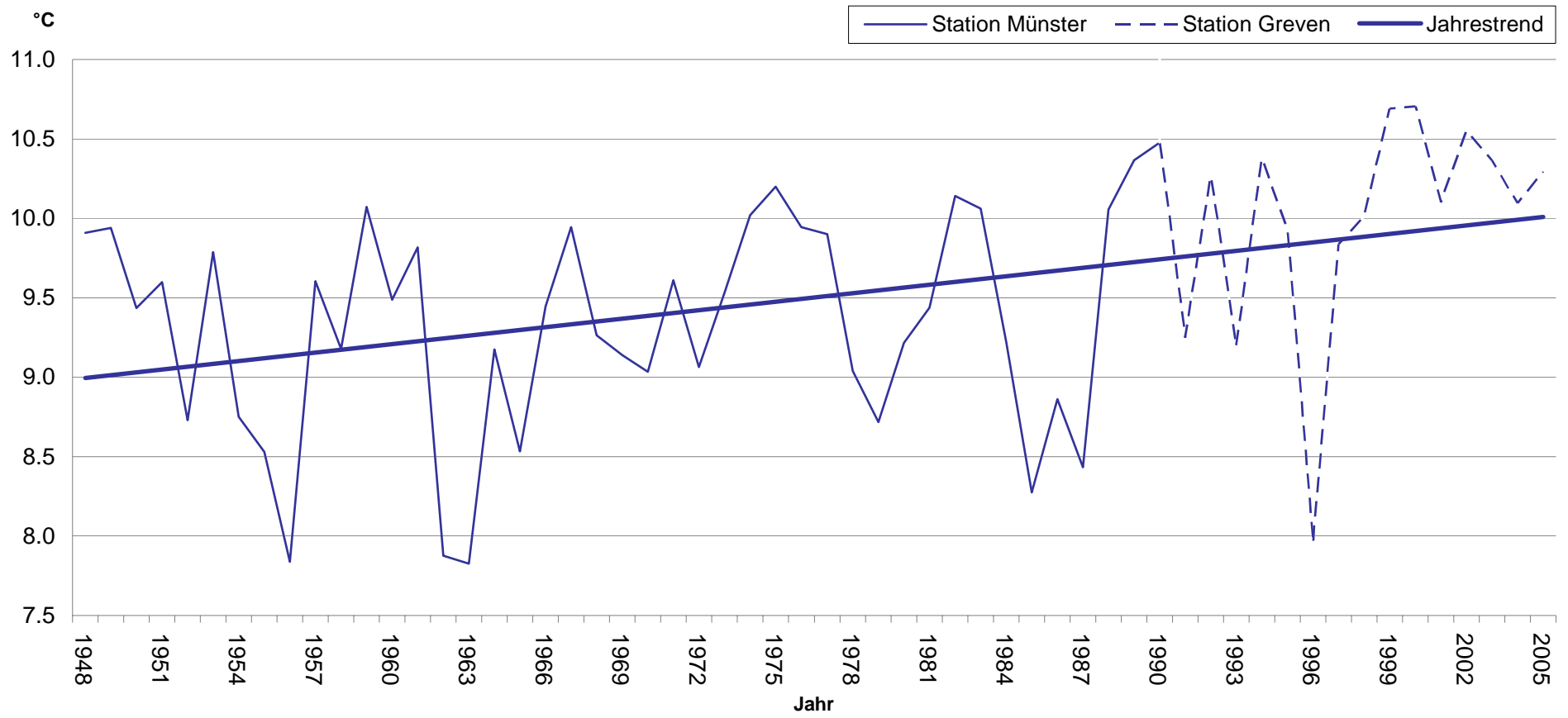


Abb. 16: Trends für die Eistage (Maximum < 0 °C) und die Heiße Tage (Maximum > 30 °C) in Münster 1948 - 2005

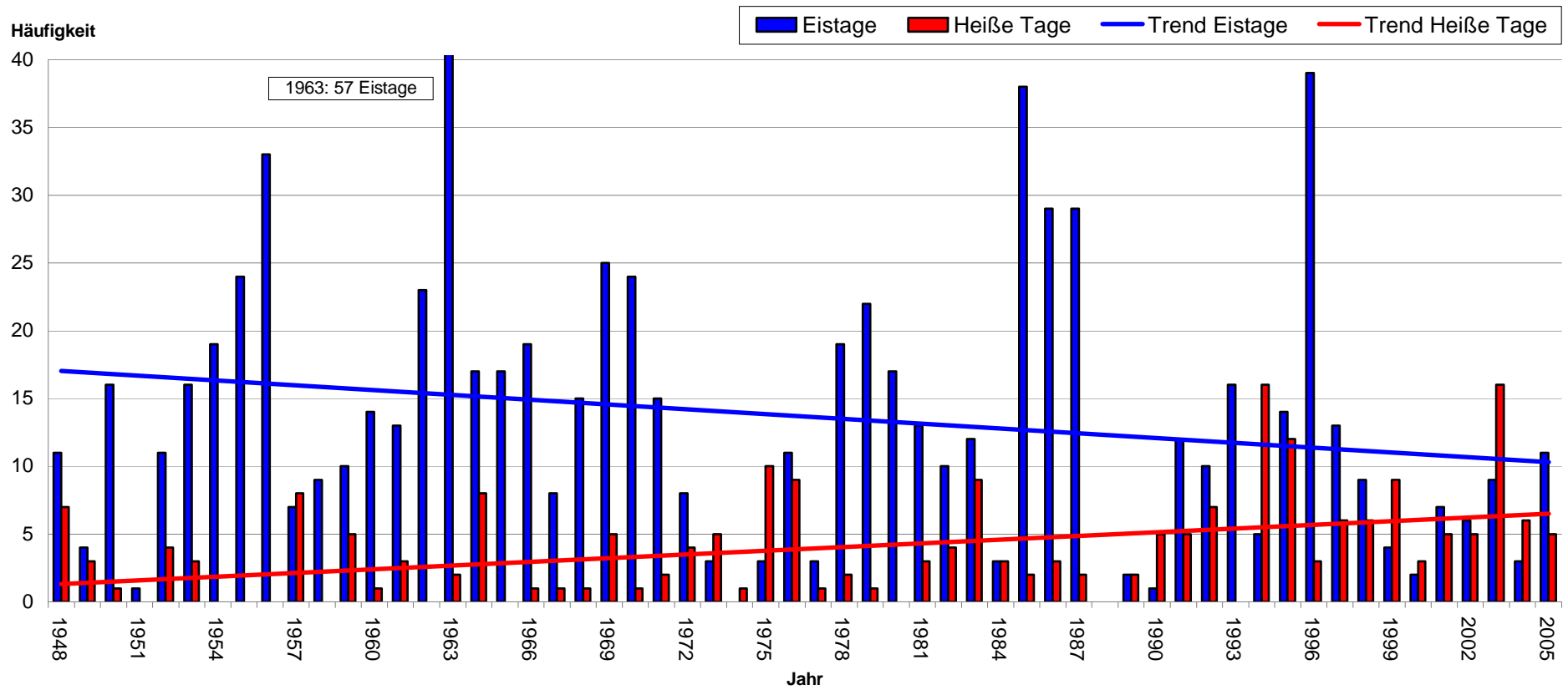


Abb. 17: Trends für die Mitteltemperaturen der Jahreszeiten in Münster 1949 - 2005

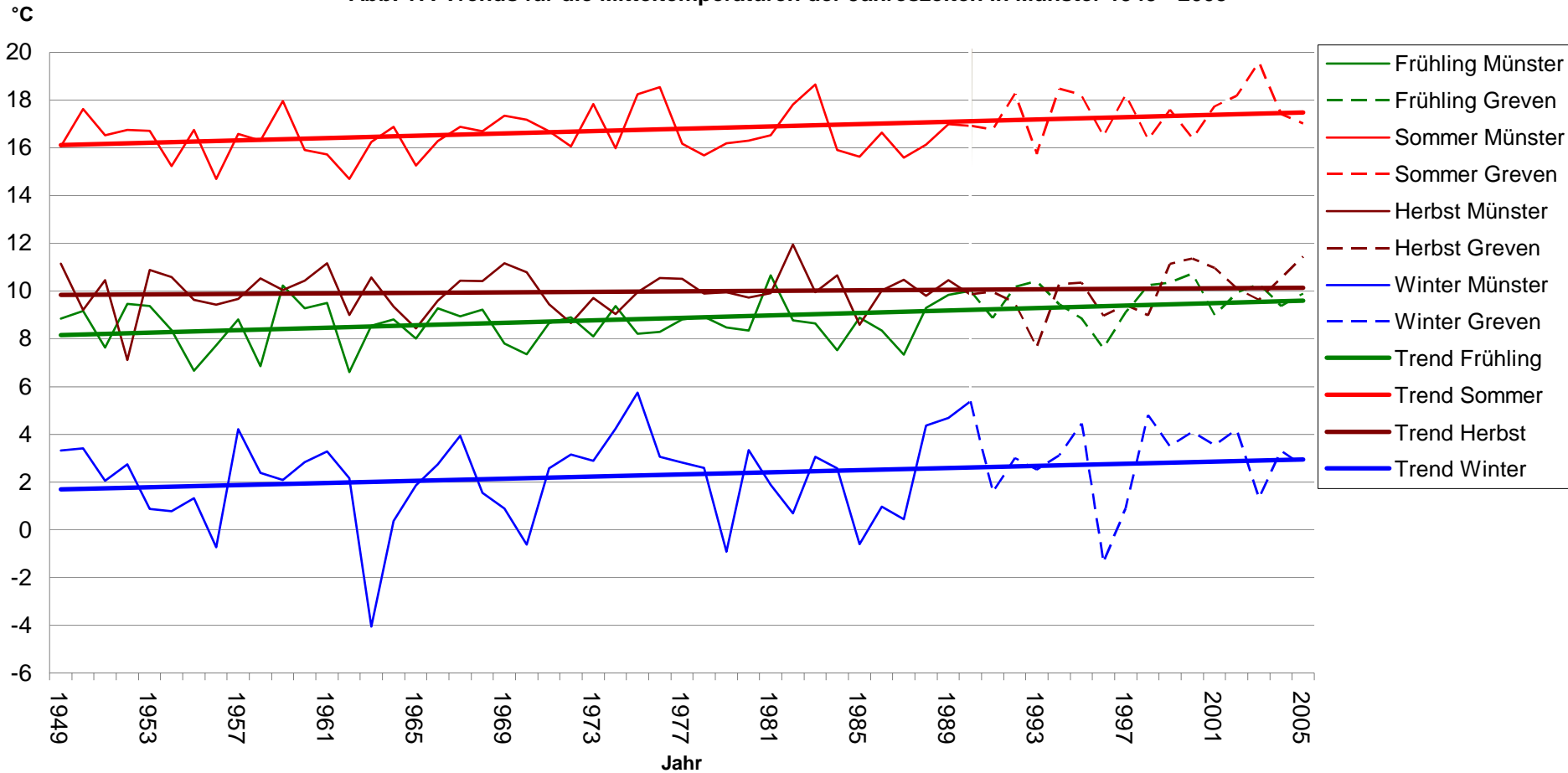


Abb. 18: Trend für die mittlere Sonnenscheindauer pro Jahr in Münster 1951 - 2005

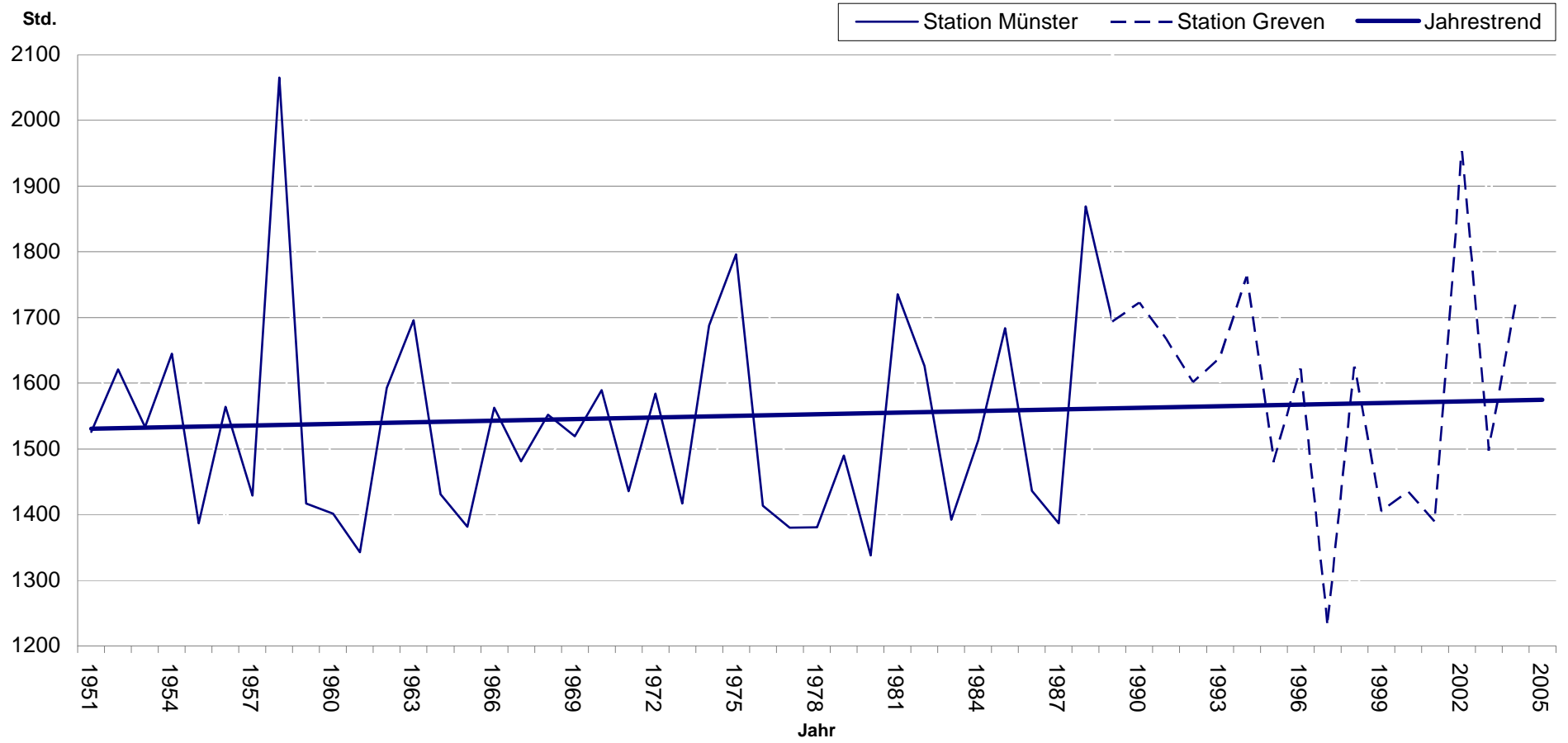


Abb. 19: Trends für die mittlere Sonnenscheindauer der Jahreszeiten in Münster 1952 - 2005

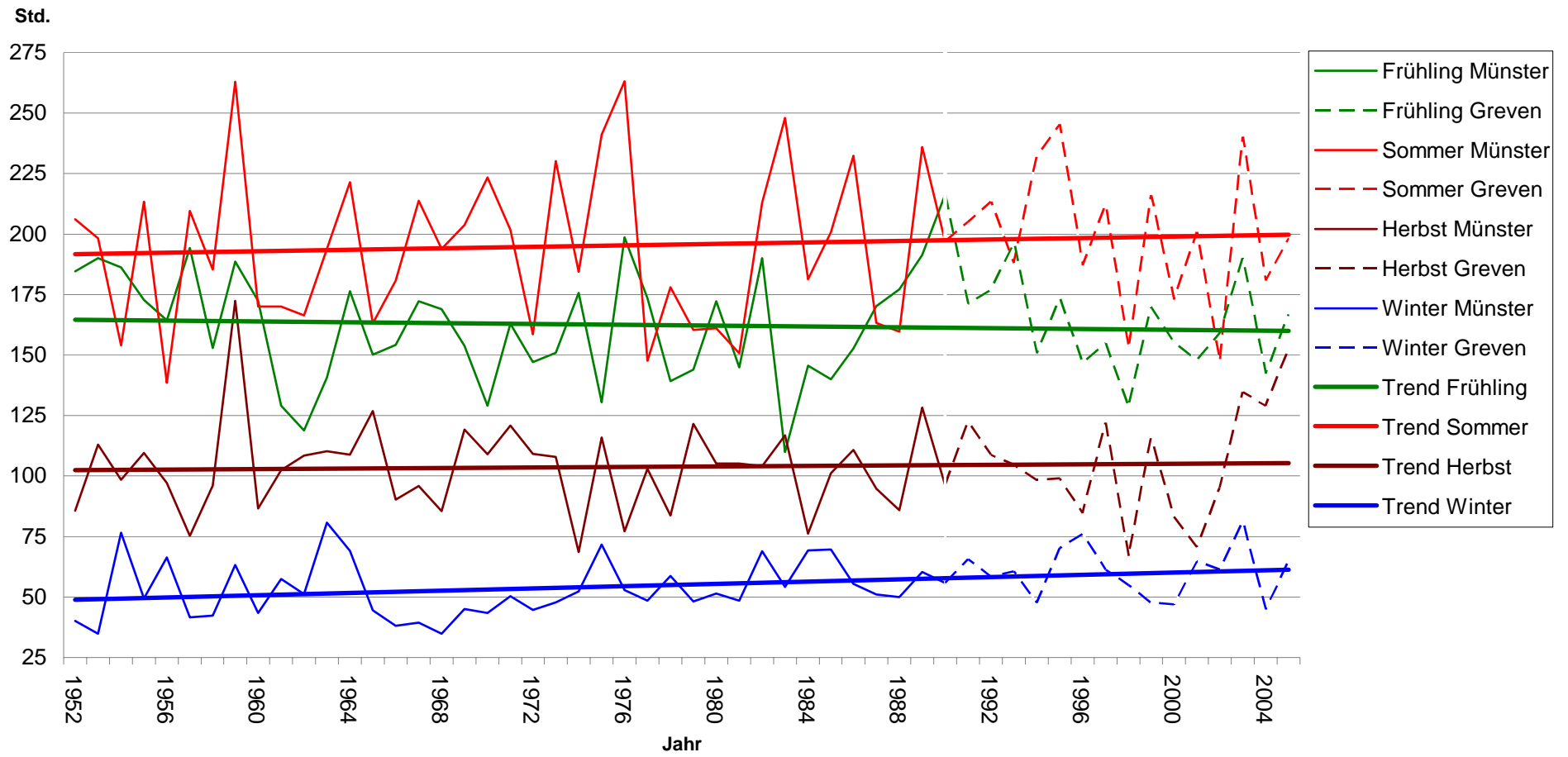


Abb. 20: Trend für die mittlere relative Feuchte pro Jahr in Münster 1948 - 2005

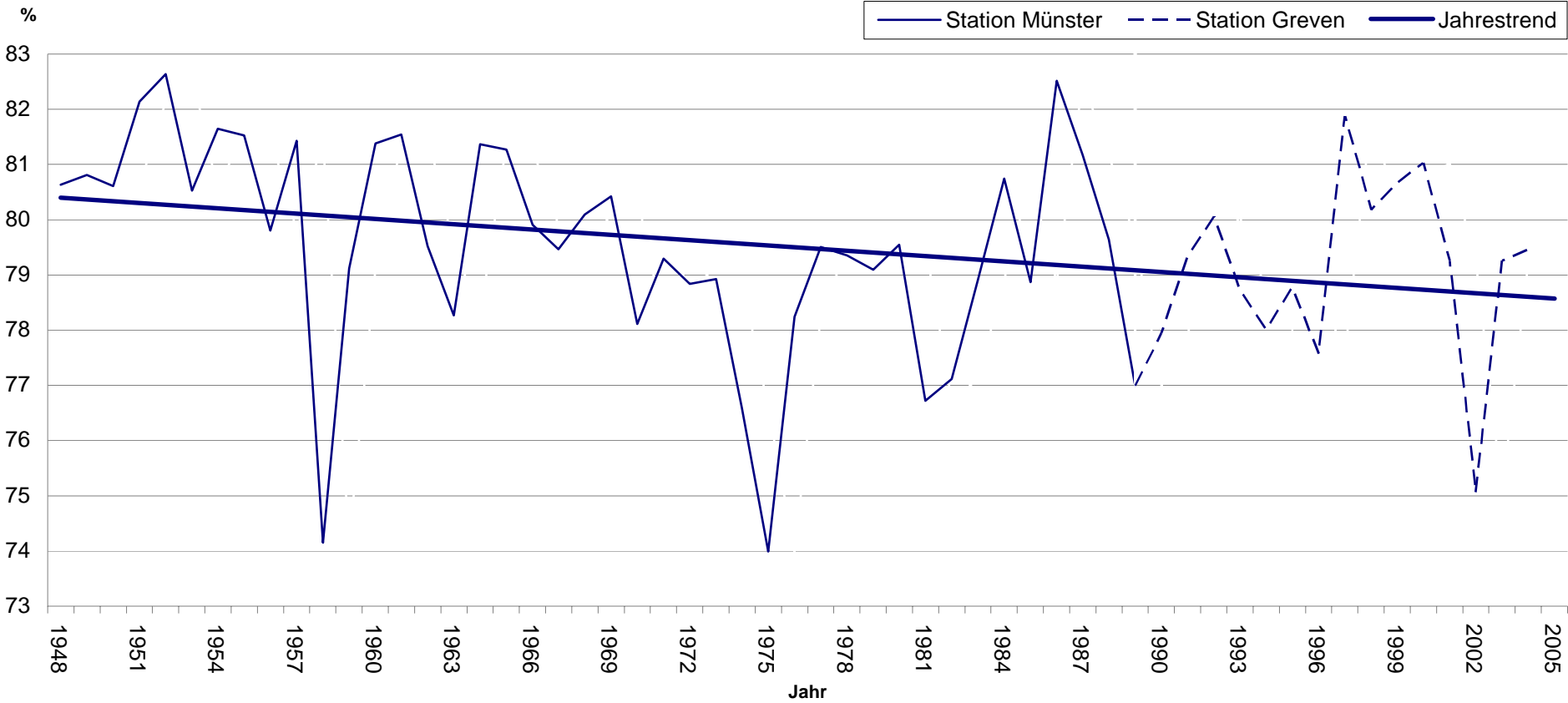


Abb. 21: Trends für die mittlere relative Feuchte der Jahreszeiten in Münster 1949 - 2005

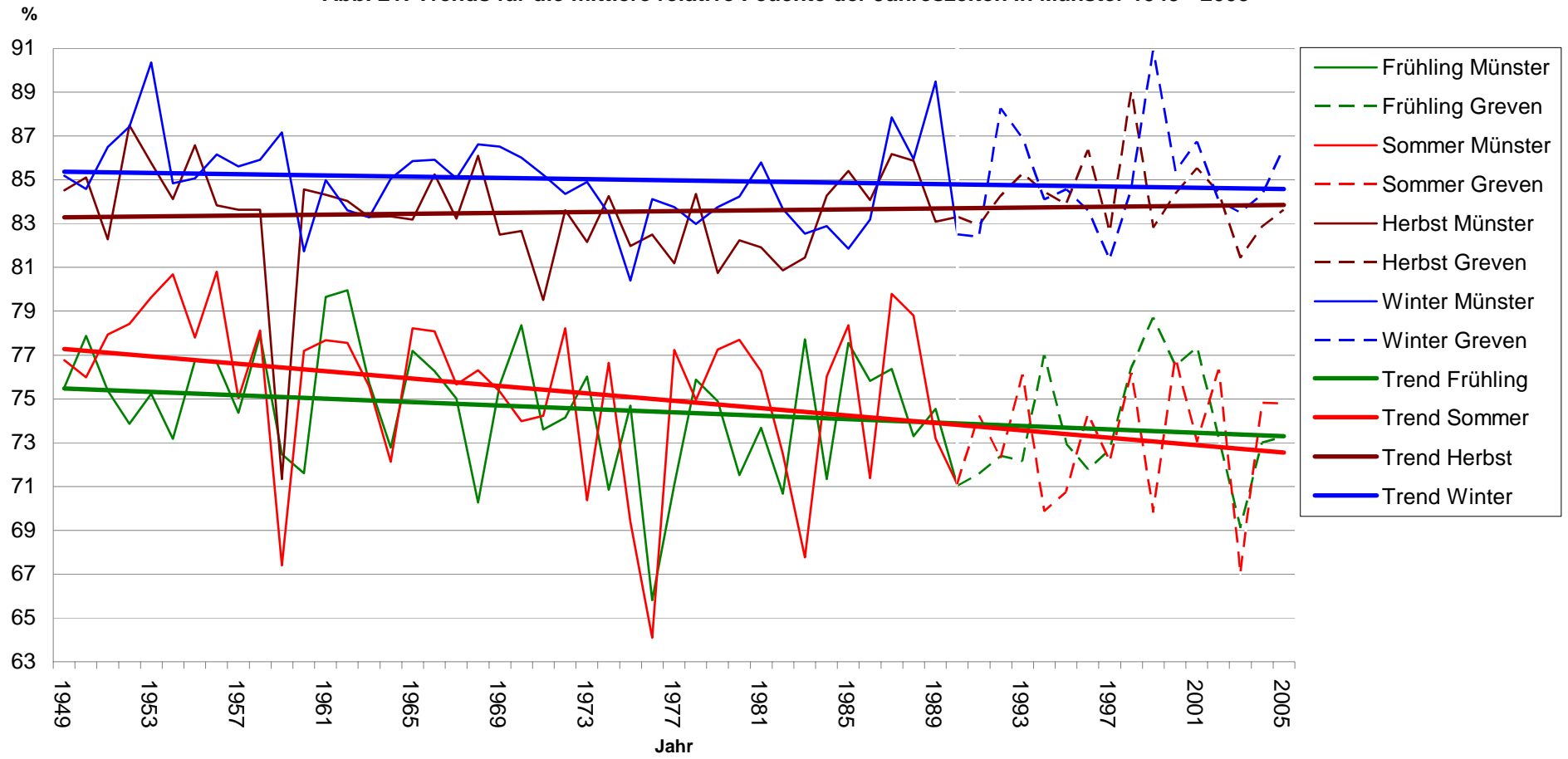


Abb. 22: Trend für die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in Greven 1982 - 2005

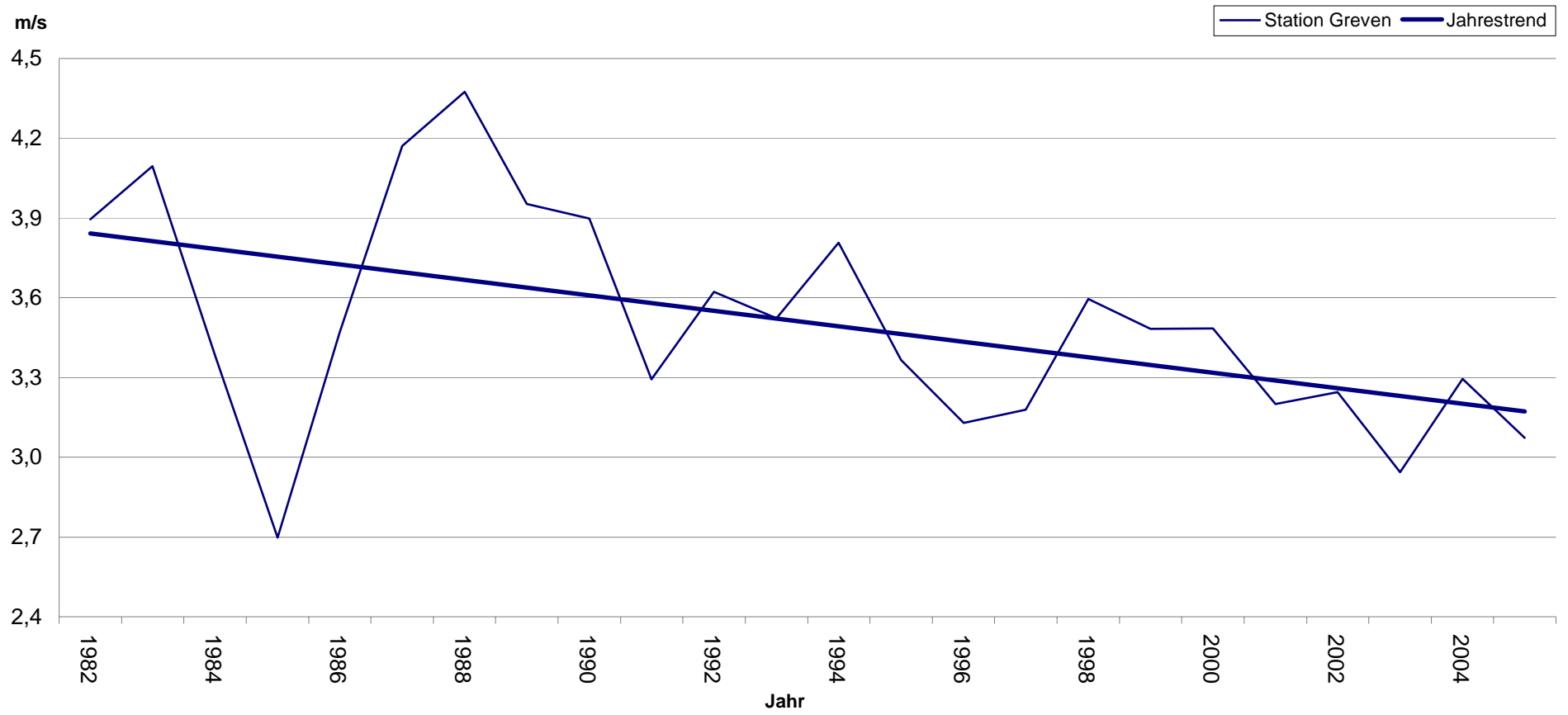


Abb. 23: Trends für die Windgeschwindigkeit der Jahreszeiten in Greven 1983 - 2005

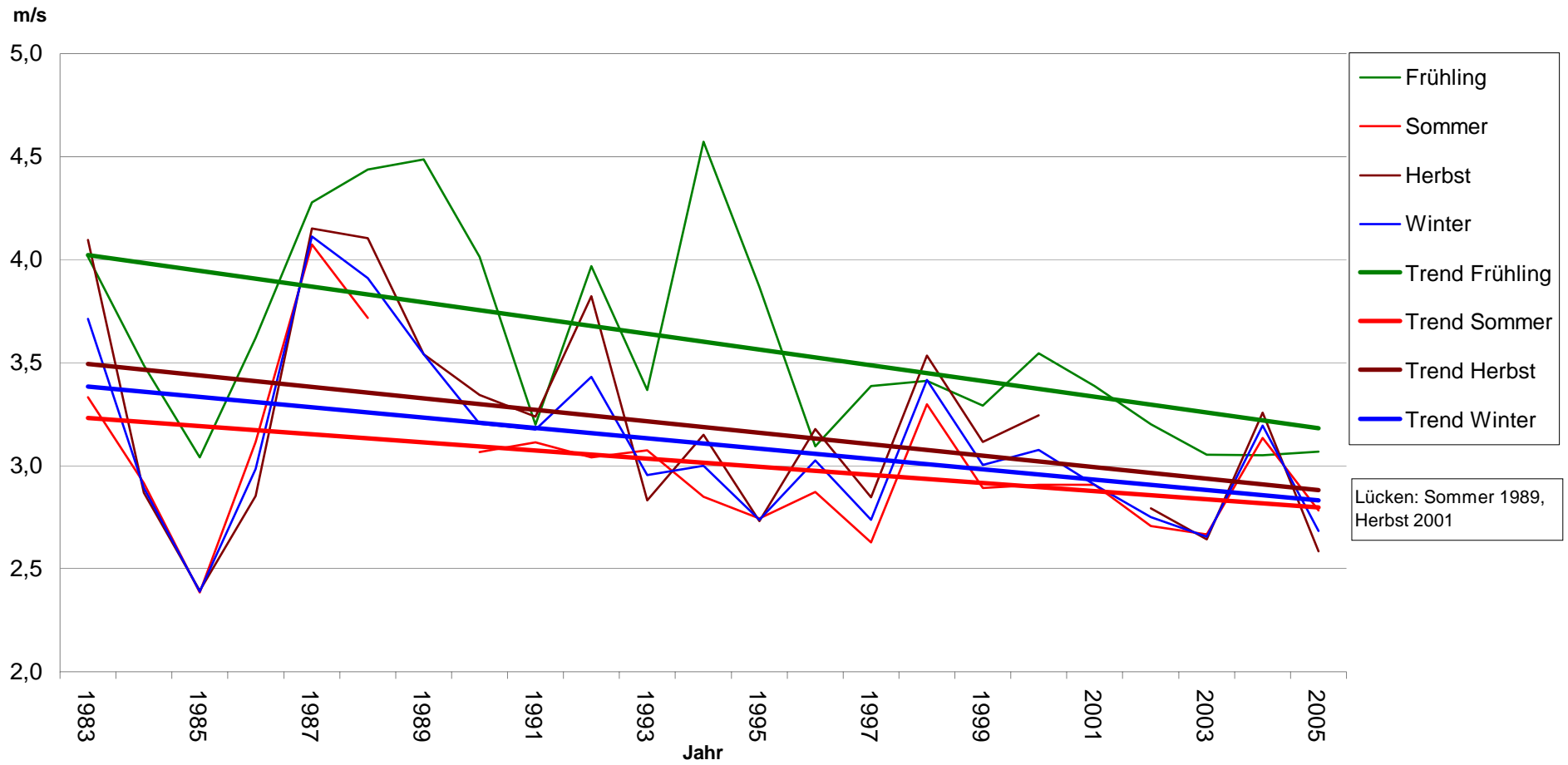
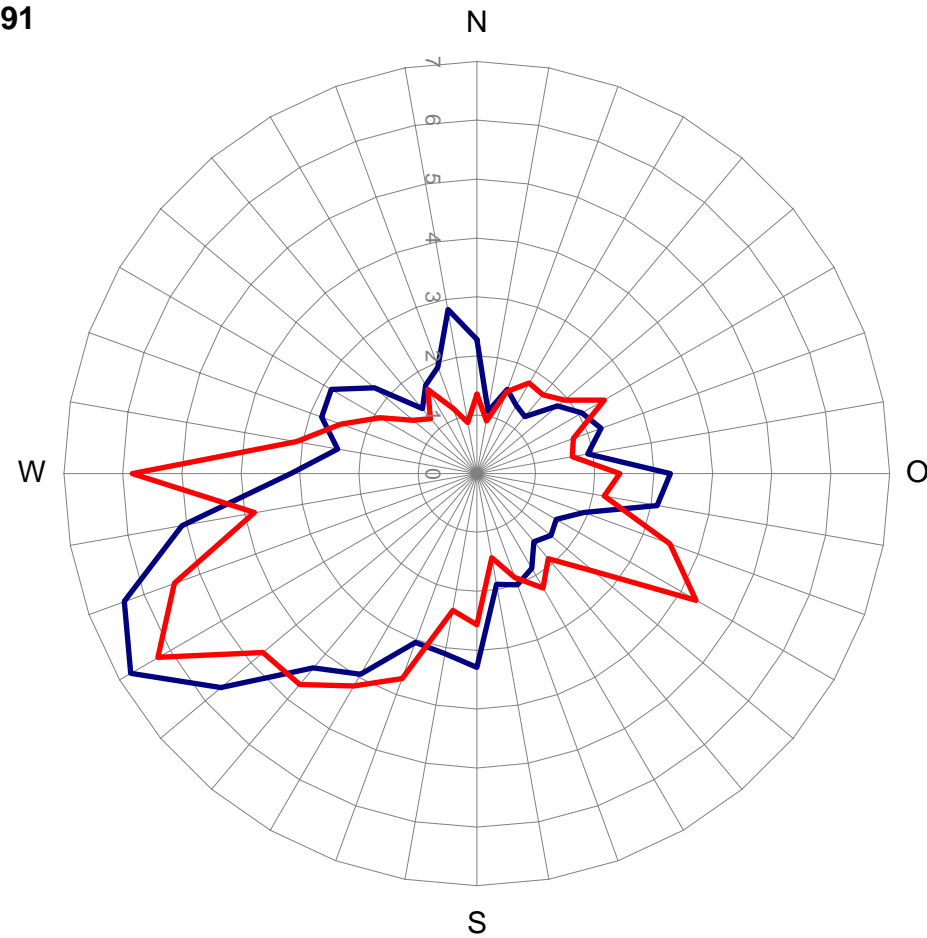


Abb. 25: Häufigkeit der Winde nach Windrichtungen in % für die Stationen Münster und Greven 1982 - 1991

Münster 1982-1991:
 Windstille: 1,83 %
 umlaufender Wind: 1,95 %
 Messfehler: 0,85 %

Greven 1982-1991:
 Windstille: 0,93 %
 umlaufender Wind: 1,32 %
 Messfehler: 0,64 %

— Station Münster
 — Station Greven



Literaturverzeichnis

- BAHRENBERG, Gerhard, Ernst GIESE und Josef NIPPER (1999):
Statistische Methoden in der Geographie 1. 4., überarbeitete Auflage.
Stuttgart. Leipzig.
- BERNER, Ulrich und Hansjörg STREIF (Hrsg.; 2004): Klimafakten. Der
Rückblick – Ein Schlüssel für die Zukunft. Stuttgart.
- GILBERT, Richard. O. (1987): Statistical Methods for Environmental
Pollution Monitoring. New York.
- HÄCKEL, Hans (1999): Meteorologie. 4. Auflage. Stuttgart.
- HOUGHTON, John T. et al. (Hrsg.; 2001): Climate Change 2001. The
Scientific Basis. Cambridge.
- KLEMM, Otto und Andreas MÜSKENS (2006): Wärmeinsel der Stadt
Münster im Rekordsommer 2003. – In: Geographische Rundschau. Bd.
58. Heft 2. S.57-64.
- LESER, Hartmut (Hrsg.; 2001): Wörterbuch Allgemeine Geographie. 12.
Auflage. München.
- MADANSKY, Albert (1988): Prescriptions for Working Statisticians. New
York.
- MAIER, Ute, Jörg KUDLINSKI und Gerhard MÜLLER-WESTERMEIER
(2003): Klimatologische Auswertung von Zeitreihen des Monatsmittels
der Lufttemperatur und der monatlichen Niederschlagshöhe im 20.
Jahrhundert. Offenbach. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd.
223).
- RAPP, Jörg (2000): Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer
Trendanalysen für Europa und Deutschland. Offenbach. (Berichte des
Deutschen Wetterdienstes, Bd. 212).
- SCHÖNWIESE, Christian-Dietrich (2000): Praktische Statistik für
Meteorologen und Geowissenschaftler. 3. Auflage. Berlin. Stuttgart.
- SCHÖNWIESE, Christian-Dietrich (2003): Klimatologie. 2., neu bearbeitete
und aktualisierte Auflage. Stuttgart.
- ZÖFEL, Peter (1992): Statistik in der Praxis. 3., überarbeitete und ergänzte
Auflage. Stuttgart. Jena.

Internetquellen:

DEUTSCHER WETTERDIENST [1]. Wetterlexikon. URL-Adresse:

www.dwd.de/de/SundL/Freizeit/Hobbymeteorologen/Wetterlexikon/index.htm (zuletzt abgerufen am 11.06.2006).

DEUTSCHER WETTERDIENST [2]. Bordwetterwarte FS Meteor. URL-Adresse:

www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Seeschiffahrt/Bordwetterwarten/bowewameteor102003.pdf (zuletzt abgerufen am 11.06.2006).

Dank

Ich danke Herrn Prof. Dr. Otto Klemm für die engagierte Betreuung und fachliche Beratung dieser Examensarbeit sehr herzlich.

Des Weiteren gebührt dieser Dank ebenfalls Herrn Dr. Thomas Wrzesinsky und Katrin Mildenberger, die mir bei den statistischen Auswertungen dieser Arbeit sehr geholfen haben.

Außerdem bedanke ich mich recht herzlich bei den Mitarbeitern des Deutschen Wetterdienstes, insbesondere Herrn Hans-Peter Aschoff und Herrn Gerhard Müller-Westermeier, die mir durch zahlreiche Informationen zu den vorliegenden Daten weitergeholfen haben.

Ein besonderer Dank geht an Michael Bücken, der mir geduldig alle Fragen zu den statistischen Tests beantwortet und mit zahlreichen Tipps zum Gelingen der Auswertung beigetragen hat.