Erstellung von Grafiken aus historischen Daten der Temperaturabweichungen von Stuttgart und Schwerin

Semesterarbeit

Modul Grundlagen der Umweltchemie (GUC)

Master Chemie / Wirtschaftschemie

Wintersemester 2020/21

Unter der Leitung von

Prof. Dr. Michael Schmitt

Vorgelegt von

Michelle Rademacher (2486910)

Isabell Theves (2505558)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis II
Tabellenverzeichnis III
1 Motivation: Wie messen wir Temperaturen? 1
1.1 Aufgabenstellung und Auswahl des Standortes 2
1.2 Korrelation der Temperatur mit dem Spurengas CO_2 2
2 Methodik zur Analyse von Temperaturdaten 6
2.1 Datenerhebung 6
2.1.1 Qualitätsniveau der Daten 7
2.2 Mittelung der Temperaturdaten von Messstationen 9
2.3 Erste Temperaturdaten von Stuttgart und Schwerin 9
3 Interpretation von Temperaturdaten 14
3.1 Aktueller Stand der Literatur (nach Hansen und Sato) 15
3.1 Temperaturabweichungen von Stuttgart 16
3.2 Temperaturabweichungen von Schwerin 25
3.3 Vergleich der Temperaturabweichungen der Städte Schwerin und Stuttgart 34
4 Diskussion 37
4.1 Nutzung von Temperaturdaten zur Analyse des Klimawandels? 37
4.2 Gibt es den anthropogenen Klimawandel wirklich? 38
4.3 „Der Klimawandel betrifft uns hier doch gar nicht…“ 39
4.4 Gibt es ein alternatives und besseres Verfahren für die Klimaanalyse? 41
5 Fazit und Ausblick 42
6 Literaturverzeichnis 44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anstieg des CO_2-Gehalts in ppm im Laufe der Jahre 1760 bis 2016, gefittet mit einer Exponentialfunktion 3

Abbildung 2: Schwankungen der Gase N_2O, CO_2 und CH_4 im Vergleich zu Deuteriumschwankungen in arktischem Eis..... 4

Abbildung 3: Wetterstationen der Stadt Stuttgart 6

Abbildung 4: Wetterstation der Stadt Schwerin..... 7

Abbildung 5: Gegenüberstellung der Temperatur im Jahresdurchschnitt in °C für die jeweilige Messstation in Stuttgart.....10

Abbildung 6: Über alle zugänglichen Messstationen in Stuttgart gemittelte Temperatur im Jahresdurchschnitt in °C 11

Abbildung 7: Temperaturanomalie in °C ausgehend von allen zugänglichen Messstationen in Stuttgart 12

Abbildung 8: Temperaturanomalie in °C ausgehend von der einzigen zugänglichen Messstation in Schwerin 12

Abbildung 9: Temperaturdaten für die Nord- und Südhemisphäre 15

Abbildung 10: Vergleich der Normalverteilung der Landtemperaturdaten der Basisjahre 1951 bis 1980 mit entsprechenden Temperaturen der Jahre 1987 bis 2019 für die Nordhemisphäre in Sommer- und Wintermonaten 16

Abbildung 11: Temperaturentwicklung der Stadt Stuttgart (Mittelung über Monate) mit exponentiellem Fit über die Temperaturentwicklung der Jahre 1900 bis 2019 17

Abbildung 12: Temperaturänderung im Laufe der Jahre der Stadt Stuttgart im Vergleich zum Referenzwert (Basisjahre 1951 bis 1980; Monatsmittel).....18

Abbildung 13: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien aller Monate eines Jahres der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980.....19

Abbildung 14: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperatur-anomalien aller Monate (Januar bis Dezember) der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980.....20

Abbildung 15: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 21

Abbildung 16: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperatur-anomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 22

Abbildung 17: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980.....23

Abbildung 18: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperatur-anomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 24

Abbildung 19: Temperaturentwicklung der Stadt Schwerin (Mittelung über Monate); exponentieller Fit über die Temperaturentwicklung der Jahre 1900 bis 2019 25

Abbildung 20: Temperaturänderung im Laufe der Jahre der Stadt Schwerin im Vergleich zum Referenzwert (Basisjahre 1951 bis 1980; Monatsmittel) 26

Abbildung 21: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien aller Monate eines Jahres der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 27

Abbildung 22: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperatur-anomalien aller Monate (Januar bis Dezember) der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 28

Abbildung 23: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 29

Abbildung 24: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperatur-anomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 30

Abbildung 25: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980 32

Abbildung 26: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperatur-anomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. 33

Abbildung 27: Vergleich der Temperaturabweichungen der Städte Schwerin und Stuttgart mit dem Basiswert von Stuttgart (Basisjahre 1951 bis 1980, Monatsmittel) 34

Abbildung 28: Vergleich der Temperaturabweichungen der Städte Schwerin und Stuttgart mit dem Basiswert von Schwerin (Basisjahre 1951 bis 1980, Monatsmittel) 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bedeutung des Qualitätsniveaus (QN) 8

1 Motivation: Wie messen wir Temperaturen?

Die Temperatur ist eine wichtige physikalische Größe und zählt zu den am häufigsten gemessenen Messgrößen.[1] Annähernd alle technisch relevanten Prozesse und Stoffeigenschaften sind temperaturabhängig. Daher besteht seitens der Wissenschaft und der Industrie ein großes Interesse an genauen und stabilen Temperaturmessverfahren und Messgeräten für eine Vielzahl verschiedener Messaufgaben. Im Rahmen dieses Moduls *„Grundlagen der Umweltchemie“* sind möglichst genaue und weit in die Vergangenheit betriebene Temperaturmessungen entscheidend. Aus diesen wird ein Vergleich mit gegenwärtigen Temperaturschwankungen und Zeiträumen der entsprechenden Schwankungen gezogen, um schließlich die (anthropogene) globale Erwärmung unserer Erde zu diskutieren.

Bereits im Mittelalter erkannten die Menschen, dass sie im Zusammenhang mit der Wärmelehre zwischen zwei verschiedenen Größen differenzieren müssen. Einerseits gibt es die *Wärmemenge* als Quantitätsgröße, welche die Menge der Energie beschreibt, die beispielsweise auf einen Körper übergegangen ist. Andererseits gibt es die Intensitätsgröße *Temperatur*, die den Wärmezustand eines Körpers beschreibt. Besitzen zwei Körper dieselbe Temperatur, so befinden sie sich im thermischen Gleichgewicht. Da das menschliche Wärmeempfinden jedoch subjektiv ist, wurde bereits in dieser Zeit nach objektiven Methoden zur Temperaturmessung geforscht. Dabei wurden Eigenschaften betrachtet, die sich mit der Temperatur ändern, wie beispielweise das Volumen von Gasen bzw. Flüssigkeiten, das Emissionsverhalten oder die Thermospannung.[2]

Oft wird heutzutage von einer *globalen Durchschnittstemperatur* gesprochen, die eine über die gesamte Erdoberfläche, d.h. Land und Wasser, gemittelte Temperatur in einem definierten Zeitraum ist. Die globale Durchschnittstemperatur liegt etwa bei 14 °C.[3] Für Deutschland liegt die Durchschnittstemperatur für die letzten Jahre bei 9,5 °C.[4] Die Abweichungen zu der globalen Durchschnittstemperatur werden häufig als „Temperaturanomalie“[4] bezeichnet.

Darüber hinaus wird in den Temperaturdatenbanken eine Abweichung (Global surface temperature anomalys, GSTA) von einer Mitteltemperatur angegeben und kein Absolutwert (GST) der Temperatur. Ein Grund hierfür ist u.a., dass Abweichungen einfacher zu messen sind als Absolutwerte, da Temperaturänderungen viel weiträumiger korreliert und damit besser geeignet sind. Daher ist die Kenntnis der exakten globalen Durchschnittstemperatur nicht notwendig, sondern -aufgrund höherer Genauigkeit- dessen Änderung.

Bei der Angabe von Temperaturänderungen ist es darüber hinaus sinnvoll zwischen Temperaturen an Land und am Wasser zu unterscheiden. In der vorindustriellen Zeit lagen die Abweichungen der mittleren Ozeantemperaturen innerhalb der Messungenauigkeiten der gemittelten Landtemperaturen. In den darauffolgenden Jahrzehnten zeichnet sich allerdings ein Trend ab, bei dem die Ozean- und Landtemperatur deutlich auseinanderlaufen, wobei letztere höher liegt.[5]

1.1 Aufgabenstellung und Auswahl des Standortes

Die Aufgabe dieser Semesterarbeit besteht darin, sich mit deutschen Temperaturdaten zu beschäftigen, diese zu verstehen, auszuwerten und in einer verständlichen Form graphisch aufzubereiten.

Im Rahmen dieser Semesterarbeit wurde zum einen die Stadt Stuttgart zur Analyse der Temperaturdaten ausgewählt. Stuttgart ist nicht nur die Landeshauptstadt von Baden-Württemberg, sondern auch die sechstgrößte Stadt Deutschlands. Der Raum Stuttgart wird neben dem in NRW zu einem der größten Ballungsräume in Deutschland gezählt. Damit zusammenhängend ist die Luftqualität in Stuttgart im Vergleich zu anderen deutschen Städten deutlich schlechter, da die Feinstaub- und Stickoxidwerte sehr hoch sind.[6] Außerdem herrscht in Stuttgart durch die Lage im breiten Stuttgarter Talkessel ein vergleichsweise warmes und zuweilen schwüles Klima.[7]

Während Stuttgart als ein eher negatives Klimabeispiel in Deutschland voran geht, wird zum anderen die Stadt Schwerin zur Analyse herangezogen. Schwerin ist die Landeshauptstadt von Mecklenburg-Vorpommern und die kleinste aller Landeshauptstädte in Deutschland. Innerhalb des Stadtgebietes befinden sich insgesamt zwölf Seen.[8] In den Medien wird Schwerin als eine der Städte mit dem besten Klima in Deutschland angepriesen.[9] Ob dieses besonders gute Klima ebenso in den Temperaturdaten analysiert und ausgewertet werden kann, wird im Folgenden aufgezeigt. Zuletzt werden die Auswertungen von Stuttgart und Schwerin miteinander verglichen und abschließend diskutiert.

1.2 Korrelation der Temperatur mit dem Spurengas CO_2

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte sind die Konzentrationen aller relevanten Spurengase, mit Ausnahme des stratosphärischen Ozons, um bis zu 50 % im Vergleich zur vorindustriellen Zeit angestiegen. Diese Spurengase tragen zum natürlichen Treibhauseffekt bei.[4] Das bekannteste und am stärksten diskutierte Spurengas ist Kohlenstoffdioxid (CO_2).

Kohlenstoffdioxid entsteht bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern, wie z.B. Kohle, Gas, oder durch das Lösen im Meerwasser.

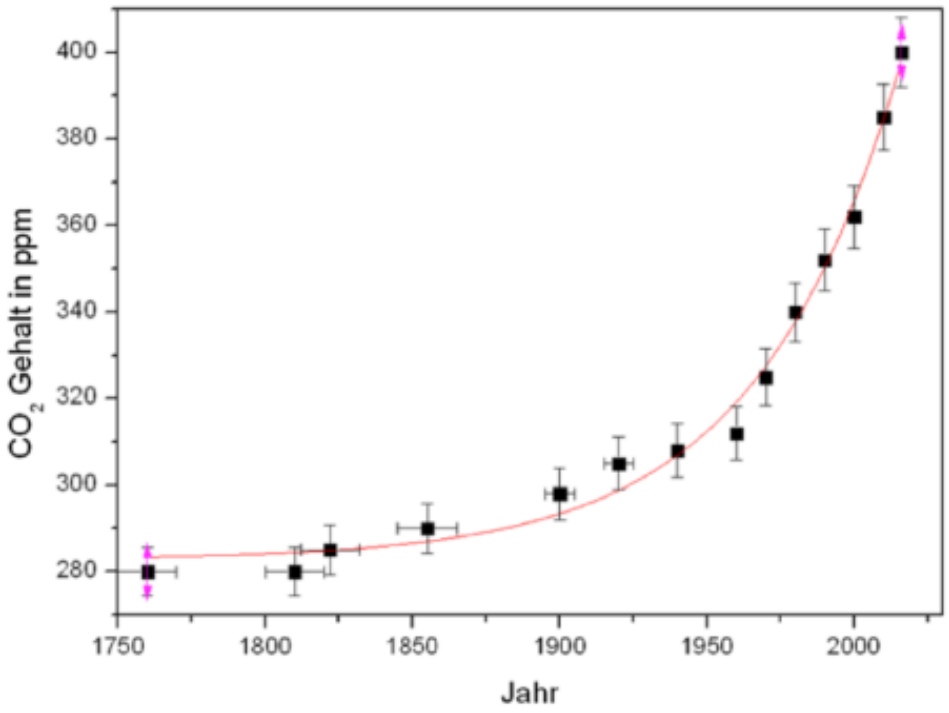

Abbildung 1: Anstieg des CO_2-Gehalts in ppm im Laufe der Jahre 1760 bis 2016, gefittet mit einer Exponentialfunktion. Entnommen aus Ref.[2]

Der in *Abbildung 1* ersichtliche exponentiell gefittete Anstieg ist besonders auf die Verbrennung von Erdgas oder Kohle zurückzuführen, aber auch Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüche oder Wildfeuer führen zum Anstieg des Kohlenstoffdioxid-Gehaltes. Aufgrund dieses Anstiegs wird der Kohleausstieg bis heute stark politisch diskutiert.[10]

Da der Anstieg der Spurenelemente merklich das Klima verändert, ist zu diskutieren, ob diese auch mit der Temperaturänderung korrelieren. Erstmalig stellte *Arrhenius* im Jahre 1896 die Theorie auf, dass bei einer Verdopplung des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre die Temperatur um ca. 5 °C ansteigt.[11] *Knut Ångström* untersuchte diese Behauptung. Fälschlicherweise ging er bei seinen Experimenten unter Laborbedingungen von einer Röhre als Nachbildung der Erdatmosphäre aus und fand heraus, dass die Absorptionsspektren von Wasserdampf und von Kohlenstoffdioxid nahezu identisch sind, sich überlagern und so die Wirkung der Absorption des Kohlenstoffs vernachlässigt werden kann. Dies führte *Ångström* zum Widerspruch der aufgestellten Theorie nach *Arrhenius*. Heute ist bekannt, dass die Erdatmosphäre nicht durch „diskrete Scheiben“ charakterisiert werden kann und, dass die Höhe des Meeresspiegels nicht mit der Höhe der Atmosphäre gleichgesetzt werden kann. Jahrzehnte später im Jahre 1931 wurden erneute Untersuchung durchgeführt und *Eward Olsen Hulbert* konnte die Theorie von *Arrhenius* bestätigen. Er bekräftigte, dass die Temperatur ca. um 4 °C bzw. Kelvin (K) bei einer Verdopplung des CO_2-Gehalts ansteigt.

Diese Aussage gilt bis heute, wie es zuletzt im *Charney Report* der *National Academy of Sciences* niedergeschrieben wurde.[12] Der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre ist relativ gesehen gering und beträgt aktuell ca. 400 ppm bzw. etwa 0,04 %.[11] Diese 0,04 % haben jedoch starke Auswirkungen auf die Atmosphäre, da Kohlenstoffdioxid bis zu 26 % zum Treibhauseffekt beitragen kann. Bis zum Jahr 1990 ist der CO_2-Gehalt auf 300 ppm gestiegen, was einen Temperaturanstieg von 0,83 °C (K) zur Folge hatte. Würde der Kohlenstoffdioxid-Gehalt auf 660 ppm steigen, würde dies einen Temperaturanstieg von 5,6 °C (K) zur Folge haben.[13]

Abgesehen von Quellen des CO_2 gibt es Senken, die den CO_2-Gehalt auf natürliche Weise vermindern. Neben dem Lösen in Meerwasser und der Biomasse-Aufforstung, zählen auch die Verwitterung zu den genannten Senken für das CO_2. Diese sorgen dafür, dass die aktuellen CO_2-Emissionen von 2 % auf 0,25 % reduziert werden. Sofern die Senken funktionieren, kann der Kohlenstoffdioxid reduziert werden, jedoch sollte der exponentielle Trend in Zukunft dringend verlassen werden.

Der exponentielle Anstieg der Temperatur lässt sich ebenso in der CO_2-Konzentration verzeichnen (siehe *Abbildung 1*).

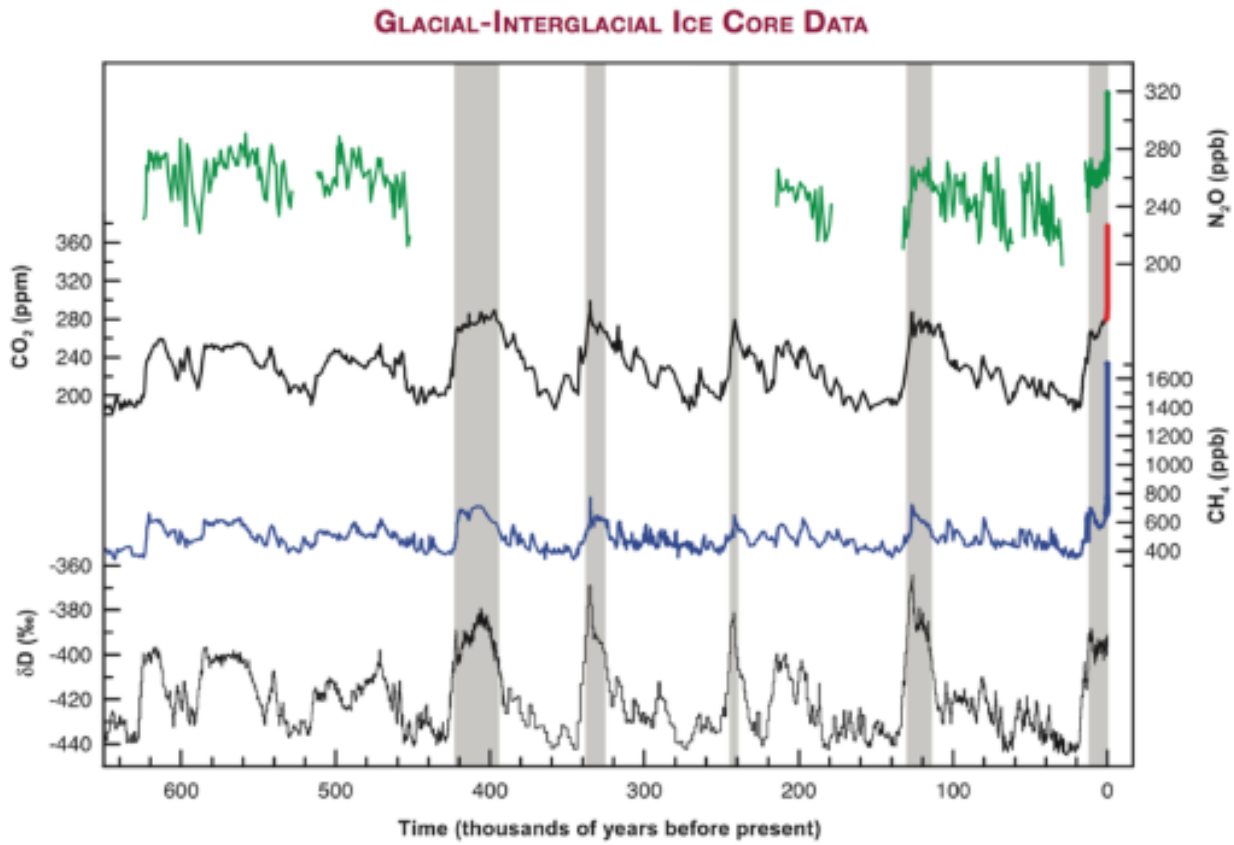

Abbildung 2: Schwankungen der Gase N_2O, CO_2 und CH_4 im Vergleich zu Deuteriumschwankungen in arktischem Eis (δD). Der Beobachtungszeitraum erstreckt sich über die letzten 700.000 Jahre. Entnommen aus Ref.[14]

In ähnlicher Weise wie die Temperatur, scheint auch der CO_2-Gehalt mit einer sehr schnellen Geschwindigkeit und unvergleichbar in der geologischen Geschichte der Erde zu steigen. Es liegt also nahe, dass zwischen dem Temperatur- und dem CO_2-Anstieg eine Korrelation besteht. Diese ist natürlich, jedoch war in der Vergangenheit die Temperatur der Grund für die CO_2-Zunahme, da mit steigender Temperatur CO_2 dominant aus den Meeren ausgegast ist. Nun scheint die Temperatur dem CO_2-Anstieg zu folgen.

Zu diskutieren gilt es, dass Kohlenstoffdioxid zwar einerseits das Klima aufwärmen kann, jedoch sollte beachtet werden, dass andererseits diese gebildete Wärme weitgehend wieder an den Makrokosmus abgegeben wird. Der Trend des Anstieges von Temperatur und von Kohlenstoffdioxid soll zeigen, dass diese beiden Größen direkt miteinander korrelieren. Aufgrund dessen, sollte nicht nur die Temperatur, sondern auch der CO_2-Gehalt beobachtet werden.

Zur Senkung des CO_2-Gehaltes werden stets neue Abkommen beschlossen, die z.B. die Abgase der LKW-Fahrer über die Maut regulieren.[15]

2 Methodik zur Analyse von Temperaturdaten

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die aktuellen Umstände und die Wahl der Standorte motiviert wurden, wird nun mit einer grundlegenden Datenaufbereitung und Analyse der Temperaturdaten begonnen.

2.1 Datenerhebung

Zur Erhebung der Daten wurden die Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Diese Daten beinhalten eine große Zeitspanne und eine Vielzahl von Messdaten und Messstationen deutschlandweit.

Innerhalb dieser Datensätze sind u.a. pro Messstation einer Stadt die Temperaturdaten gemittelt für einen Monat dokumentiert. Neben den Temperaturdaten sind ebenso Genauigkeiten angegeben, die für die Analyse ein wichtiger Parameter sind. Zu beachten ist, dass durch die Lage der Messstation unterschiedliche Temperaturdaten resultieren können. So ermittelt eine Messstation innerhalb der Stadt andere Temperaturen als am Rand der Stadt oder auf dem Land. Um diesen Fehler so gering wie möglich zu halten, sollte für eine Analyse der Temperaturdaten einer Stadt eine Vielzahl von Messstationen vorhanden sein.

Die Stadt Stuttgart besitzt fünf Wetterstationen (siehe *Abbildung 3*; exemplarisch zwei der fünf Stationen dargestellt). Aufgrund der Vielzahl der Wetterstationen lässt sich ein breiteres Temperaturfeld abdecken und die Messungenauigkeiten der einzelnen Stationen können durch Mittelung minimiert werden.

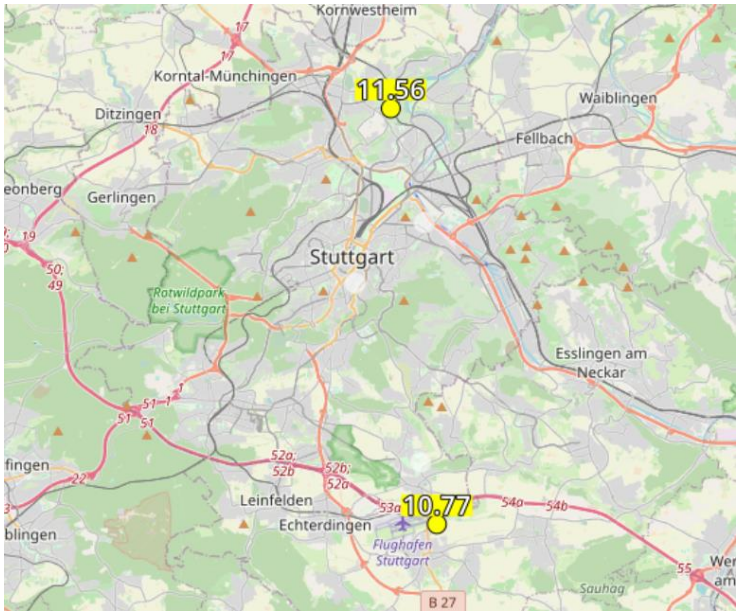

Abbildung 3: Wetterstationen der Stadt Stuttgart. 11.56 ist die Station 04928 – Stuttgart (Schnarrenberg) und 10.77 ist die Station 04931 – Stuttgart-Echterdingen. Bild über Ref.[16]

Die Stadt Schwerin besitzt lediglich eine Wetterstation (siehe *Abbildung 4*), so dass die erhobenen Temperaturdaten und Analysen weniger belastbar sind. Ebenso würde die Lage der Wetterstation in der Nähe des Seegebietes zu Ungenauigkeiten führen, da es hierdurch zu Abweichungen der realen Landtemperatur kommen könnte.

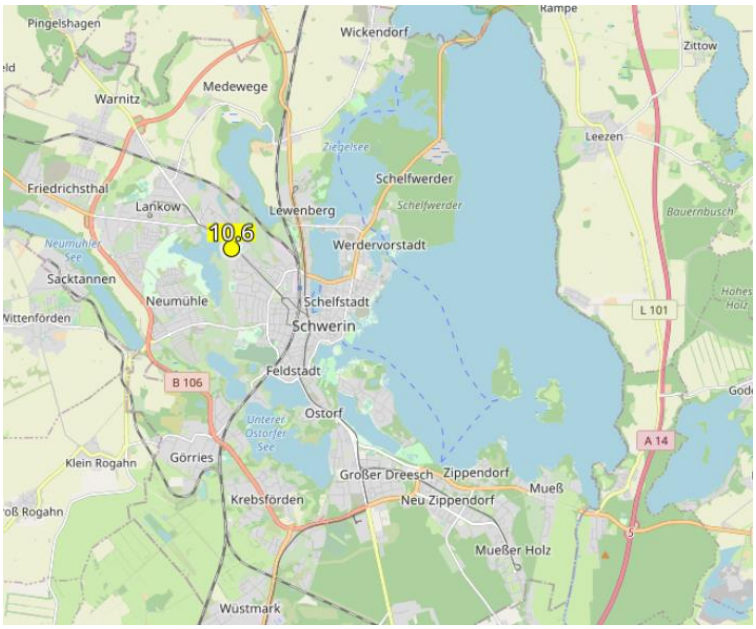

Abbildung 4: Wetterstation der Stadt Schwerin. Bild über Ref.[17]

Die Lage der Wetterstationen ist ein wichtiger zu berücksichtigender Parameter bei der Analyse von Temperaturdaten. Der direkte Zugang zu Seen, Flüssen und Meeren kann eine Senke bzgl. der Temperatur und ebenso der CO_2-Konzentration sein (siehe Kapitel 1.2).

2.1.1 Qualitätsniveau der Daten

Die Temperaturdaten der deutschen Wetterstation sind in verschiedene Qualitätsniveaus, den sogenannten QN-Werten, gegliedert. Dieses Qualitätsniveau ist ein Maß für das Verfahren der Qualitätsprüfung. Der QN-Wert kann verschiedene Werte annehmen (siehe *Tabelle 1*).

Tabelle 1: Bedeutung des Qualitätsniveaus (QN). Zusammengestellt aus Ref.[18]

Qualitätsniveau (QN)	Bedeutung
1	Nur formale Prüfung
2	Nach individuellen Kriterien geprüft
3	Automatische Prüfung und Korrektur
5	Historische, subjektive Verfahren
7	Geprüft, gepflegt, nicht korrigiert
8	Qualitätssicherung außerhalb Routine
9	Nicht alle Parameter korrigiert
10	Qualitätsprüfung und Korrektur beendet

Mithilfe der Qualitätsniveaus kann mittels verschiedener Prüfverfahren die Zuverlässigkeit der Daten eingestuft werden. Durch diese Angabe können die Analysen im Folgeverfahren auf ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit geprüft werden.

Die gegebenen Daten des Deutschen Wetterdienstes beinhalten verschiedene Temperaturdaten. Neben der Messung der Temperatur in verschiedenen Höhenmeter, beinhalten die Datensätze ebenso Angaben über die Luftfeuchte und die Windstärke.

Zur Analyse der folgenden Temperaturentwicklungen wurde der *MO_TT* Datensatz aller Stationen ausgewählt. Dieses Datenkollektiv beinhaltet das Monatsmittel der Lufttemperatur in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden. Dies entspricht neben einer Genauigkeit von 0,1 K den internationalen Normen zur Messung der Lufttemperatur. Bei der Temperaturmessung ist zudem zu beachten, dass der Messfühler des Thermometers im thermischen Gleichgewicht mit der umgebenden Luft steht.[19]

Diese Temperaturbestimmung gilt für unsere Betrachtungen als die sinnvollste und wird daher im Folgenden verwendet.

2.2 Mittelung der Temperaturdaten von Messstationen

Um die Genauigkeit der Temperaturdaten auf die gesamte Stadt zu verbessern, werden die Temperaturdaten einer Vielzahl von Messstationen verwendet.

Hierfür werden die Daten aller Stationen gelistet und jeweils die Mittelwerte für den Monat eines Jahres gebildet. Dieser Vorgang wird für jeden gelisteten Monat eines Jahres durchgeführt. In einem zweiten Schritt werden darauffolgend die Mittelwerte eines Jahres aus den gebildeten Mittelwerten der Monate aller Stationen gebildet.

Je höher die Anzahl der Messstationsdaten, desto höher ist die Zuverlässigkeit und die Streuung der einzelnen Werte kann minimiert werden.

2.3 Erste Temperaturdaten von Stuttgart und Schwerin

Mit dem Wissen über die Art und Qualität der Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes können nun erste Grafiken zu den Temperaturverläufen beider Städte erstellt und analysiert werden. Alle nachfolgenden Grafiken dieser Semesterarbeit wurden mit dem Analyse- und Darstellungsprogramm *Origin 2020* selbst erstellt.

Hierbei wird mit der Analyse des Standortes Stuttgart begonnen. Für die Stadt Stuttgart konnten im Zeitraum von 1792 bis 2019 für insgesamt 5 Messstationen überwiegend durchgängige Temperaturdaten aufgezeichnet werden. (s. *Abbildung 5*).

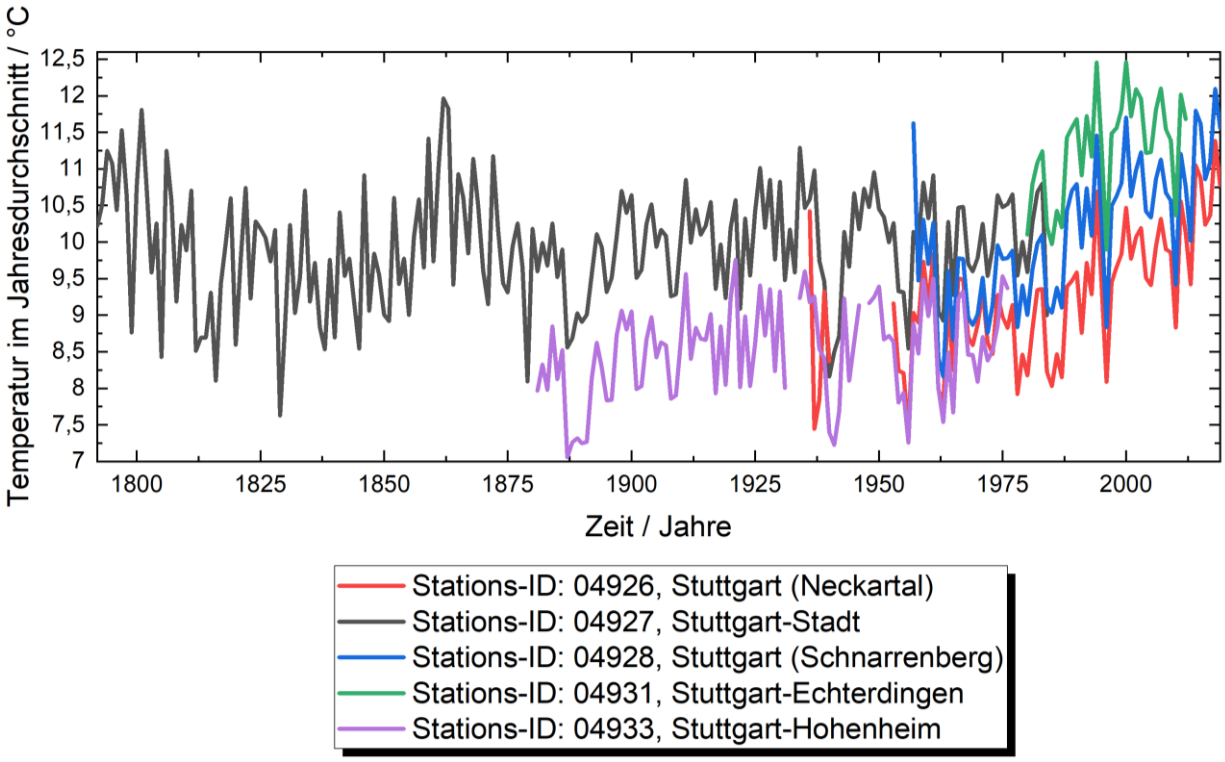

Abbildung 5: Gegenüberstellung der Temperatur im Jahresdurchschnitt in °C für die jeweilige Messstation in Stuttgart. Hierbei wurden vom Deutschen Wetterdienst Daten im Zeitraum von 1792 bis 2019 erhoben und bisher veröffentlicht.

Mithilfe der Gegenüberstellung in *Abbildung 5* wird einerseits die Schwankung der jahresmittleren Temperatur und andererseits die Diskrepanz der aufgezeichneten Temperaturen deutlich. Um möglichst der „wahren Temperatur“ von Stuttgart im Jahresmittel nahe zu kommen, wurde daher der beste Mittelwert für jedes Jahr aus den zur Verfügung stehenden Messstationen gebildet. So gibt es beispielweise Jahre mit dem Temperaturmittel aus vier Stationen, andere jedoch nur mit dem Temperaturmittel aus zwei Stationen.

Für weitere Betrachtungen, welche eine zentrale Rolle im Kapitel 3 spielen werden, wird ein sogenannter Referenzzeitraum benötigt. Grund hierfür ist es, dass die (globalen) Temperaturänderungen üblicherweise relativ zu den Basisjahren im Referenzzeitraum angegeben werden. Darunter sind die Jahre 1951 bis 1980 gefasst, da sich die globale Temperatur in diesem Zeitraum nur wenig geändert hat und sie daher für die Bildung einer Durchschnittstemperatur gut dienen. Eine weitere Definition der Nulllinie kann anhand der Jahre 1850 bis 1900 erfolgen. Die Wahl der Basisjahre hat keinen direkten Einfluss auf die zu betrachteten Temperaturabweichungen, jedoch kann der gegenwärtige Temperaturzuwachs bezüglich einer (fast) vorindustriellen Temperatur durch eine gute Wahl der Basisjahre besser abgeschätzt werden.[2]

Beim vorliegenden Datensatz für Stuttgart werden daher für eine Wahl des Referenzzeitraums die gemittelten Temperaturdaten im Jahresdurchschnitt der fünf Stationen im gesamten Messzeitraum dargestellt (s. *Abbildung 6*).

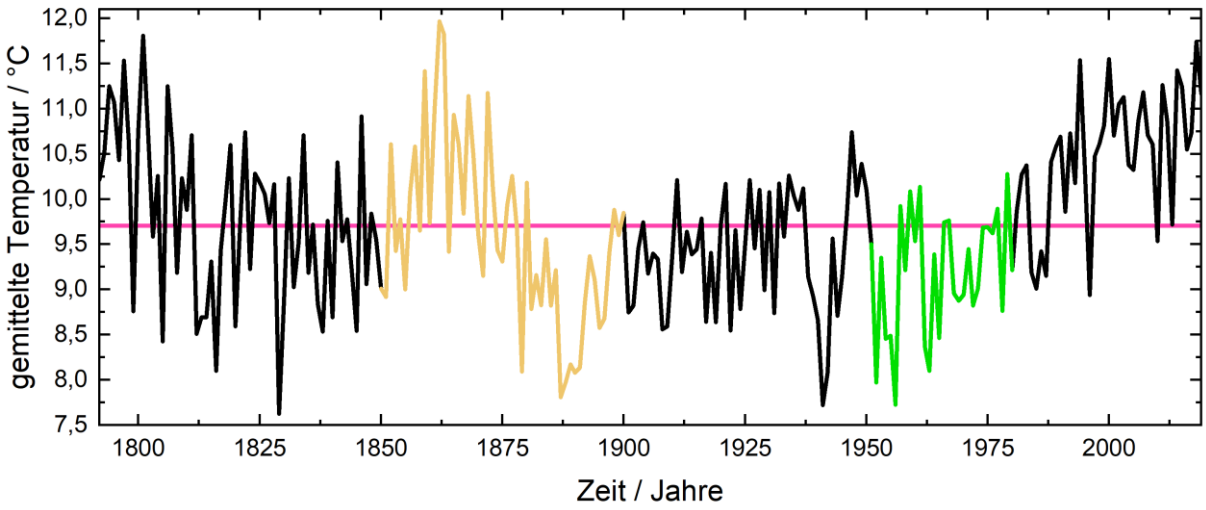

Abbildung 6: Über alle zugänglichen Messstationen (04926, 04927, 04928, 04931, 04933) in Stuttgart gemittelte Temperatur im Jahresdurchschnitt in °C. Hierbei wurden vom Deutschen Wetterdienst Daten im Zeitraum von 1792 bis 2019 erhoben und veröffentlicht. Die waagerechte Linie in Magenta zeigt den Temperaturmittelwert (T = 9,70511 °C) über das gesamte Datenintervall an. In bunt sind zwei mögliche Definitionen der Nulllinie bzw. der Basisjahre gegeben. In Gelb zum einen der Zeitraum von 1850 bis 1900, in Grün zum anderen der Zeitraum von 1951 bis 1980. Für weitere Analysen wird letzterer genutzt.

Die farbig hervorgehobenen Daten entsprechen den beiden möglichen Definitionen der Basisjahre. Auf den ersten Blick scheint der Zeitraum von 1850 bis 1900 die bessere Wahl für die Nulllinie zu sein, da sich starke Temperaturabweichungen nach oben und nach unten in Waage halten. Nachteilhaft ist allerdings, dass in diesem Zeitintervall lediglich Temperaturdaten von einer Station vorliegen. Für die Definition eines sicheren und aussagekräftigen Standards sind diese Daten daher nicht belastbar genug und werden nicht als Referenzintervall ausgewählt. Für die andere Möglichkeit zur Festlegung der Basisjahre von 1951 bis 1980 konnten Daten von bis zu drei verschiedenen Messstationen erhoben und gemittelt werden. Bei diesen Daten besteht jedoch der Nachteil, dass diese tendenziell unterhalb des globalen Mittelwertes des Messzeitraums liegen (s. magentafarbene Linie, *Abbildung 6*). Dies könnte zu extremeren Abweichungen in relativen Betrachtungen führen. Dennoch wird dieser Referenzzeitraum für weitere Analysen ausgewählt.

Nach Auswahl der Basisjahre können darüber hinaus Temperaturanomalien ermittelt werden (siehe *Abbildung 7*). Hierbei wurde der Temperaturmittelwert aus allen Jahresmitteln (s. magentafarbene Linie, *Abbildung 7*) jeweils von der einzelnen Temperatur für das entsprechende Jahr subtrahiert.

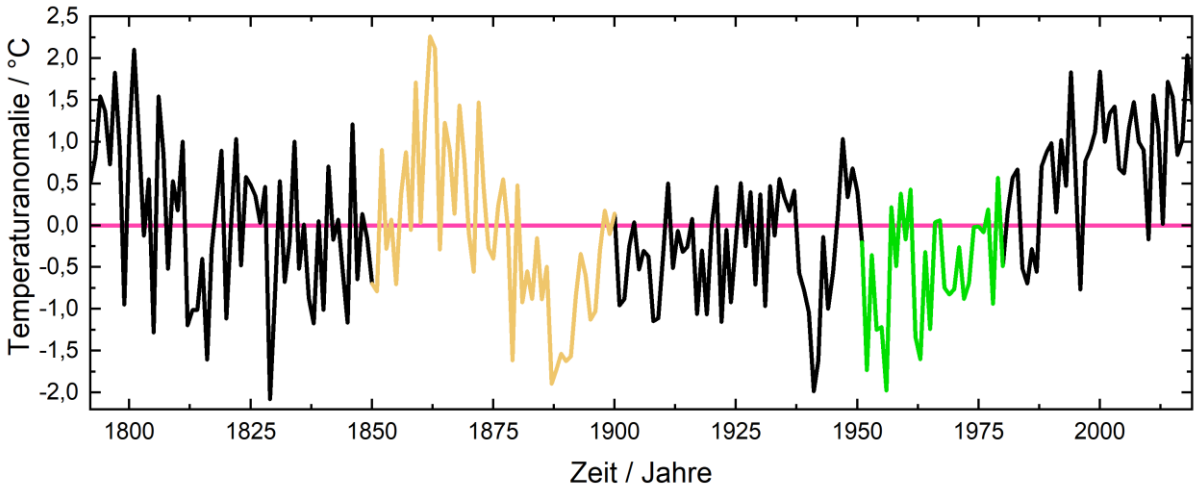

Abbildung 7: Temperaturanomalie in °C ausgehend von allen zugänglichen Messstationen (04926, 04927, 04928, 04931, 04933) in Stuttgart. Hierbei wurden vom Deutschen Wetterdienst Daten im Zeitraum von 1792 bis 2019 erhoben und veröffentlicht. Der Temperaturmittelwert (T = 9,70511 °C) über das gesamte Datenintervall wird von der jeweiligen Jahrestemperatur abgezogen. Die waagerechte Linie in Magenta entspricht einer Abweichung von Null vom Temperaturmittelwert. In bunt sind zwei mögliche Definitionen der Basisjahre gegeben. In Gelb zum einen der Zeitraum von 1850 bis 1900, in Grün zum anderen der Zeitraum von 1951 bis 1980. Für weitere Analysen wird letzterer genutzt.

Beim Standort Schwerin wurde analog vorgegangen. Hierbei ist allerdings hervorzuheben, dass lediglich eine Messstation Temperaturdaten aufzeichnet, die analysiert werden. Ebenso wie für Stuttgart, wird die Temperaturanomalie als Funktion der Jahre aufgetragen und die gewählten Basisjahre sind farblich markiert (s. *Abbildung 8*).

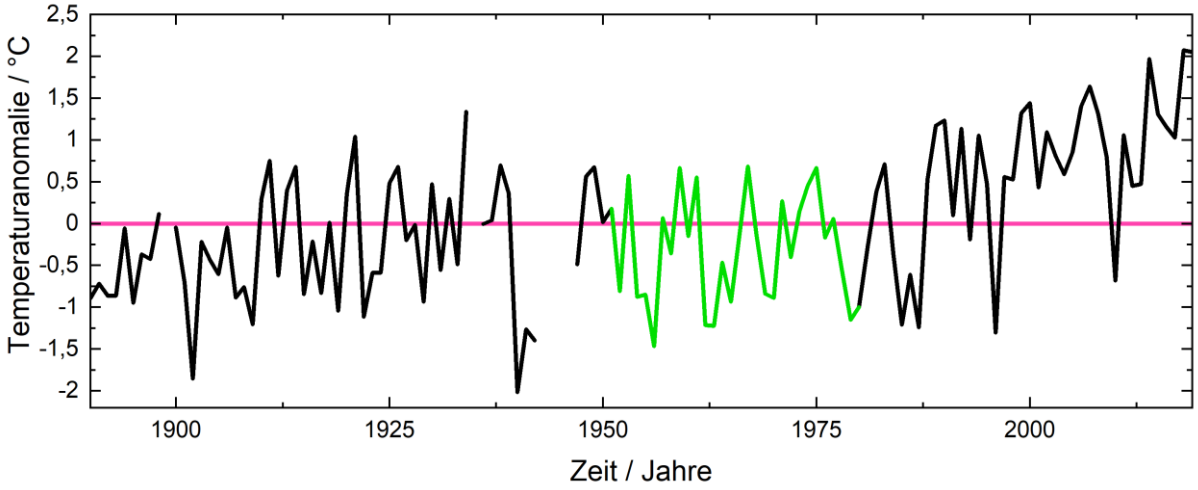

Abbildung 8: Temperaturanomalie in °C ausgehend von der einzigen zugänglichen Messstation (04625) in Schwerin. Hierbei wurden vom Deutschen Wetterdienst Daten im Zeitraum von 1890 bis 2019 erhoben und veröffentlicht. Der Temperaturmittelwert (T = 8,55517°C) über das gesamte Datenintervall wird von der jeweiligen Jahrestemperatur abgezogen. Die waagerechte Linie in Magenta entspricht einer Abweichung von Null vom Temperaturmittelwert. In Grün ist die einzige mögliche Definition der Basisjahre in einem Zeitraum von 1951 bis 1980 gegeben. Dieser wird für weitere Analysen genutzt.

Für Schwerin ist ausschließlich die Wahl der Basisjahre von 1951 bis 1980 möglich, was jedoch vorteilhaft für einen späteren Vergleich mit Stuttgart ist. Darüber hinaus sollte auf die Diskontinuität der Daten verwiesen werden.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle vorerst festgehalten werden, dass sowohl für Stuttgart als auch für Schwerin qualitativ eine Zunahme der jahresmittleren Temperatur etwa ab dem Jahr 1960 ersichtlich ist. Ob es sich hierbei um eine natürliche und periodisch wiederholende Schwankung der Temperatur handelt oder ob der anthropogene Klimawandel miteinfließt, soll später diskutiert werden.

3 Interpretation von Temperaturdaten

Die Interpretation von Temperaturdaten ist eine wichtige Methode, um den Klimawandel und deren Folgen beurteilen zu können. Die Temperatur der Erde wird auf den Klimagipfeln der Politiker stets stark diskutiert. Im Dezember 2015 wurde das Pariser Abkommen bei der UN-Klimakonferenz in Paris beschlossen.[13] Im November 2016 trat das Abkommen mit der Unterschrift von 197 Staaten in Kraft. Allein 197 Staaten sind verantwortlich für 55 % der weltweiten Treibhausgase. Inhalt dieses Abkommens war und ist es bis heute, die Erderwärmung bzw. den Temperaturanstieg im direkten Vergleich zur vorindustriellen Temperatur unterhalb von 1,5°C bis 2036 (bzw. 2°C bis 2063) zu halten. Im Jahr 2019 rückte die Dringlichkeit des Klimaschutzes durch *Greta Thunberg* wieder in den Fokus der Politik. Durch sie wurde die nun globale Bewegung „*Fridays for Future*“ ins Leben gerufen und am 15. März 2019 fand der erste Klimastreik statt. Primäres Ziel der Bewegung ist es, schnelle und effiziente Klimaschutz-Maßnahmen durchzusetzen, damit das Klimaziel des Pariser Abkommens noch eingehalten wird.[20] Mit den Klimastreiks setzte die Jugend von heute ein unvergleichbares Zeichen an die Politiker und setze diese unter Druck, die Klimapolitik neu zu diskutieren und langfristig die Bevölkerung für das Thema Klima- und Umweltschutz zu sensibilisieren. Der Gipfelpunkt der Treibhausgasemissionen soll erreicht werden, um nachhaltig die starke Erderwärmung zu verhindern und die Emissionen zu reduzieren. Die Länder sind verpflichtet ihre Bilanzen der CO_2-Ausstöße zu dokumentieren, um Transparenz und Kontrolle zu garantieren. Ebenso soll das Verantwortungsbewusstsein für das Klima gestärkt werden, um für die Zukunft ein gutes Klima zu schaffen. Alle fünf Jahre wird die Änderung der Temperatur und der Treibhausgase auf Klimagipfeln diskutiert und neue Wege der Technologie und Industrie besprochen. Im Vergleich zum Jahr 1990, in dem Deutschland 940,3 Millionen Tonnen CO_2-Emissionen ausgestoßen hat, hat sich der Wert in Deutschland im Jahr 2015 bereits auf 729,8 Millionen Tonnen CO_2-Emissionen reduziert. Dennoch zeigt sich allein für die Werte in Deutschland, dass dies nur der Anfang für eine weltweite Klimaverbesserung bedeutet.

Durch Extrapolation der Daten wird für das Jahr 2036 eine globale Temperaturabweichung von ca. 1,5°C und für 2063 eine Abweichung von ca. 2°C von der mittleren Temperatur der Basisjahre erwartet. Der kürzlich virtuelle Klimagipfel sorgte erneut für Diskussionen rund um das Thema Klima. Das Ziel unterhalb eine Klimaerwärmung von 1,5 °C zum Jahr 1990 bleiben, wird immer unrealistischer, da bereits eine Klimaerwärmung im Jahr 2020 von + 1,2 °C vorliegt. Aufgrund dessen wurden nochmals schärfere Regeln zur Einhaltung der Klimaziele verabschiedet.[21]

Im Zusammenhang mit den Temperaturabweichungen ist allerdings hervorzuheben, dass diese zeitlich und regional gesehen schwanken. Um diese Schwankungen der Temperatur

besser deuten zu können, werden im Folgenden die Temperaturabweichungen mittels der Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Städte Schwerin und Stuttgart nach *Hansen* und *Sato* analysiert und diskutiert. Hierfür wird vorerst der aktuelle Stand der Literatur nach *Hansen* und *Sato* im nachfolgenden Unterkapitel erläutert, um die Methodik der Temperaturanalyse zu erläutern.

3.1 Aktueller Stand der Literatur (nach Hansen und Sato)

Eine Auswertung von Temperaturdaten erfolgte zum einen für die Nordhemisphäre (N. Hemisphere) und zum anderen für die Südhemisphäre (S. Hemisphere, siehe *Abbildung 9*). Die Abweichungen vom jeweils herrschenden Mittelwert für die Basisjahre 1951 bis 1980 (blaue Kurve) wurden dabei betrachtet. Die Temperaturabweichungen in diesen Basisjahren sind normalverteilt, was sich graphisch in einer symmetrischen Gauß'schen Glockenkurve äußert. Die Temperaturverteilung der folgenden Zeitintervalle wird sowohl für die Nord- als auch für die Südhemisphäre zunehmend breiter und in ihrem Maximum zu höheren (positiven) Standardabweichungen verschoben.

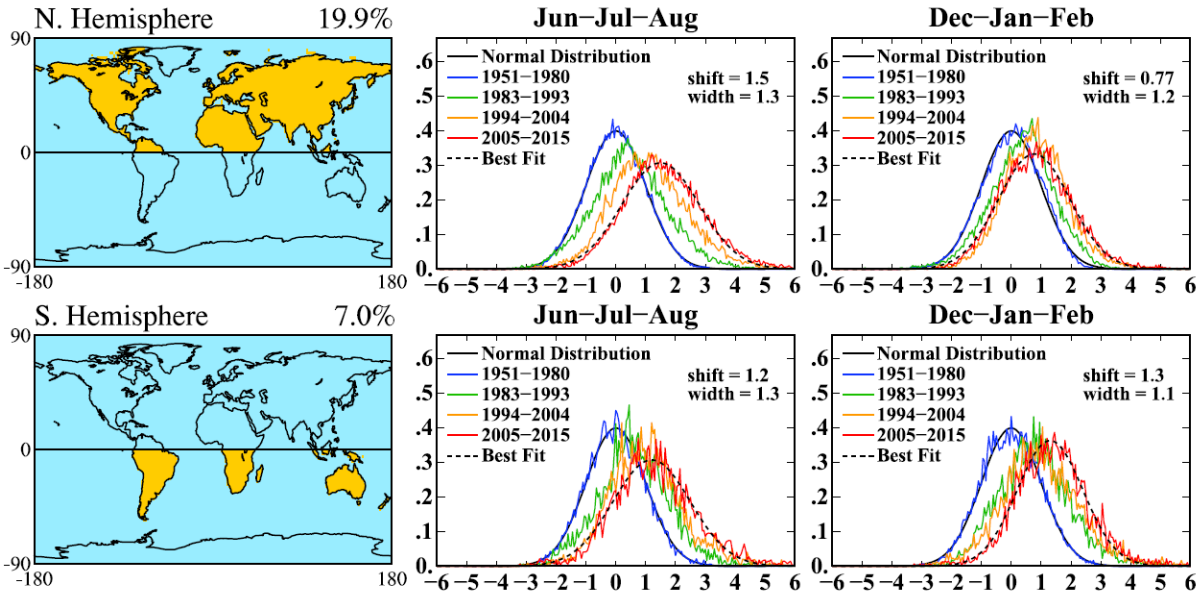

Abbildung 9: Temperaturdaten für die Nord- und Südhemisphäre. Graphisch aufgetragen sind auf der Abszisse die Temperaturabweichungen in Einheiten von Standardabweichungen (Bezugspunkt sind die Basisjahre, blaue Kurve) und auf der Ordinate die Häufigkeit des Auftretens lokaler Temperaturanomalien. Entnommen aus Ref.[22].

Anschließend werden die Temperaturdaten der Landmassen auf der Nordhalbkugel sowohl für die Sommermonate Juni/ Juli/ August, als auch für die Wintermonate Dezember/ Januar/ Februar relativ zu jenen der o.g. Basisjahre verglichen.

Eine wichtige Erkenntnis bei dieser Datenanalyse ist, dass der Mittelwert der globalen Durchschnittstemperatur mit Zeitintervallen, die in die Gegenwart schreiten, ansteigt. Dies

äußert sich in einer Rechtsverschiebung des Maximums der Temperaturverteilung zu größeren Standardabweichungen. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die Temperaturverteilung mit den Jahren nicht nur breiter, sondern auch unsymmetrischer wird (siehe *Abbildung 10*). So wird der rote Bereich der Standardabweichung immer größer und die Wahrscheinlichkeiten von Standardabweichungen über drei nimmt stetig zu. Daher wird es gegenwärtig immer wahrscheinlicher, dass auf ein warmes Jahr[1] ebenfalls ein warmes Jahr folgt und immer unwahrscheinlicher, dass auf ein warmes Jahr ein kaltes Jahr folgt.

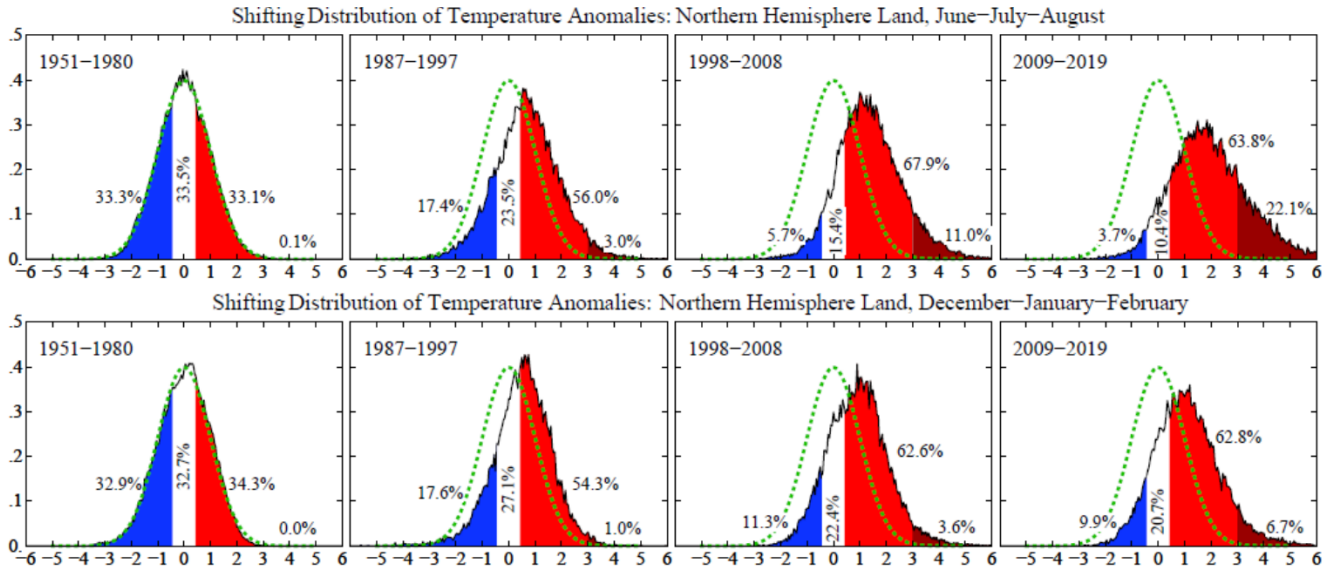

Abbildung 10: Vergleich der Normalverteilung der Landtemperaturdaten der Basisjahre 1951 bis 1980 mit entsprechenden Temperaturen der Jahre 1987 bis 2019 für die Nordhemisphäre in Sommer- und Wintermonaten. Weißen Bereiche sind um den Maximalwert zentriert und eine Standardabweichung breit, wohingegen blaue Bereiche eine negative Abweichung und rote Bereiche eine positive Abweichung zum weißen Bereich angeben. Grün gestrichelte Linien geben die ursprüngliche Normalverteilung der Basisjahre an. Entnommen aus Ref. [22]

3.1 Temperaturabweichungen von Stuttgart

Bevor die Ausführungen von *Hansen* und *Sato* auf die ausgewählten deutschen Standorte angewandt werden, wir zunächst die Temperaturentwicklung der Stadt Stuttgart dargestellt (siehe *Abbildung 11*).

[1] Unter einem warmen Jahr wird ein Jahr verstanden, dessen Durchschnittstemperatur relativ höher ist als die (extrapolierte) globale oder regionale Durchschnittstemperatur.

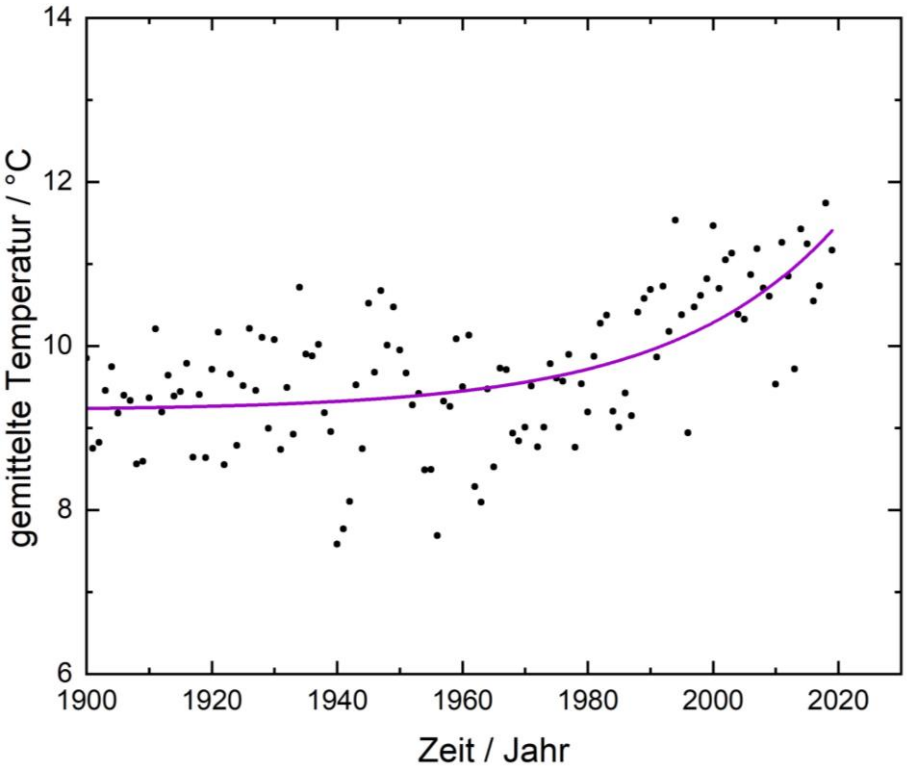

Abbildung 11: Temperaturentwicklung der Stadt Stuttgart (Mittelung über Monate) mit exponentiellem Fit über die Temperaturentwicklung der Jahre 1900 bis 2019 (lila).

Innerhalb der Jahre 1900 bis 2019 ist die Temperatur von 9°C auf 12°C, also um 3°C gestiegen. Der ansteigende Trend der Temperatur ist deutlich zu sehen. Dieser drastische Anstieg stellt einen Grund dafür dar, dass 2015 das Pariser Klima-Abkommen verabschiedet wurde.

In den Jahren von 1900 bis 1980 liegen bereits positive Änderungen zum Referenzwert von 9,19 °C vor. Der Temperaturanstieg verläuft in diesem Bereich noch nahezu linear. Ab dem Jahr 1980 steigen die Temperaturen im Gegensatz zum Basiswert exponentiell an. Allein in den letzten 40 Jahren ist die durchschnittliche Temperatur um 2 °C gestiegen. Diese deutlichen Entwicklungen sind ein Hinweis für den anthropogen angetriebenen Klimawandel.

Im Anschluss wird die Temperaturabweichung gegen die Zeit in Jahren aufgetragen (s. *Abbildung 12*). Hierfür wurde zuerst die Durchschnittstemperatur der Stadt Stuttgart mittels der Basisjahre 1951 bis 1980 ermittelt (9,19°C) und nachfolgend die Durchschnittstemperaturen der Jahre von dem Referenzwert subtrahiert.

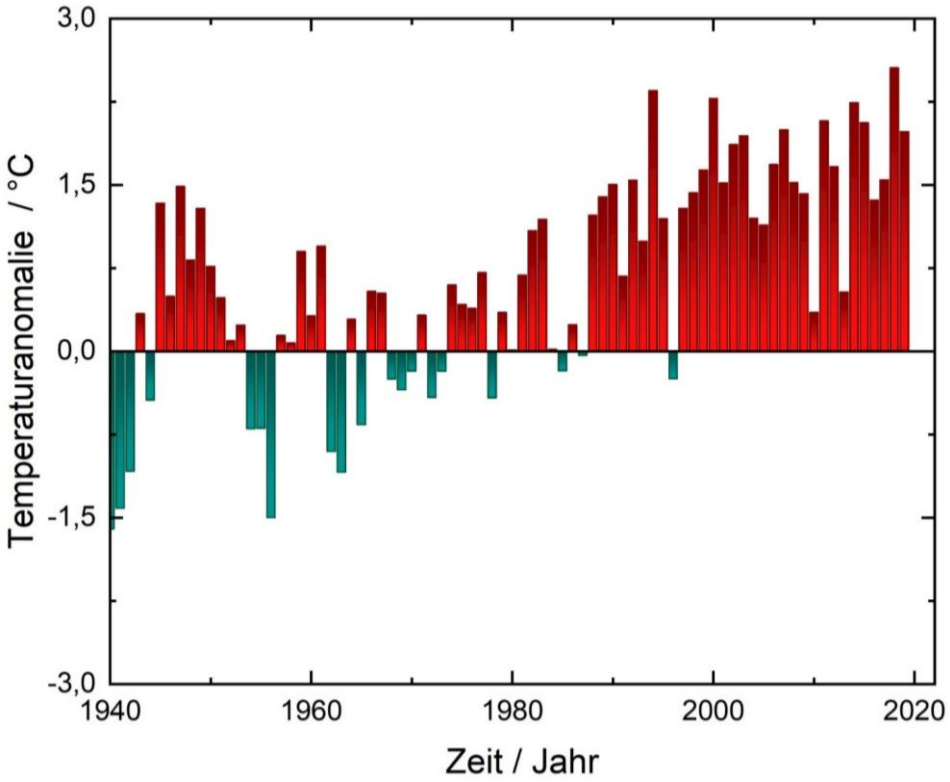

Abbildung 12: Temperaturänderung im Laufe der Jahre der Stadt Stuttgart im Vergleich zum Referenzwert (Basisjahre 1951 bis 1980; Monatsmittel); Farbkodierung: grün (negative Temperaturänderung Basiswert), rot (positive Temperaturänderung zum Basiswert).

Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Abweichung der Durchschnittstemperatur im betrachteten Jahreszeitraum deutlich zugenommen hat. Die Temperatur hat sich in den letzten 40 Jahren im Mittel um ca. 2 °C erhöht. Ebenso wird ersichtlich, dass es ab 1990 ausschließlich positive Abweichungen zur Durchschnittstemperatur gibt.

In Analogie zu den zuvor erläuterten Ausführungen, werden nun die Auswertemethoden von *Hansen* und *Sato* auf die ausgewählten deutschen Städte angewandt und diskutiert.

Wie bereits erwähnt, verfügt die Stadt Stuttgart über Temperaturdaten von fünf verschiedenen Messstationen. Bei der Mittelung dieser Daten wurde erkennbar, dass bei einigen Monaten die Temperaturdaten fehlten. Da solche fehlenden Daten zu verzerrten Jahresmittelwerten führen, wurden die betroffenen Jahre aus den Betrachtungen ausgeschlossen.

Bei dem nach *Hansen* und *Sato* angelehnten Verfahren wurden zuerst die stationsmittleren Temperaturen aller Monate der definierten Basisjahre 1951 bis 1980 ausgewählt. Für eine Darstellung dieser Daten über eine Gaußfunktion ist zunächst die Kenntnis des Mittelwerts und der Standardabweichung dieser Werte notwendig. Über die klassische Dichtefunktion einer Gaußverteilung wurden diese Werte eingefügt und gegen eine Temperaturachse geplottet. Im Anschluss wurde die Abszisse in Einheiten der Standardabweichung transferiert. Hierfür mussten die x-Werte durch die zuvor berechnete Standardabweichung σ geteilt

werden. Darüber hinaus sollten die Intervalle der Abszisse der Standardabweichung entsprechen. Ist dies geschehen, wird eine Gauß-Verteilung entsprechend der Grafik (links oben in *Abbildung 13*) erhalten.

Im nächsten Schritt wurden die gleichen zeitlichen Intervalle von zehn Jahren ausgewählt, wie auch bei *Hansen* und *Sato*. Da die Datenmenge einer einzigen deutschen Stadt deutlich kleiner ist als die der gesamten nördlichen Hemisphere, wurde zunächst die Visualisierung der Daten in Form eines Histogramms ausgewählt.

In folgender Zusammenstellung (s. *Abbildung 13*) wird in jedem Diagramm die auf eine Fläche von eins normierte Gaußverteilung der Basisjahre 1951 bis 1980 dargestellt. Die angegebenen Temperaturanomalien ergeben sich aus der Differenz der jeweiligen Monatstemperatur und dem Mittelwert aus allen Monatstemperaturen der Basisjahre. Eine Verteilung der Wahrscheinlichkeit der Temperaturabweichungen in den anschließenden Intervallen wird durch die grünen Balken der Histogramme angegeben. Es werden zum Beginn alle Monate eines Jahres zur Analyse der Temperaturanomalie berücksichtigt.

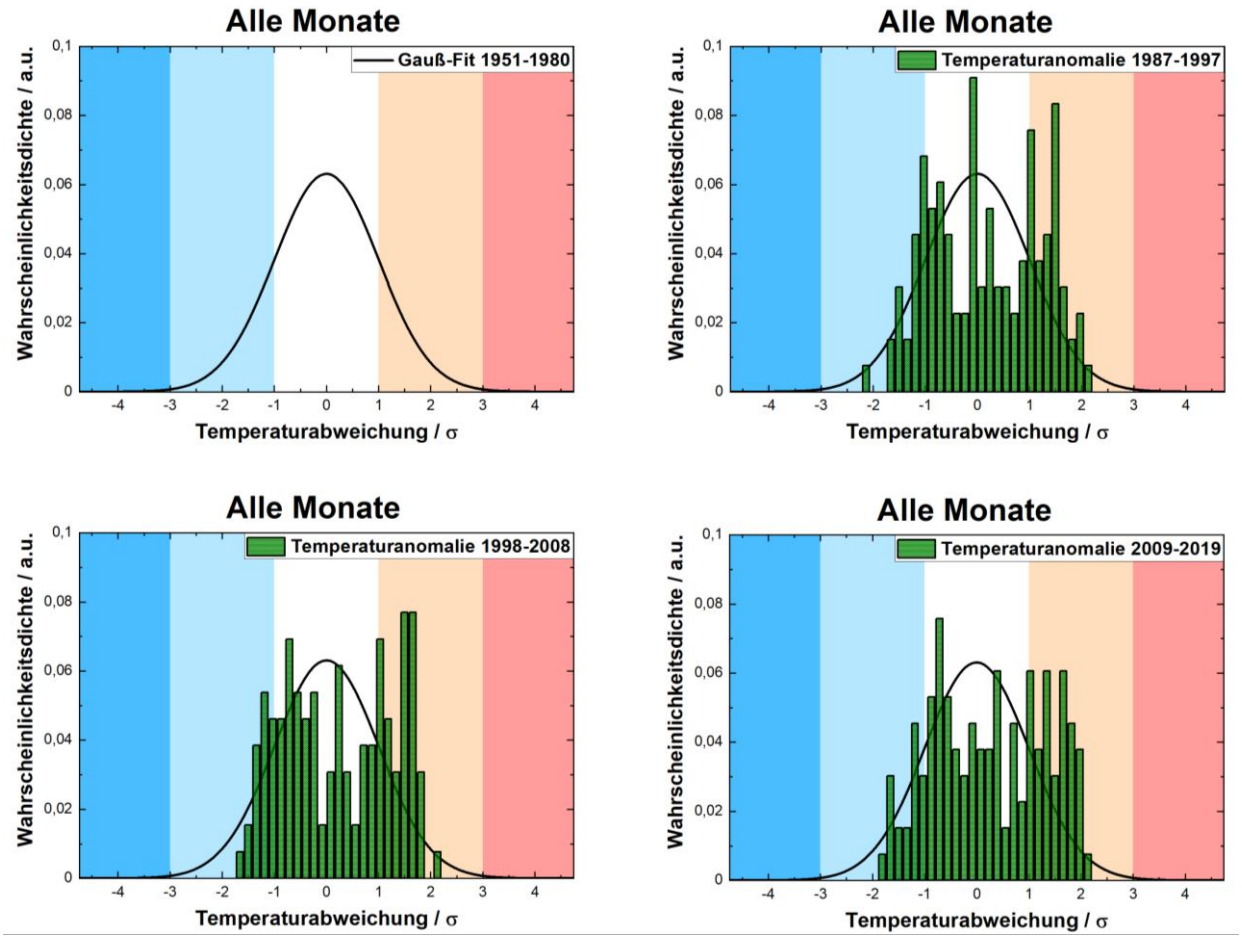

Abbildung 13: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien aller Monate eines Jahres der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 6,32653) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte. Der Referenz Gauß-Fit ist auf eine Fläche von 1 normiert.

Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle sind an die Histogramme gefittet. Links oben: Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls 1951 bis 1980; rechts oben: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1987 bis 1997 mit dem Gauß-Fit; links unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1998 bis 2008 mit dem Gauß-Fit; rechts unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 2009 bis 2019 mit dem Gauß-Fit.

Zunächst kann festgehalten werden, dass die Temperaturabweichungen aller betrachteten Intervalle innerhalb der Gaußverteilung der Basisjahre liegen. Im Betrachtungszeitraum der Jahre 1987 bis 1997 befinden sich die Temperaturanomalien symmetrisch im Bereich von - 2,2 σ und + 2,2 σ. Die maximalen Histogramm-Balken liegen im Bereich von - 1,5 σ, 0 σ und + 1,5 σ vor. Bei Betrachtung des Zeitintervalls 1998 bis 2008 sind die höchsten Histogramm-Balken im Bereich von 1,5 σ ersichtlich. Die Temperaturabweichungen liegen im Bereich von - 1,7 σ und + 2,2 σ. Im Vergleich zum Zeitintervall 1987 bis 1997 sind die Glockenkurven leicht rechtsverschoben. Dieser Trend lässt sich ebenfalls im Zeitintervall 2009 bis 2019 erkennen. Die Temperaturabweichungen liegen im Bereich von - 1,8 σ und + 2,3 σ. Die Wahrscheinlichkeitsdichte (Integrale bzw. Balkenhöhe) steigen im positivem σ-Bereich leicht an.

Da aus den Darstellungen der Temperaturanomalien nur schwer Trends mit dem bloßen Auge zu erkennen sind, wurde an die Histogramme der jeweiligen Jahresintervalle eine Normalverteilung gefittet. Ein Vergleich der zuvor erwähnten Referenzfunktion in blau wird mit den gefitteten Gaußverteilungen der Betrachtungszeiträume 1987 bis 1997, 1998 bis 2008 und 2009 bis 2019 angestellt (siehe *Abbildung 14*).

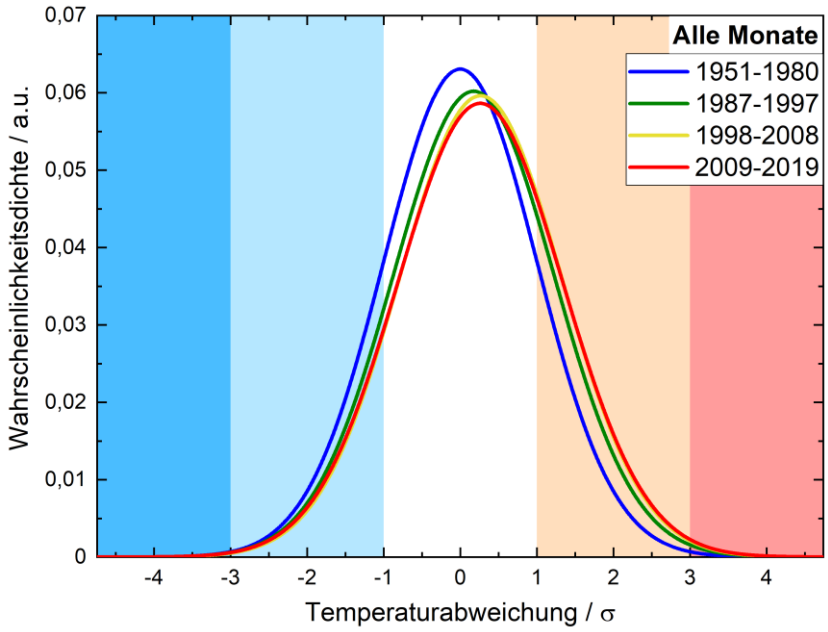

Abbildung 14: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperaturanomalien aller Monate (Januar bis Dezember) der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 6,32653) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte Die Gaußverteilungen sind auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle wurden durch Fitten der Histogramme aus Abbildung 13 mittels Normalverteilung erzeugt.

Es lässt sich erkennen, dass sich das Maximum der Gaußverteilung mit gegenwärtigeren Zeitintervallen zunehmend nach rechts, d.h. zu positiven Standardabweichungen bezüglich der Referenz-Gaußverteilung verschiebt (s. *Abbildung 14*). Auch ist bezüglich der Höhe der Gaußverteilungen zu erkennen, dass diese mit der Zeit leicht abnehmen. Insgesamt handelt es sich jedoch um sehr kleine Abweichungen, die ihm Rahmen der Streuung der Messwerte liegen können.

Da hier weitere Interpretationen schwierig sind, soll analog zu *Hansen* und *Sato* eine Unterteilung in warme Sommermonate (Juni, Juli, August) und kalte Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) erfolgen. Die getrennten Betrachtungen der Jahresextreme soll die erwarteten Trends von einem mittleren Temperaturanstieg mit der Zeit wiedergeben.

Begonnen wird mit der Betrachtung der Wintermonate Dezember, Januar und Februar. Auch hierbei wir zunächst ein Gauß-Fit für das Basisjahr-Intervall 1951 bis 1980 erstellt. Anschließend werden Histogramme der Temperaturanomalien für die entsprechenden Monate der jeweiligen Zeitintervalle hinzugezogen (siehe *Abbildung 15*).

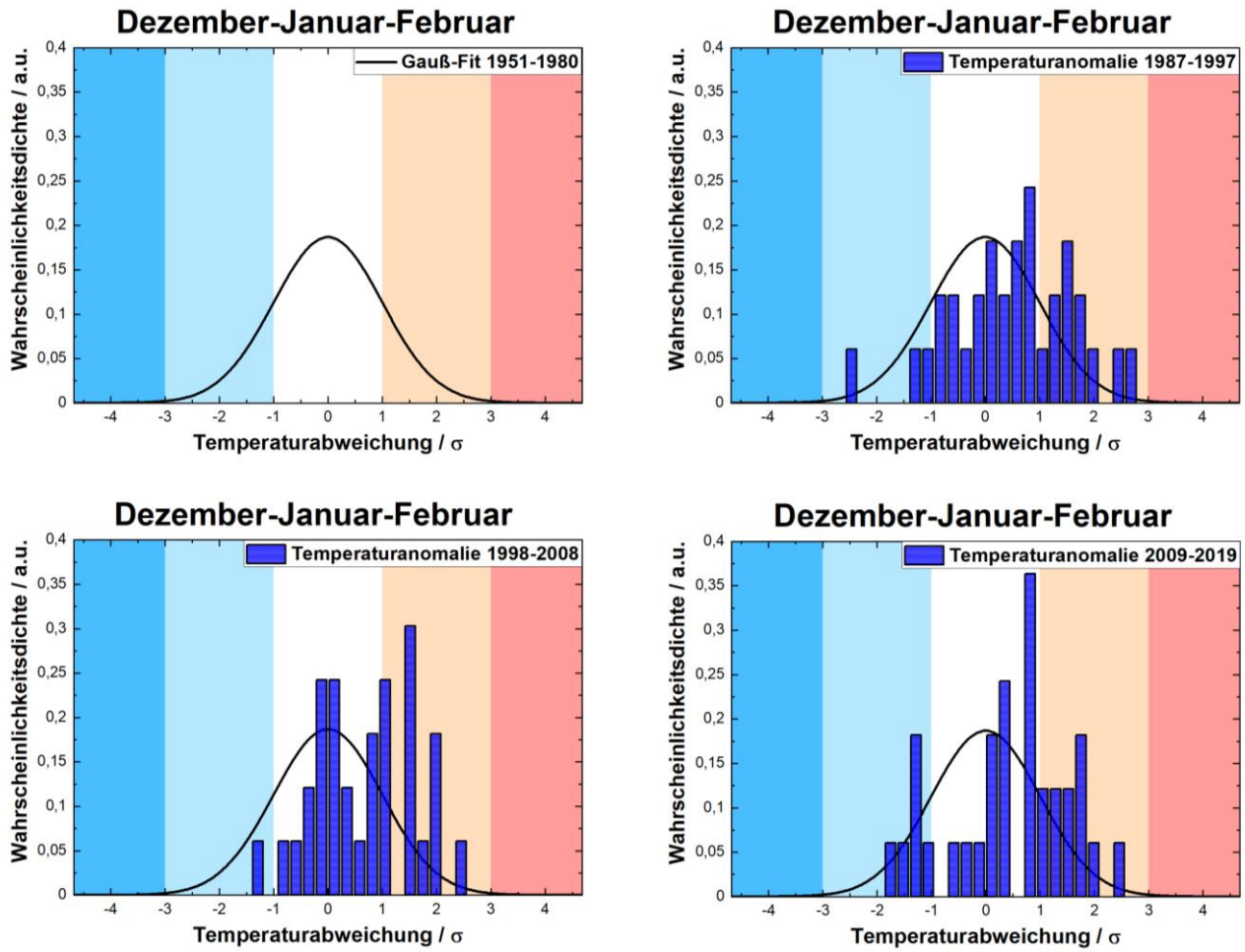

Abbildung 15: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung

(σ = 2,13672) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte. Der Referenz Gauß-Fit ist auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle sind an die Histogramme gefittet. Links oben: Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls 1951 bis 1980; rechts oben: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1987 bis 1997 mit dem Gauß-Fit; links unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1998 bis 2008 mit dem Gauß-Fit; rechts unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 2009 bis 2019 mit dem Gauß-Fit.

Die Temperaturabweichungen für den Zeitraum von 1987 bis 1997 liegen im Bereich von - 1,5 σ bis + 2,8 σ. Die negativen Abweichungen liegen, mit der Ausnahme von einem Histogramm-Balken bei - 2,5 σ, alle unterhalb der Gauß-Fit Funktion. Für positive Standardabweichungen sind hingegen überwiegend höhere Histogramm-Balken als die referenzielle Glockenkurve zu verzeichnen. Der höchste Histogramm-Balken liegt bei + 0,8 σ vor, wodurch eine daraus gefittete Gaußfunktion etwa um + 0,8 σ rechts verschoben wäre im Vergleich zum ursprünglichen Gauß-Fit. Im Zeitraum von 1998 bis 2009 liegt die mittlere Standardabweichung bereits bei ca. + 1 σ und die Wahrscheinlichkeitsdichten im positiven σ-Bereich liegen bei höheren Werten. Ebenso in dem Zeitintervall 2009 bis 2019 ist durch den sehr markanten Histogramm-Balken bei + 0,8 σ mit einer Rechtsverschiebung (bezüglich der Standardabweichung) der ursprünglichen Gaußfunktion zu rechnen.

In Analogie zu *Abbildung 14* wurden nun lediglich die Wintermonate der vier Jahresintervalle gegenübergestellt (s. *Abbildung 16*).

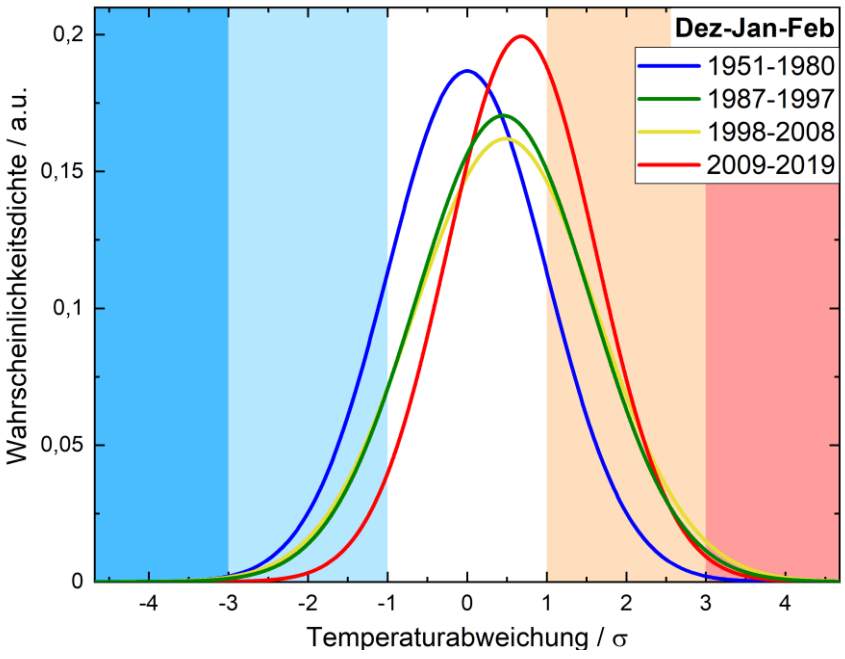

Abbildung 16: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperaturanomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 2,13672) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte Die Gaußverteilungen sind auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle wurden durch Fitten der Histogramme aus Abbildung 15 mittels Normalverteilung erzeugt.

Für 1987 bis 1997 und 1998 bis 2008 ist neben der Rechtsverschiebung eine Verbeiterung der Verteilung zu verzeichnen, wobei die Höhe und Maxima der gefitteten Gaußfunktionen vergleichbar sind. Für das Intervall 2009 bis 2019 ist die Verteilung noch stärker zu positiven Standardabweichungen verschoben, allerdings ist diese schmaler als jene der vorigen Intervalle oder der Basisjahre.

Im Anschluss werden die Sommermonate Juni, Juli und August betrachtet. Auch hierbei wir zunächst ein Gauß-Fit für das Basisjahr-Intervall 1951 bis 1980 erstellt. Anschließend werden Histogramme der Temperaturanomalien für die entsprechenden Monate der jeweiligen Zeitintervalle hinzugezogen (siehe *Abbildung 17*).

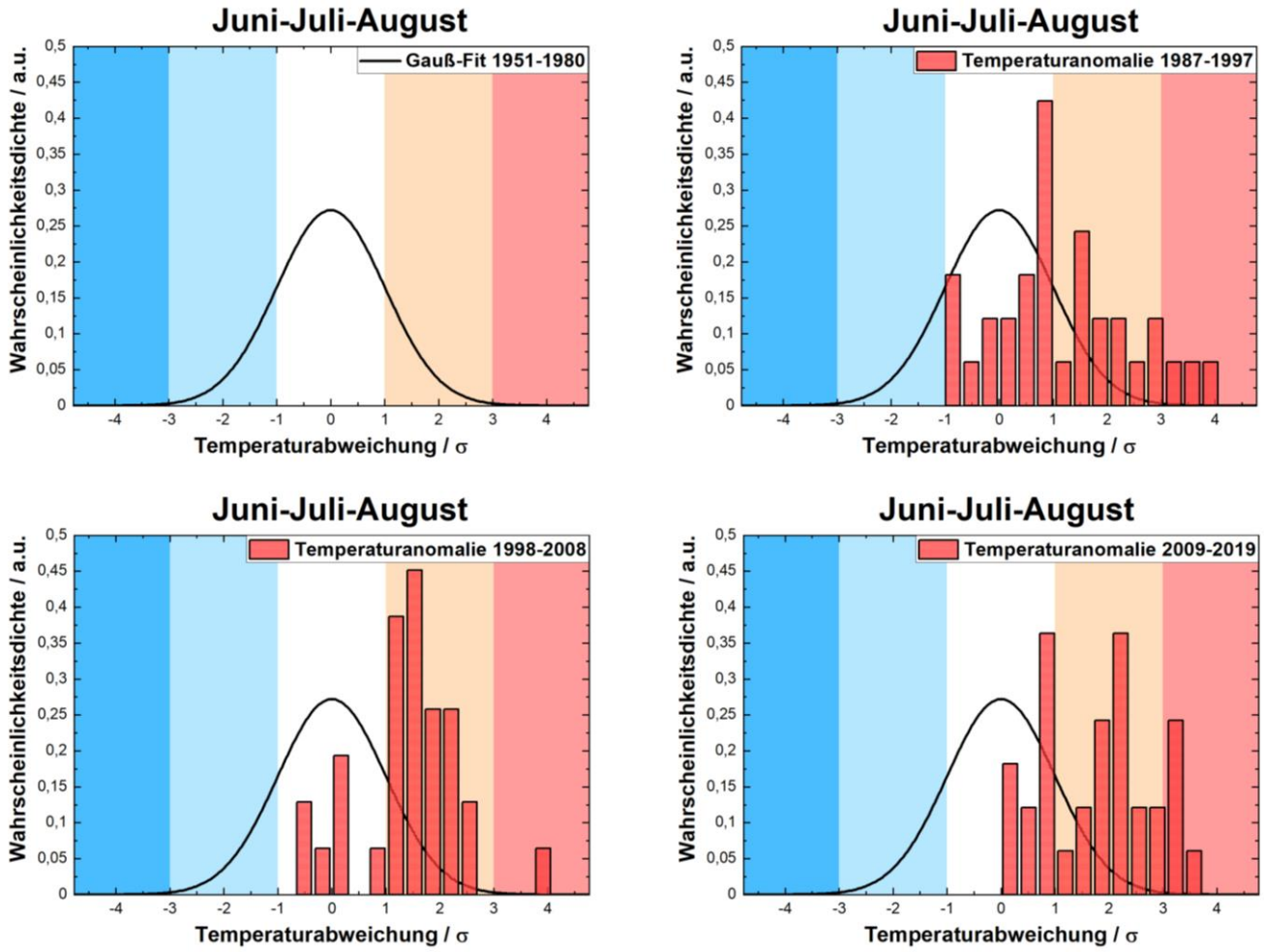

Abbildung 17: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 1,46666) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte. Der Referenz Gauß-Fit ist auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle sind an die Histogramme gefittet. Links oben: Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls 1951 bis 1980; rechts oben: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1987 bis 1997 mit dem Gauß-Fit; links unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1998 bis 2008 mit dem Gauß-Fit; rechts unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 2009 bis 2019 mit dem Gauß-Fit.

Viel eindeutiger lassen sich nun die Trends der Sommermonate für Stuttgart mit der Zeit interpretieren. In allen Zeitintervallen gab es Temperaturabweichungen bis zu + 4 σ. In den Jahren von 1987 bis 1997 liegen die Histogramm-Balken in einem Bereich von - 1 σ bis + 4 σ, wobei die wahrscheinlichste Temperaturabweichung bei + 0,9 σ. Im Gegensatz zu den vorigen Grafiken liegen nun sogar Histogramm-Balken im roten Bereich der Unterteilungen. Diese Beobachtungen lassen sich gleichermaßen auf die Jahre 1998 bis 2008 und 2009 bis 2019 übertragen. Hervorzugeben ist, dass sich die Verteilung der Histogramm-Balken zunehmend zu höheren (positiven) Standardabweichungen bewegt. So werden im letzten betrachteten Intervall nur noch Histogramm-Balken in einem Bereich von 0 σ bis + 4 σ gefunden. Dies würde bedeuten, dass relativ zur Verteilung aus den Basisjahren keine negativen Temperaturabweichungen mehr auftreten.

Diese eindeutige Verschiebung zu positiven Standardabweichungen wird durch das Fitten der Histogramme mittels Normalverteilung nochmals verdeutlicht (s. *Abbildung 18*).

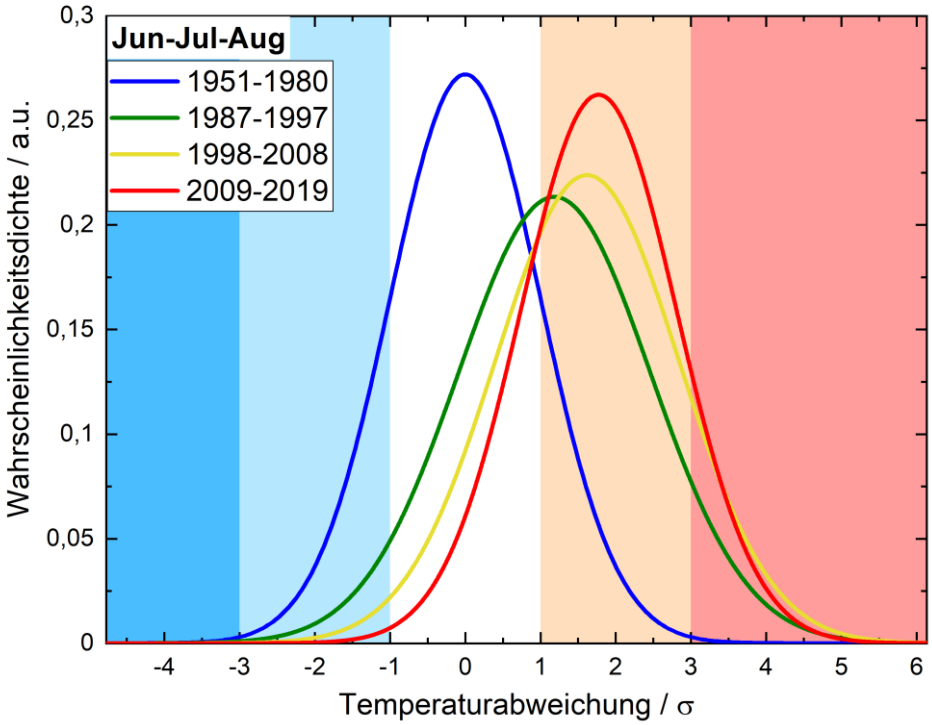

Abbildung 18: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperaturanomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Stuttgart im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = = 1,46666) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte Die Gaußverteilungen sind auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle wurden durch Fitten der Histogramme aus Abbildung 17 mittels Normalverteilung erzeugt.

Die Maxima der Gauß-Funktionen der einzelnen Zeiträume ab 1987 verschieben sich nahezu konstant um + 0,5 σ. Dies hatte zur Folge, dass bei Erstellung der Abbildung der Bereich von positiven Standardabweichungen im Vergleich zu den anderen analogen Abbildungen erweitert werden musste. Nur so kann das Abklingen aller Normalverteilungen vollständig

dargestellt werden. Neben der konstanten Rechtsverschiebung um + 0,5 σ lässt sich ebenso ein Trend in der Zunahme der Wahrscheinlichkeitsdichte erkennen. Die Höhe der Maxima steigt im Zeitverlauf an und erlangt seinen Maximalwert bei 0,25. In gleicher Weise wie bei den Wintermonaten, ist auch hier die Glockenkurve für das Intervall 2009 bis 2009 schmaler als jene der vorigen Intervalle und jene des Referenzzeitraums.

Abschließend kann hier anhand der Temperaturanalyse von Stuttgart besonders für die Sommermonate eine sehr schnelle und eindeutige Zunahme der mittleren Temperatur nachgewiesen werden.

3.2 Temperaturabweichungen von Schwerin

Nachdem für Stuttgart entsprechend der Erwartungen eindeutige Anstiege der mittleren Temperatur graphisch ausgearbeitet werden konnten, soll anschließend die gleiche Analyse auf Schwerin projiziert werden.

Begonnen wird auch hier mit der Temperaturentwicklung, nun allerdings von der Stadt Schwerin (siehe *Abbildung 19*). Wie bereits eingangs hervorgehoben, verfügt Schwerin über Temperaturdaten von lediglich einer Messstation. Dies sollte auch bei diesen Analysen berücksichtigt werden und kann aufgrund von fehlender Mittelwertbildung weniger belastbar sein bzw. zu mehr Streuung der Daten führen.

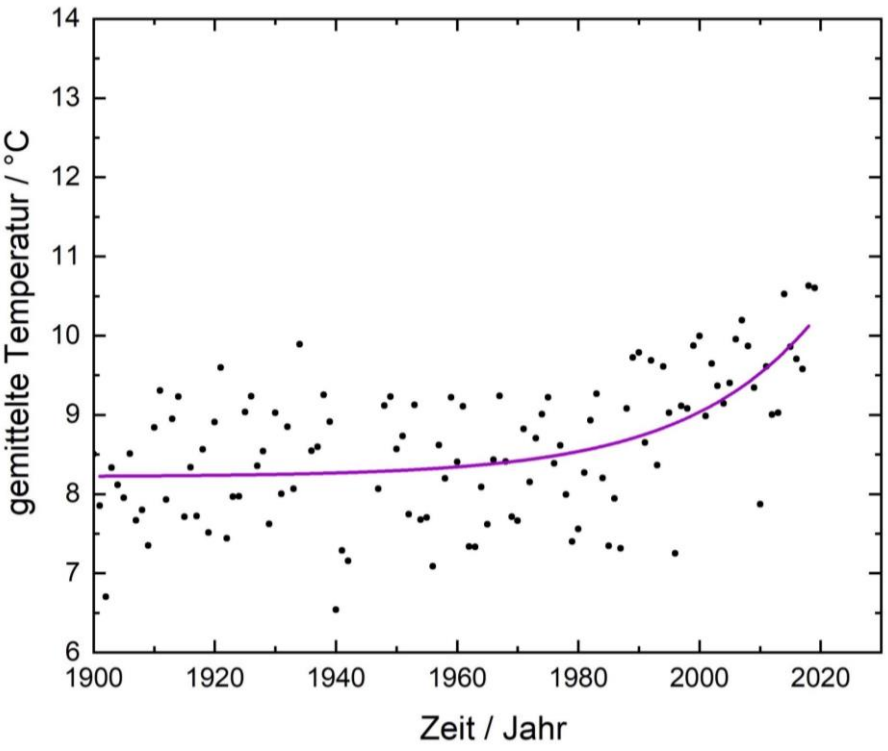

Abbildung 19: Temperaturentwicklung der Stadt Schwerin (Mittelung über Monate); exponentieller Fit über die Temperaturentwicklung der Jahre 1900 bis 2019 (lila).

Innerhalb des Zeitintervalls von 1900 bis 2019 ist die Temperatur von + 8,5°C auf + 10,5°C, also um + 2°C gestiegen. Der Temperaturanstieg verläuft in den Jahren 1900 bis 1960 noch nahezu linear. Ab dem Jahr 1961 steigen die Temperaturen im Gegensatz zum Basiswert exponentiell an. Die durchschnittliche Temperaturänderung um + 2 °C ist lediglich auf die letzten 40 Jahre zurückzuführen.

Neben der Temperaturentwicklung der Stadt Schwerin, ist ebenso eine Betrachtung der Durchschnittstemperatur im Zeitverlauf sinnvoll. Im folgenden Diagramm wurde daher die Durchschnittstemperatur gegen die Zeit in Jahren aufgetragen (s. *Abbildung 20*). Hierfür wurde ebenso in einem ersten Schritt die Durchschnittstemperatur der Stadt Stuttgart anhand der Basisjahre 1951 bis 1980 ermittelt (+ 8,24°C) und nachfolgend die Durchschnittstemperaturen der Jahre von dem Referenzwert abgezogen. Die Temperatur ist auf der Ordinatenachse und die Jahre auf der Abszisse aufgetragen.

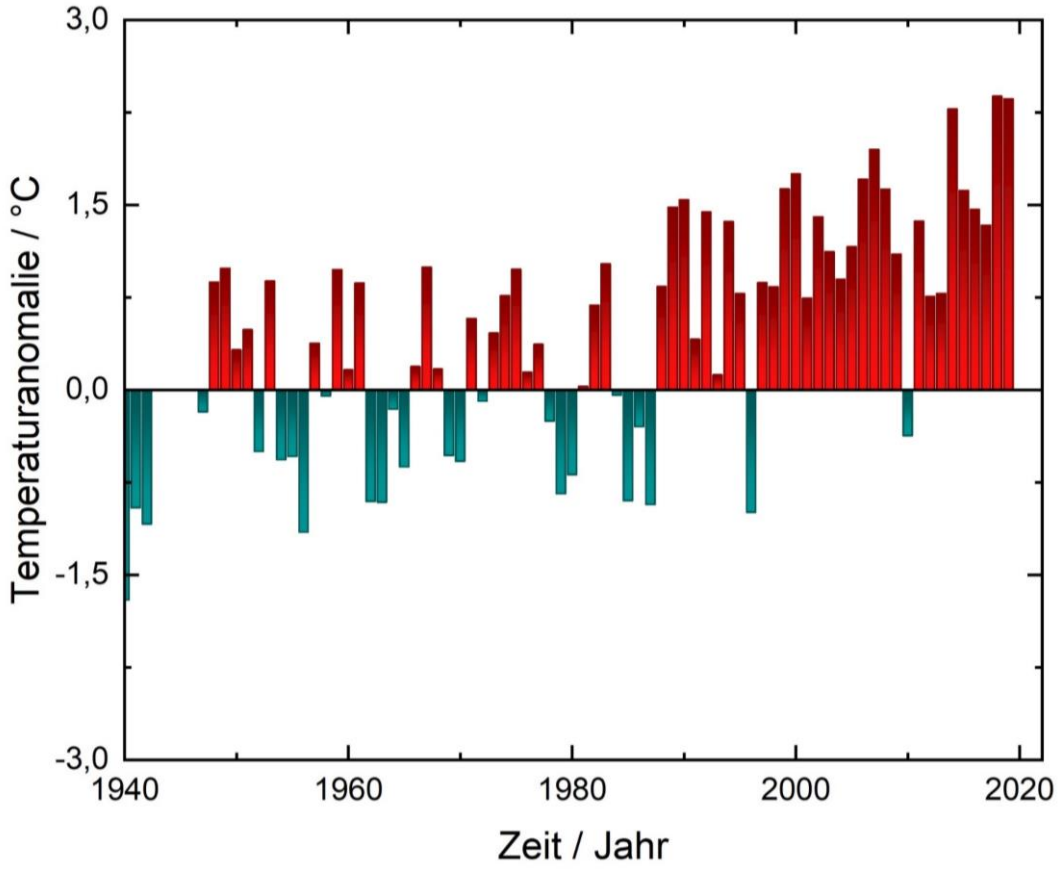

Abbildung 20: Temperaturänderung im Laufe der Jahre der Stadt Schwerin im Vergleich zum Referenzwert (Basisjahre 1951 bis 1980; Monatsmittel); Farbkodierung: grün (negative Temperaturänderung zum Basiswert), rot (positive Temperaturänderung zum Basiswert).

Die Temperaturanomalien scheinen auf den ersten Blick mit den Jahren zum einen zuzunehmen, zum anderen scheinen diese Temperaturabweichungen in den letzten 50 Jahren fast ausschließlich positiver Natur zu sein. So gab es, ausgenommen von einzelnen Jahren wie 1998 und 2015, nur positive Temperaturanomalien bis zu 2,5 °C

Zur besseren Vergleichbarkeit wird auch für Schwerin eine Auswertung nach *Hansen* und *Sato* durchgeführt. Das vorgehen ist hierbei im vorherigen Kapitel nachzulesen. Obwohl hier ebenfalls wie bei Stuttgart mit wenigen Interpretationsmöglichkeiten zu rechnen ist, wird für Schwerin eine Darstellung für alle Monte der betracheten Jahre angefertigt.

Der in analoger Weise für Stuttgart erstellte Gauß-Fit wird für Schwerin aus den gleichen Baisjahren 1951 bis 1980 in jede der vier Grafiken zur Vergleichbarkeit eingefügt. Im Anschluss werden über Histogramme die zeitlichen Intervalle 1987 bis 1997, 1998 bis 2008 und 2009 bis 2019 in Form von Temperaturanomalien in Bezug zur Normalverteilung gebracht (s. *Abbildung 21*).

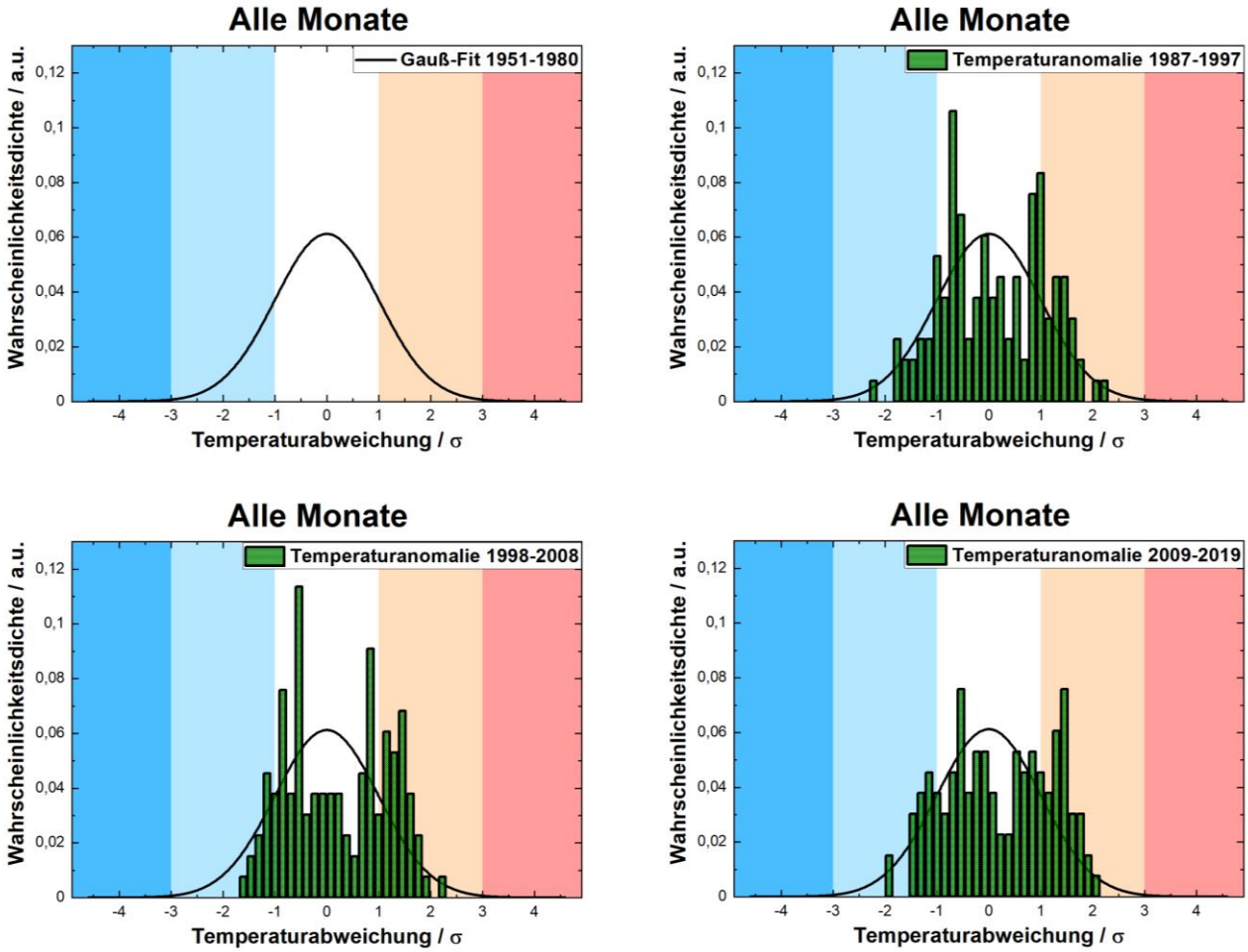

Abbildung 21: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien aller Monate eines Jahres der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 6,51968) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte. Der Referenz Gauß-Fit ist auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle sind an die Histogramme gefittet. Links oben: Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls 1951 bis 1980; rechts oben: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1987 bis 1997 mit dem Gauß-Fit; links unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1998 bis 2008 mit dem Gauß-Fit; rechts unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 2009 bis 2019 mit dem Gauß-Fit.

Im Betrachtungszeitraum der Jahre 1987 bis 1997 liegen die Temperaturabweichungen im Bereich von - 2,2 und + 2,2 σ. Die maximalen Histogramm-Balken liegen im Bereich von - 1 σ, 0 σ und + 1 σ vor. Im Mittel lässt sich zusammenfassen, dass sich die Temperaturanomalien für den Zeitraum von 1987 bis 1997 gemittelt gleichmäßig in Bereichen des Gauß'schen Glockenkurve verteilen. Bei Betrachtung des Zeitintervalls 1998 bis 2008 liegen vermehrt Histogramm-Balken im Bereich von + 0,5 σ bis + 1,5 σ vor. Die wahrscheinlichsten Temperaturabweichungen liegen im Bereich von - 1,8 σ und + 2,3 σ. Im Vergleich zum Zeitintervall 1987 bis 1997 sind diese leicht rechtsverschoben. Dieser Trend lässt sich ebenfalls im Zeitintervall 2009 bis 2019 erkennen. Die Temperaturanomalien liegen im Bereich von - 2 σ und + 2 σ. Die Wahrscheinlichkeitsdichte (Integrale bzw. Intensitätshöhe) steigen im positivem σ Bereich zunehmend leicht an. Die sich leicht abzeichnende Rechtsverschiebung ist im Vergleich zur Stadt Stuttgart nicht so stark und hier mit ebenso mit dem bloßen Auge kaum erfassbar.

Da aus den Darstellungen der Temperaturanomalien sehr schwer eindeutige Trends erkennbar sind, wurde an die Histogramme der jeweiligen Jahresintervalle eine Normalverteilung gefittet. Ein Vergleich der zuvor erwähnten Referenzfunktion in blau wird daher mit den gefitteten Gaußverteilungen der Betrachtungszeiträume 1987 bis 1997, 1998 bis 2008 und 2009 bis 2019 angestellt (siehe *Abbildung 22*).

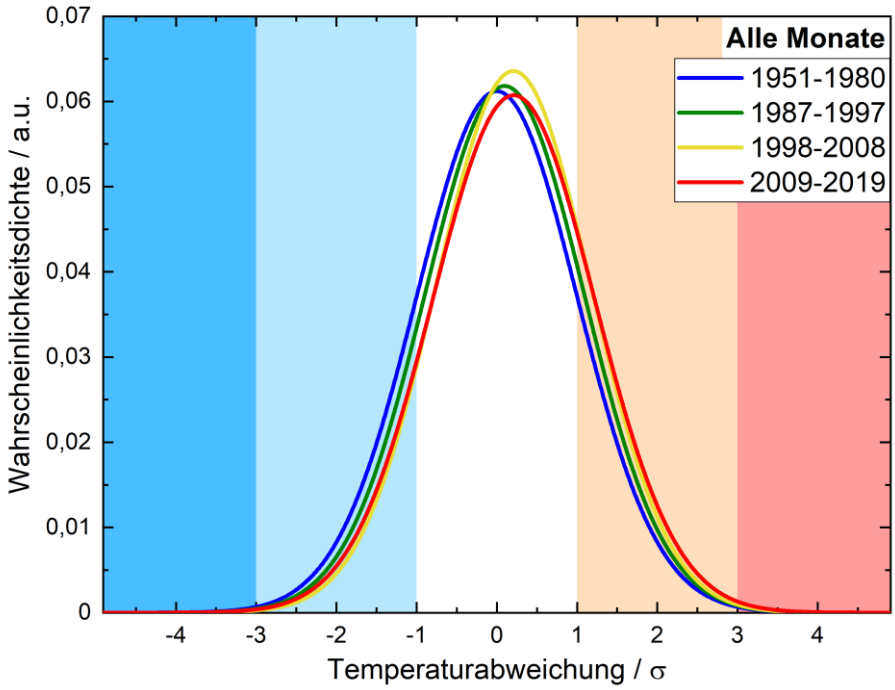

Abbildung 22: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperaturanomalien aller Monate (Januar bis Dezember) der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 6,51968) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte Die Gaußverteilungen sind auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle wurden durch Fitten der Histogramme aus Abbildung 21 mittels Normalverteilung erzeugt.

Der Trend der Rechtsverschiebung zu höheren Temperaturabweichungen in σ im Vergleich zum Basisjahr-Intervall 1951 bis 1980 lässt sich leicht erkennen. Ebenso ist lediglich eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeitsdichte für die Jahre 1998 bis 2008 zu vermerken. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass für die Stadt Schwerin Temperaturdaten von nur einer Messstation vorliegen, sodass die Temperaturschwankungen mehr ins Gewicht fallen und die Änderungen mit größeren Fehlern behaftet sind.

Zum besseren Vergleich wird auch für Schwerin zwischen den kalten Wintermonaten (Dezember, Januar und Februar) und den warmen Sommermonaten (Juni, Juli und August) differenziert (s. *Abbildung 23* und *Abbildung 24*).

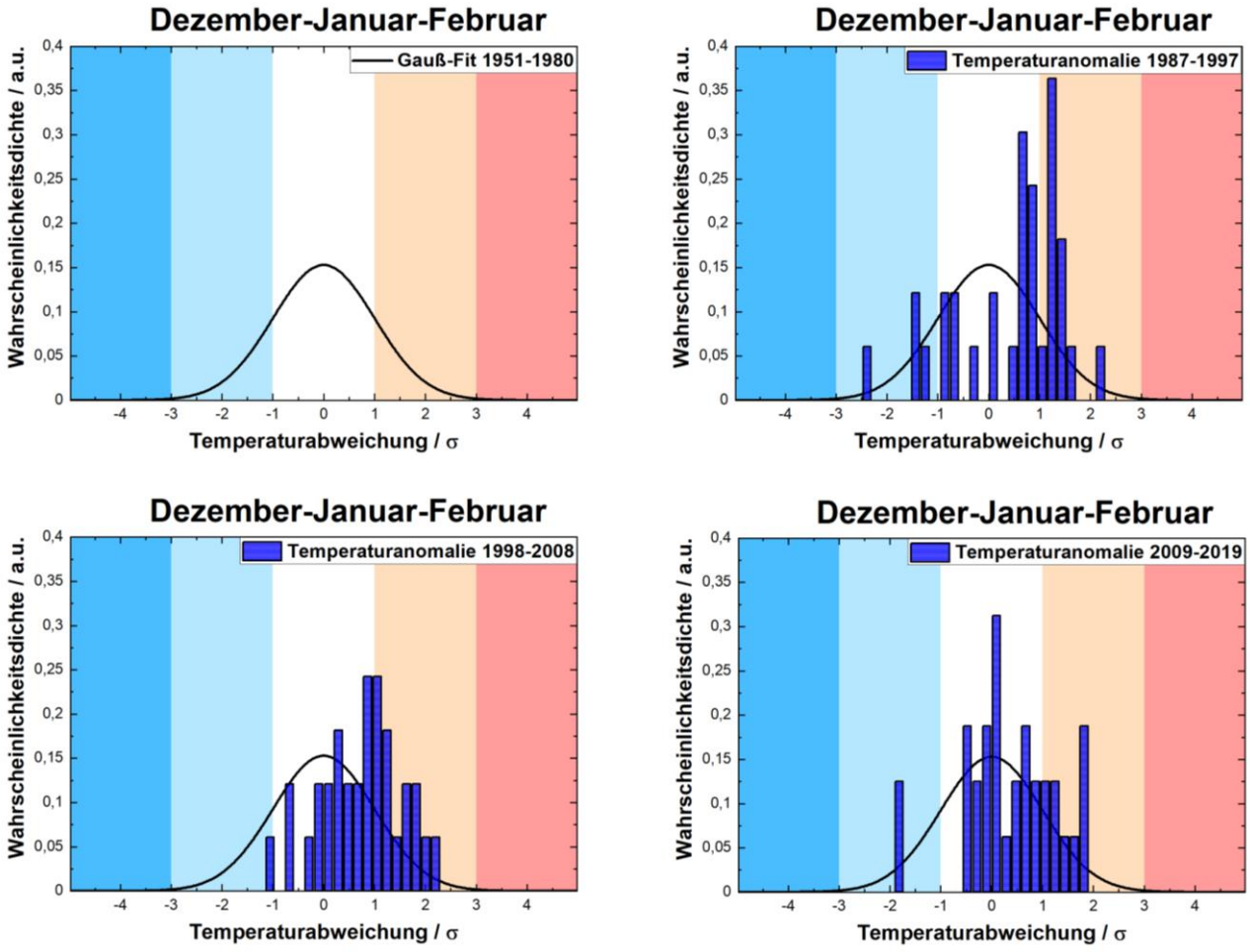

Abbildung 23: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 2,61018) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte. Der Referenz Gauß-Fit ist auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle sind an die Histogramme gefittet. Links oben: Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls 1951 bis 1980; rechts oben: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1987 bis 1997 mit dem Gauß-Fit; links unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1998 bis 2008 mit dem Gauß-Fit; rechts unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 2009 bis 2019 mit dem Gauß-Fit.

Die Temperaturabweichungen für die Wintermonate des Zeitraums von 1987 bis 1997 konzentrieren sich auf den Bereich von - 2,5 σ bis + 2,2 σ. Die Temperaturabweichungen verteilen sich gleichmäßig, jedoch liegen vermehrt Abweichungen mit höherer Wahrscheinlichkeit bei positiven Temperaturabweichungen vor. Die wahrscheinlichste Temperaturanomalie würde hier bei etwa + 0,5 σ liegen. Im Zeitraum von 1998 bis 2009 liegt der Mittelwert der Standardabweichungen der Temperaturanomalien bei ca. + 0,7. Auch für dieses zeitliche Intervall liegen die Wahrscheinlichkeitsdichten im positiven σ-Bereich bei höheren Werten. Die eher rechtsverteilte Anordnung der Histogramm-Balken ist ebenso in dem Zeitintervall 2009 bis 2019 zu erkennen, jedoch ist diese durch einen „Ausreißer“ um - 1,8 σ nicht so ausgeprägt wie für das vorangegangene Intervall. Es wird ersichtlich, dass die Temperaturanomalien der Jahre 1998 bis 2009 mehr von der referenziellen Normalverteilung abzuweichen scheinen als jene der Jahre 2009 bis 2019.

In direkter Analogie zu *Abbildung 16* werden nun lediglich die Wintermonate der vier Jahresintervalle gegenübergestellt (s. *Abbildung 24*).

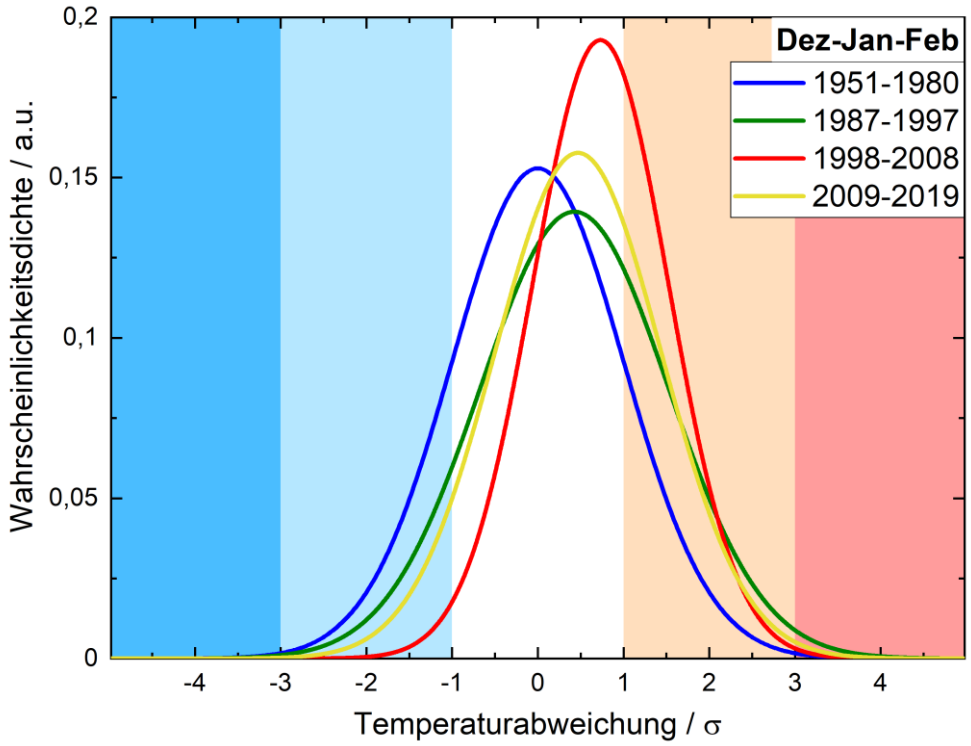

Abbildung 24: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperaturanomalien für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 2,61018) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte Die Gaußverteilungen sind auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle wurden durch Fitten der Histogramme aus Abbildung 23 mittels Normalverteilung erzeugt.

Mit den Jahren ist eine Verschiebung des gefitteten Gauß-Maximums relativ zur Referenzfunktion zu positiven Standardabweichungen ersichtlich. Während die Höhe der Normalverteilungen in den zeitlichen Intervallen von 1987 bis 1997 und von 2009 bis 2019 nahezu gleich sind und sich lediglich in ihren Höhen ändern, ändert sich jene für die Jahre 2009 bis 2019 deutlich in ihrer Lage und Breite. Das Maximum der Jahre 1987 bis 1997 und 2009 bis 2019 liegt bei ca. + 0,5 σ relativ zur Referenz und für die Jahre 1998 bis 2008 bei ca. + 1 σ relativ zur Referenz Gauß-Funktion. Die gefittete Gaußfunktion für das letztere Intervall weist eine um ein Drittel höheren Wahrscheinlichkeitsdicht im Maximum aus als die Funktion für die Basisjahre. Überraschend ist hierbei, dass anders als zu Stuttgart, die größten Abweichungen in den Jahren 1998 bis 2008 zu verzeichnen sind und das gegenwärtigere Intervall von 2009 bis 2019 besser mit den historischen Daten in Einklang zu bringen ist. Eine mögliche Erklärung für diesen Zusammenhang, der wider Erwartungen ist, könnte eine Streuung der Temperaturdaten zu Folge haben, die auf die einzige Messstation in Schwerin zurückzuführen ist.

Im Anschluss werden die Sommermonate Juni, Juli und August betrachtet. Auch hierbei wir zunächst ein Gauß-Fit für das Basisjahr-Intervall 1951 bis 1980 erstellt. Anschließend werden Histogramme der Temperaturanomalien für die entsprechenden Monate der jeweiligen Zeitintervalle hinzugezogen (siehe *Abbildung 25*).

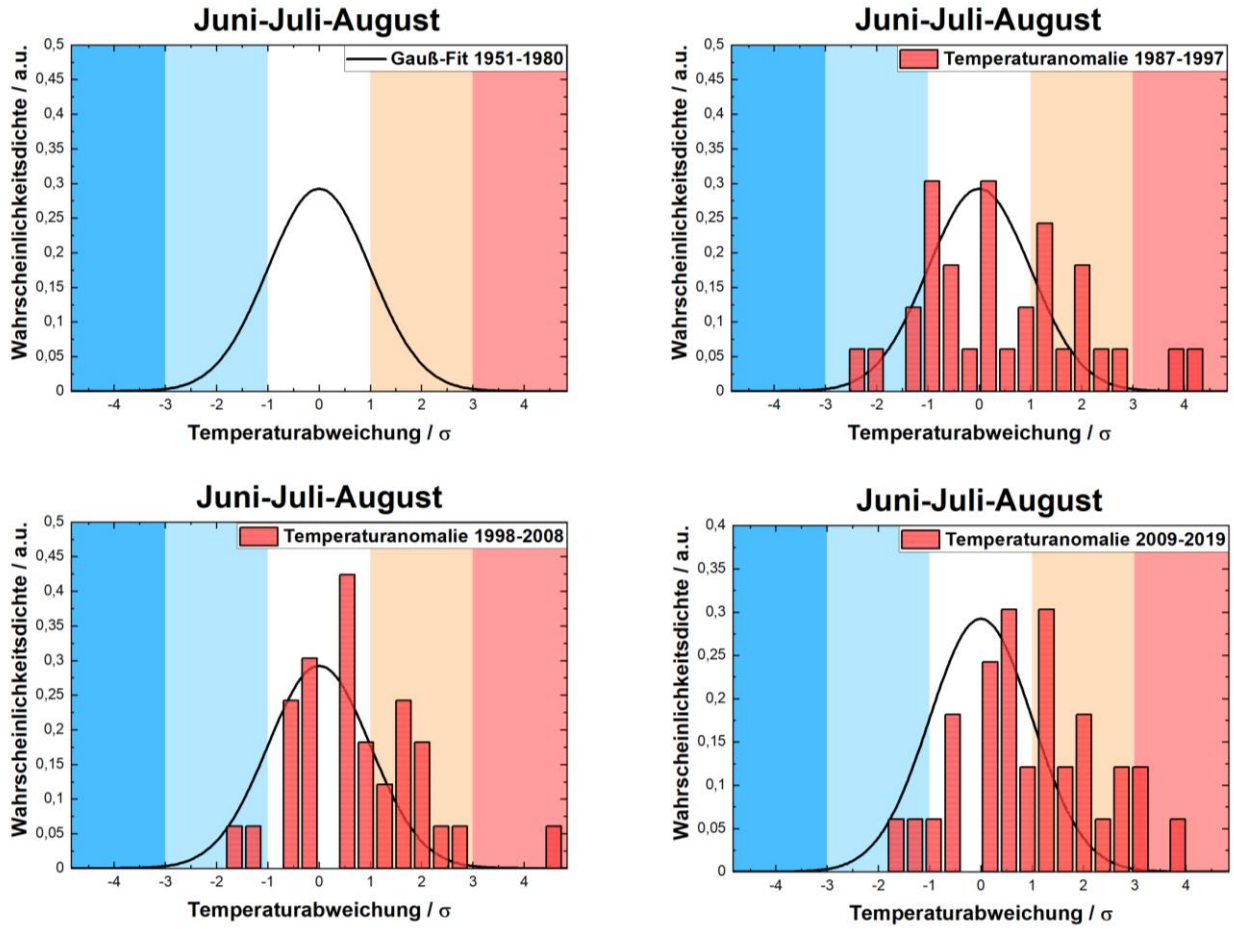

Abbildung 25: Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 1,36431) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte. Der Referenz Gauß-Fit ist auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle sind an die Histogramme gefittet. Links oben: Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls 1951 bis 1980; rechts oben: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1987 bis 1997 mit dem Gauß-Fit; links unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 1998 bis 2008 mit dem Gauß-Fit; rechts unten: Vergleich der Temperaturanomalie der Jahre 2009 bis 2019 mit dem Gauß-Fit.

Die Temperaturabweichungen für das Jahres-Zeitintervall von 1987 bis 1997 liegen in Bereichen von - 2,5 σ bis + 4,2 σ. Maximale Histogramm-Balken liegen hier bei - 1 σ und 0 σ. Darüber hinaus liegen die beiden Histogramm-Balken um + 4 σ außerhalb der referenziellen Gaußverteilung. Im Zeitraum von 1998 bis 2008 liegen die Temperaturanomalien weiter rechtsverschoben in einem Bereich von - 1,8 σ bis + 4,5 σ vor. Die Anzahl und Wahrscheinlichkeit der negativen Temperaturabweichungen ist zum vorherigen Zeitintervall gesunken und es liegen vermehrt positive Temperaturabweichungen vor. Zudem liegt ein Histogramm-Balken sogar über + 4 σ, also deutlich außerhalb der referenziellen Gaußglocke. Das Maximum der Verteilungen der Temperaturanomalien hat sich leicht nach rechts zu + 0,8 σ verschoben. Auch in den Jahren 2009 bis 2009 scheinen positive Temperaturanomalien wahrscheinlicher zu sein, was sich in mehr in höheren Histogramm-Balken bei positiven Standardabweichungen äußert. Die Temperaturabweichungen

begrenzen sich auf den Bereich von - 1,8 σ bis + 4 σ. Das Maximum in diesem Zeitintervall liegt um + 1 σ. Bezüglich der Darstellung von Temperaturanomalien in Form vom Histogramm-Balken, kann diskutiert werden, ob einige dieser starken Abweichungen als Ausreißer gewertet werden können.

Auch wenn die Trends zu positiven Standardabweichungen nicht so eindeutig ersichtlich sind wie für Stuttgart, wird durch das Fitten der Histogramme mittels Normalverteilung dennoch eine Rechtsverschiebung mit den Jahren beobachtet (siehe *Abbildung 26*).

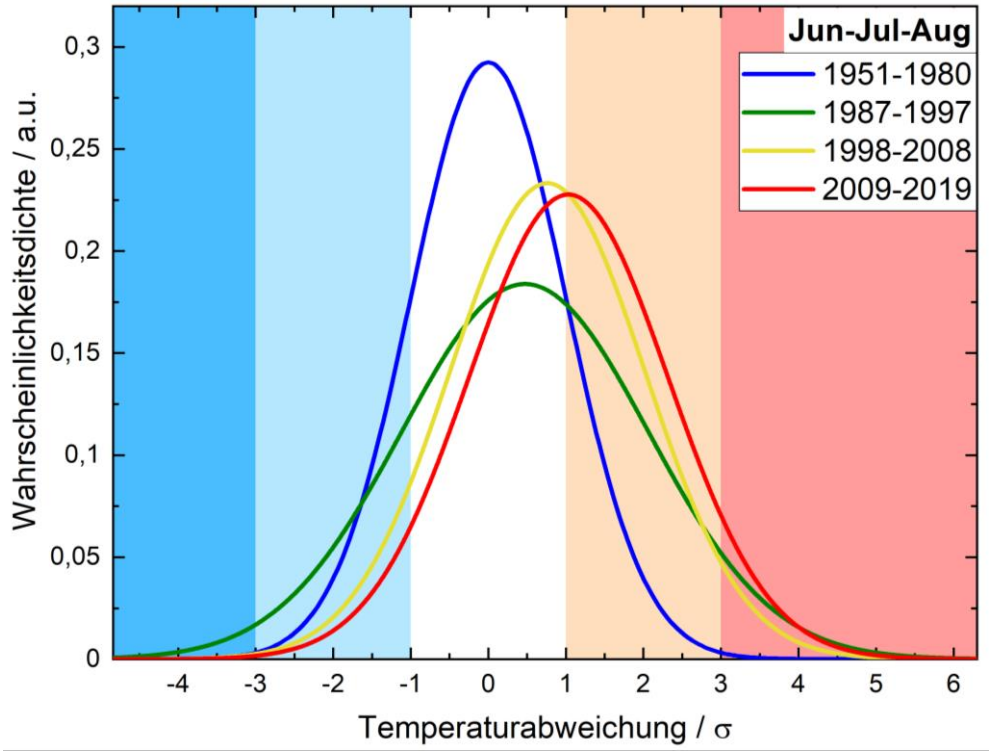

Abbildung 26: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Temperaturanomalien für die Sommermonate Juli, Juni und August der verschiedenen Jahres-Intervalle der Stadt Schwerin im Vergleich mit dem Gauß-Fit des Basisjahr-Intervalls von 1951 bis 1980. Aufgetragen ist auf der Abszisse die Temperatur in Einheiten der Standardabweichung (σ = 1,36431) und auf der Ordinate die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsdichte Die Gaußverteilungen sind auf eine Fläche von 1 normiert. Die Temperaturanomalien der verschiedenen Jahres-Intervalle wurden durch Fitten der Histogramme aus Abbildung 25 mittels Normalverteilung erzeugt.

Das Maximum der gefitteten Gauß-Funktion des Zeitraums von 1987 bis 1997 liegt bei + 0,5 σ. Dieses verschiebt sich nach rechts für die beiden Zeiträume 1998 bis 2009 und 2009 bis 2019 zu einer Temperaturabweichung von + 0,8 σ bzw. + 1 σ. Gleichermaßen wie bei der Betrachtung der Sommermonate für Stuttgart musste auch hier die Skala zu positiven Standardabweichungen erweitert werden. Hier liegt der Grund allerdings nicht in der starken Rechtsverschiebung der Normalverteilungen, sondern in der Breite der Verteilungen, die sich durch stark schwankende Temperaturen in den betrachteten Zeitintervallen als für Stuttgart ergibt.

3.3 Vergleich der Temperaturabweichungen der Städte Schwerin und Stuttgart

In einem Gedankenexperiment wird nun zunächst der eingangs berechnete Referenzwert (1951 bis 1980) für die Stadt Stuttgart (9,19°C; Monatsmittel) verwendet und auf sowohl Stuttgart als auch Schwerin angewendet. Dies soll einen direkten Vergleich für die „totale“ Änderung der Temperatur im Laufe der Jahre zeigen. Demzufolge wurden die Temperaturabweichungen Stadt Schwerin verwendet, mit den Temperaturänderungen der Stadt Stuttgart mit gleichem Basiswert verglichen und gegeneinander aufgetragen (siehe *Abbildung 27*).

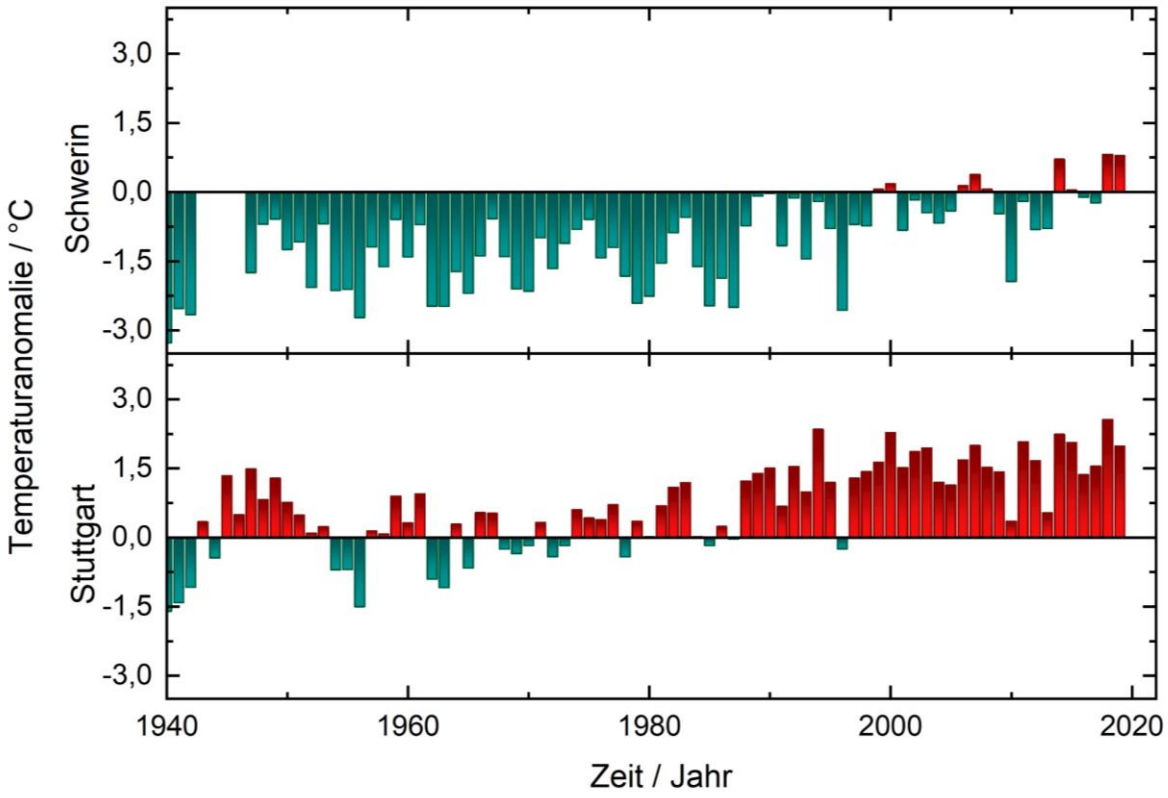

Abbildung 27: Vergleich der Temperaturabweichungen der Städte Schwerin (oben) und Stuttgart (unten) mit dem Basiswert von Stuttgart (Basisjahre 1951 bis 1980, Monatsmittel); Farbkodierung: grün (negative Temperaturänderung Basiswert), rot (positive Temperaturänderung zum Basiswert).

Durch die Nutzung des gleichen Referenzwertes für die Städte Schwerin und Stuttgart können die direkten Temperaturabweichungen diskutiert werden. *Abbildung 27* zeigt den deutlichen Unterschied der Temperatur der beiden Städte. Im Gegensatz zur Stadt Stuttgart übersteigt Schwerin lediglich für wenige Jahre den Referenzwert der Basisjahre 1951 bis 1980 der Stadt Stuttgart. Diese Erkenntnis bestätigt bereits die Annahme, dass die Stadt Stuttgart einen deutlich stärkeren Temperaturanstieg im Laufe der Jahre als die Stadt Schwerin aufweist.

In einem zweiten Gedankenexperiment wurde der Referenzwert für Schwerin (8,24°C; Monatsmittel) zur Berechnung der relativen Temperaturänderungen der Stadt Stuttgart verwendet, mit den Temperaturänderungen der Stadt Schwerin mit gleichem Basiswert verglichen und die Diagramme gegeneinander aufgetragen (siehe *Abbildung 28*).

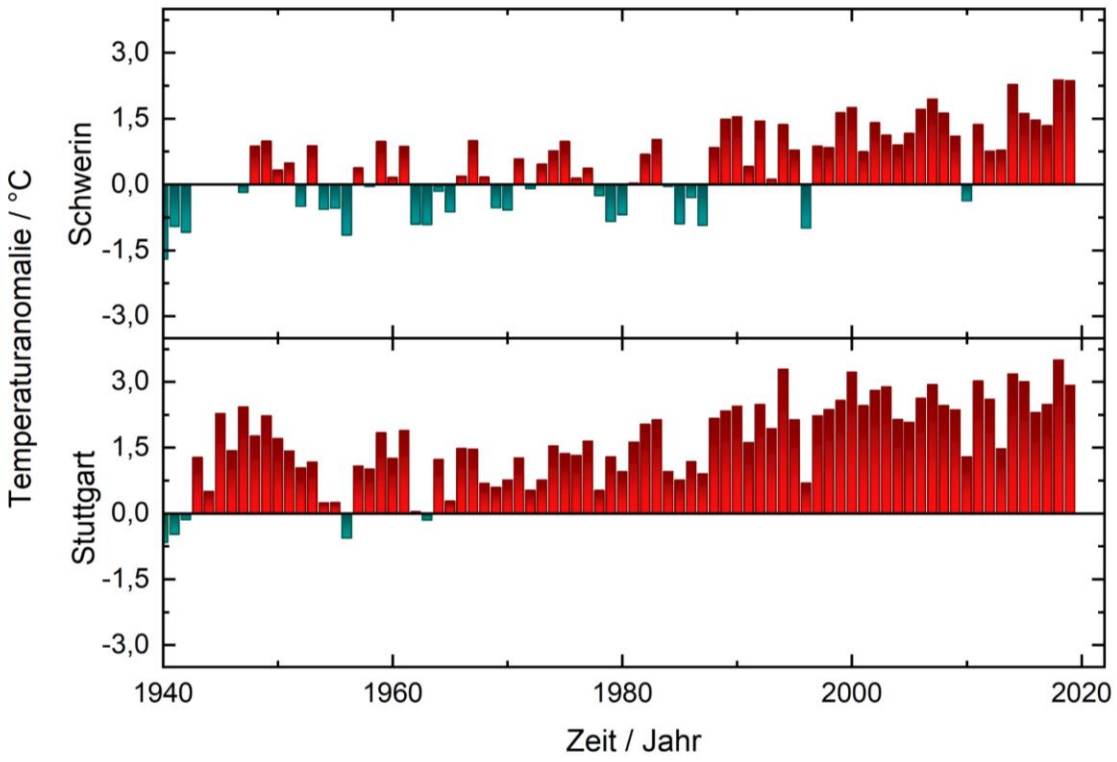

Abbildung 28: Vergleich der Temperaturabweichungen der Städte Schwerin (oben) und Stuttgart (unten) mit dem Basiswert von Schwerin (Basisjahre 1951 bis 1980, Monatsmittel); Farbkodierung: grün (negative Temperaturänderung Basiswert), rot (positive Temperaturänderung zum Basiswert).

Durch die Nutzung des gleichen Referenzwertes für die Städte Schwerin und Stuttgart können die direkten Temperaturabweichungen und deren Vergleiche mit der Nutzung des Referenzwertes der Stadt Stuttgart diskutiert werden. Bei Nutzung des Referenzwertes von Schwerin, der ca. 1°C niedriger als der von Stuttgart ist, wird bei der Stadt Stuttgart nahezu in jedem Jahr der Referenzwert überschritten. Für die Stadt Schwerin variiert die Abweichungen in den Jahren 1940 bis 1990 noch nahezu linear um den Referenzwert, und steigt dann exponentiell ab dem Jahr 1991 stark an.

Diese Erkenntnisse zeigen auf, dass die Nutzung von absoluten Temperaturen im direkten Vergleich von Städten eher kritisch zu betrachten ist. Der Basiswert für die Referenzjahre variieren stark von Stadt zu Stadt. Dennoch lassen diese Vergleiche Aussagen darüber treffen, dass die zu Beginn dieser Semesterarbeit aufgestellten Hypothese, dass das Klima der Stadt Stuttgart deutlich schlechter ist als das der Stadt Schwerin, beweisen werden kann.

Ein weiterer Vergleich beider Städte kann hinsichtlich der jahresmittleren Durchschnittstemperatur angestellt werden. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, liegt laut dem *Robert Koch Institut* das Jahresmittel von 1901 bis 2009 der bodennahen Lufttemperatur in Deutschland bei 9, 5 °C.[4] Für denselben Zeitraum liegt die gemittelte Temperatur für Stuttgart bei 9,6 °C und für Schwerin bei 8,5 °C. Dieser große Unterschied beider Temperaturen um mehr als 1 °C unterstreicht die regionalen Unterschiede der Temperaturen, welcher u.a. durch die geographische Lage bedingt ist. Dennoch liegt Schwerin im Mittel 1°C unterhalb der deutschen Durchschnittstemperatur. Diese starke negative Abweichung lässt vermuten, dass es neben Stuttgart weitere Städte geben muss, die ein überdurchschnittlich hohes Jahresmittel aufweisen.

Im Rahmen der Auswertungen nach *Hansen* und *Sato* ist ein Vergleich der Wahrscheinlichkeiten der Temperaturanomalien aller Monate eines Jahres der verschiedenen Jahres-Intervalle (s. *Abbildung 13* und *Abbildung 21*) beider Städte wenig aussagekräftig, da sich sowohl für Stuttgart als auch für Schwerin nahezu symmetrische Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Histogramm-Balken zu negativen und positiven Standardabweichungen ergeben haben. Gemeinsam haben aber beide Datensätze, dass die Standardabweichung der Temperaturanomalien aller Monate eines Jahres, entsprechend der Erwartungen, am größten sind. Dies kann damit begründet werden, dass hier die meisten Daten zur Analyse einfließen und daher der mittlere Fehler am größten ist. Weiterhin sind die Größenordnungen aller berechneten Standardabweichungen vergleichbar. Beide Städte haben für die Wintermonate eine größere Standardabweichung als für die Sommermonate. Dennoch sind die Standardabweichungen für Schwerin geringfügig größer, was durch fehlende Mittelwertbildungen aufgrund von nur einer Messstation zu begründen ist. Außerdem kann die kleinere Größenordnung der Standardabweichung für Sommermonate relativ zu Wintermonaten ebenfalls verstanden werden, da im Sommer tendenziell nur positive Abweichungen/ Streuungen zur wahrscheinlichsten Temperatur auftreten, wohingegen im Winter vergleichsweise keine solch eindeutigen Trends beobachtbar sind.

Abschließend kann in diesem Kapitel festgehalten werden, dass ein Vergleich der Städte Stuttgart und Schwerin gelungen ist und erste Anzeichen auf Regionen mit stärkeren Abweichungen und solchen mit weniger starken Abweichungen bezüglich der bodennahen Lufttemperatur gibt.

4 Diskussion

In diesem Abschnitt gilt es die durchgeführten Analysen der Temperaturdaten zu validieren und die daraus erhaltenen Ergebnisse im Zusammenhang mit dem (anthropogenen) Klimawandel zu diskutieren.

4.1 Nutzung von Temperaturdaten zur Analyse des Klimawandels?

Die Nutzung von Temperaturdaten zur Analyse des Klimawandels wird stark diskutiert. Leugner des globalen Klimawandels berufen sich häufig auf Durchschnittstemperaturen bzw. Temperaturabweichungen der Ozeane. Diese Temperaturdaten unterscheiden sich jedoch stark von denen über den Landmassen. Durch die verschiedenen Wetterstationen und Nutzung einer Vielzahl von Wetterstationen zur Mittelung der Temperaturen können diese Unterschiede gemindert werden, jedoch sollte stets berücksichtigt werden, dass die Wahl des Standortes einen starken Einfluss auf die abschließenden Schlussfolgerungen und Ergebnisse nehmen kann. Die Klimaänderungen sind durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Neben den natürlichen Einflussfaktoren, wie den Treibhausgasen oder Klimakatastrophen (Vulkanausbrüche), gibt es auch anthropogene Einflussfaktoren, wie die starke Zunahme der Weltbevölkerung und die politischen Klimaverhandlungen.[4] Aufgrund dieser vielen Einflussfaktoren ist die direkte Bestimmung des Faktors, der für die Temperaturabweichung verantwortlich ist, nahezu unmöglich.

Ebenso sollte diskutiert werden, ob die Temperatureffekte zu kleinräumig betrachtet wurden. Allein der Vergleich der beiden Städte Schwerin und Stuttgart, die lediglich durch ca. 560 km Luftlinie voneinander getrennt sind, haben sich große lokale Unterschiede ergeben. Das statistische Rauschen ist hier recht groß, je geringer die Anzahl der Messstationen einer Stadt ist, die berücksichtigt wurden. Daher sollte als mögliche Fehlerreduktion die Betrachtung im Umkreis liegender Städte des gleichen Klimabereichs mitberücksichtigt werden. Des Weiteren konnte der Vergleich der Städte Schwerin und Stuttgart zeigen, dass die Wahl der Basisjahre und die Nutzung von einem gemittelten Basiswert für jede Stadt kritisch betrachtet werden sollte. Während Stuttgart einen Basiswert von 9,19 °C für die Basisjahre 1951 bis 1980 besitzt (Monatsmittel), liegt dieser für die gleichen Basisjahre für die Stadt Schwerin bereits deutlich unterhalb bei einem Basiswert von 8,24 °C (Monatsmittel). Dieser deutliche Unterschied der städtischen Basiswerte macht einen direkten Vergleich deutlich schwieriger. Ebenso ist die Wahl der Basisjahre verantwortlich dafür, welcher Basiswert für die Analyse genutzt wird. Der in dieser Semesterarbeit genutzte Basisjahr-Zeitraum von 1951 bis 1980 wurde durch die erhöhte Anzahl an Stationen und Temperaturdaten in diesem Bereich ausgewählt. Dennoch sollte stets beachtet werden, welche Basisjahre verwendet wurden. Durch die Vielzahl an

Faktoren, die die Temperatur beeinflussen, wird deutlich, dass der Vergleich und die Aussagen von verschiedenen Klimadaten in den Medien und von Instituten und Klimadiensten stets hinterfragt werden sollten und die Parameter vorerst verglichen werden sollten, bevor vergleichende Aussagen getroffen werden können. Neben dem Basisjahr und der Mittelung der Daten ist der örtliche Bezugspunkt, wie etwa eine Stadt oder die Betrachtung eines ganzen Landes, von großer Bedeutung und führt zu unterschiedlichen Aussagen. Ein weiteres Problem stellt die Irrtumswahrscheinlichkeit der regionalen Betrachtung der Temperaturdaten dar. Die Klimaschwankungen innerhalb einer Region fallen deutlich stärker aus als bei einer Betrachtung von nationalen Temperaturdaten. Diese Problematik wurde auch in der Literatur nach *Hansen* und *Sato* stark kritisiert.[22]

Darüber hinaus bietet bereits der Grundstein der durchgeführten Analysen eine nicht vernachlässigbare Fehlerquelle: Die Qualitätsniveaus der erhobenen Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes. Diese haben sich mit fortschreitender Technik mit der Zeit kontinuierlich hinsichtlich der Genauigkeit und Belastbarkeit der Messgeräte verbessert. Sowohl die fünf Messstationen von Stuttgart als auch die eine Messstation von Schwerin registrieren bis 1980 Temperaturdaten mit der Bezeichnung „QN 5“, was bedeutet, dass es sich um historische Temperaturdaten handelt, die mithilfe subjektiver Verfahren erhoben wurden. Wie genau diese subjektiven Verfahren durchgeführt wurden, ist nicht weiter hinterlegt. Dennoch fällt dieses fehleranfällige Verfahren genau in dem Zeitraum der gewählten Basisjahre und könnte zu einem systematischen Fehler oder zu zufälligen Fehlern in der anschließenden Auswertung führen. Bis 2015 wurden jedoch für Stuttgart überwiegend Temperaturen mit dem Qualitätsniveau „QN 10“ aufgezeichnet, was für eine Qualitätsprüfung und beendete Korrektur spricht. Ab 2015 erfolgt die Aufnahme der Temperaturdaten automatisiert und wird mit „QN 3“ gekennzeichnet. Ähnliches ist für Schwerin festzustellen, wobei hier abweichend von Stuttgart im Jahr 2014 Temperaturdaten mit „QN 4“ aufgezeichnet wurden. Bei diesem Qualitätsniveau wurden nicht alle Parameter korrigiert, jedoch trifft dies lediglich für ein Jahr zu. Kritischer sind daher der Erste und Zweite Weltkrieg von 1914 bis 1918 bzw. von 1939 bis 1945. Besonders deutlich ist dies für Schwerin festzumachen, da von 1943 bis 1946 keine Temperaturdaten aufgenommen wurden (s. *Abbildung 8*). Dies ist ein weiterer Grund für die Wahl des Referenzzeitraums von 1950 bis 1980.

4.2 Gibt es den anthropogenen Klimawandel wirklich?

Die größte Herausforderung für die allgemeine Anerkennung des anthropogenen Klimawandels ist u.a. die natürliche Variabilität des lokalen Klimas. Daher fällt es vielen schwer beim lokalen Klima, unter Berücksichtigung dieser Variabilität, einen langfristigen vom Menschen gemachten Klimawandel zu erkennen. Zur Untersuchung des Einfluss des

anthropogenen Klimawandels hat das IPCC (*Intergovernment al Panel on Climate Change*) die Temperaturdaten resultierend aus rein natürlichen Parametern (Sonne, Naturkatastrophen etc.) mit den Daten aus natürlichen und anthropogenen Parametern vergleichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der natürlichen und anthropogenen Parameter die realen Temperaturen besser beschreiben.

„Die beobachtete zeitliche Entwicklung der global gemittelten Temperatur ist seit etwa 1975 nur noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % (bei einseitiger statistischer Hypothesenformulierung) vereinbar mit einer natürlichen Klimavariabilität. Damit beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit im Hinblick auf einen anthropogen bedingten rezenten Klimawandel ebenfalls 10 %." (Zitiert aus Ref. [4])

Diese Erkenntnis zeigt auf, dass nicht mehr lediglich die natürlichen Faktoren das Klima beeinflussen. Die anthropogenen Faktoren, d.h. die durch den Menschen bedingten Faktoren, sind in den letzten Jahrzehnten verstärkt mit für den Klimawandel verantwortlich. [4]

Damit zusammenhängend gibt es unumstößliche Messdaten, die ebenfalls auf einen anthropogenen Klimawandel hindeuten. So würde bei einem rein natürlichen Treibhauseffekt der Anstieg des Wasserdampf-Gehalts in der Atmosphäre überwiegend ansteigen. Bei einem anthropogenen Treibhauseffekt überwiegt hingegen der Anstieg des CO_2-Gehalts im Vergleich zu anderen atmosphärischen (Spuren)-Gasen stark. Dies lässt sich damit begründen, dass die Menge an H_2O, die durch Verbrennungsprozesse freigesetzt wird, sehr klein ist im Vergleich zur Menge an Wasserdampf, die sich bereits in der Atmosphäre befindet. Der Wasserdampfgehalt wird hauptsächlich durch die Verdampfung von Wasser bestimmt. Die anthropogenen Emissionen an CO_2 sind dagegen zum „Inventar" in der Atmosphäre ziemlich groß. Doch nicht nur der in *Abbildung 1* gezeigte exponentielle Anstieg des CO_2-Gehalts ist dramatisch und noch nie zuvor beobachtbar gewesen. Anstiege der Methan- und Stickoxidkonzentrationen in der Atmosphäre laufen parallel zu dem des Kohlenstoffdioxids. Auch Methan (CH_4) und Stickoxide (NO_x) haben (u.a.) einen anthropogenen Ursprung. So ist mittlerweile bekannt, dass CO_2, CH_4 und NO_x nicht untereinander korreliert sind, sondern jeweils mit der Erdbevölkerung, d.h. einen eindeutigen anthropogenen Ursprung haben.[2]

4.3 „Der Klimawandel betrifft uns hier doch gar nicht…"

Der Klimawandel ist stets ein stark diskutiertes politisches und weltweites Thema. Die Problematik hinter dieser Diskussion liegt darin, dass die Menschen, die im globalen Süden der Erde leben, am wenigsten zum Anstieg der globalen Temperatur und den Treibhauseffekt beitragen, jedoch am stärksten vom Klimawandel betroffen sind. In diesen Regionen folgen die maximalen Abweichungen vom lokalen Mittelwert. Besonders die Regionen um Süd-Afrika

und dem Regenwald von Afrika sind am stärksten betroffen. In diesen Regionen sind die Menschen ebenso deutlich höherer Armut unterliegen und der Lebensstandard liegt deutlich unter dem zum Beispiel in Deutschland. Ebenso leben dort deutlich mehr Menschen auf engem Raum als in den europäischen Ländern. Diese Problematik macht das Thema des Temperaturanstiegs bzw. des Klimawandels nicht mehr nur zu einem rein politischen und wirtschaftlich diskutierten Thema, sondern zunehmend auch zu einem sozialen Thema. Die armen Menschen, die dem Unwetter stark unterlegen sind, trifft der Klimawandel am stärksten. Diese Problematik korreliert stark mit dem eigenen Verantwortungsbewusstsein des Einzelnen sich mit dem Umweltschutz mehr zu beschäftigen, um zu verstehen, dass jeder etwas zum Klimaschutz beitragen kann und nun auch muss. Denn nur gemeinsam kann man dieses Ziel erreichen. Das Ziel den Klimawandel heute, und nicht morgen zu „stoppen“. Wir sind für unsere derzeitigen und zukünftigen Generationen mitverantwortlich. Der Slogan „Planet Earth First- unsere Zukunft entscheidet sich JETZT“ von Greenpeace beschreibt diese Dringlichkeit sehr gut. Wir müssen jetzt, und nicht morgen etwas ändern.

Vielen Menschen ist bedauerlicherweise nicht klar, dass solch eine simple Messgröße, wie die Temperatur, bereits bei kleinen Änderungen des Durchschnittwerts dramatische Auswirkungen auf das Leben auf diesem Planeten hat. Um dies zu verdeutlichen wird kurz über *Kippelemente im Erdklimasystem* diskutiert. Als sogenanntes Kippelement (engl. *Tipping Element*) wird ein überregionaler Bestandteil des globalen Klimasystems bezeichnet, der bereits durch geringe äußere Einflüsse in einen neuen Zustand versetzt werden kann, wenn er einen „Kipp-Punkt“ (engl. *Tipping-Point*) erreicht hat. Dieser neue erreichte Gleichgewichtszustand des Klimas ist weit entfernt vom ursprünglichen Zustand und der Weg dorthin ist meist irreversibel.[23]

Beispiele für Oberflächentemperatur-Kippelemente sind (beispielhaft) das Abschmelzen der Polkappen oder die Veränderung der *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO). Allein ein vollständiges Abtauen des Grönländischen Eisschildes würde zu einer Erhöhung des Meeresspiegels um etwa 7 m führen. Bereits weniger als ein Meter Anstieg des Meeresspiegels würde reichen, damit selbst Deutsche die Folgen des Klimawandels Wort wörtlich „vor der eigenen Haustür“ sehen würden. Allein ein Anstieg des Meeresspiegels um 20 cm würde dazu führen, dass weite Teile der nördlichen Niederlande, viele ost- und westfriesischen Inseln, sowie Hamburg und Bremen überflutet sein werden.[2]

Auch an dieser Stelle kann erneut betont werden, dass der Klimawandel jeden betrifft, auch wenn für viele derzeit kein Handlungsbedarf besteht. Die eben erwähnten Kippelemente sind zwar noch nicht hinreichend untersucht worden, dennoch ist bekannt, dass für viele die Auslösungstemperatur bei 1,5 °C liegt.[23]

4.4 Gibt es ein alternatives und besseres Verfahren für die Klimaanalyse?

Die reine Temperaturdatenanalyse stößt aufgrund der vielen beeinflussenden Parameter schnell an ihre Grenzen. Diese Grenzen wurden auch bei der hier aufgeführten Analyse der Städte Stuttgart und Schwerin deutlich. Daher sollte nach alternativen Temperaturanalysen gesucht werden.

Die reinen Temperatursimulationen im Labor, wie erstmals durch *Ångström*, durchgeführt wurden, konnten schnell nicht mehr die realen Temperaturen wiedergeben. Heute werden häufig Klimasimulationen mit mehreren Simulationsläufen durch geänderte Anfangsbedingungen durchgeführt, um so die natürlichen und anthropogenen Folgen der Klimaänderungen besser abbilden zu können. Durch diese Vielzahl von Simulationsläufen werden diese auch häufig als „Multimodellensemble“ bezeichnet.[4]

Dennoch sollte berücksichtigt werden, dass solche Simulationen keine weit in die Zukunft gehenden Vorhersagen über das Klima machen können. Die Komplexität der Einflussfaktoren und die Nichtlinearität der Schwankungen und Fehler sind hier als mögliche Gründe aufzuzählen.[4]

5 Fazit und Ausblick

Neben den in Kapitel 3.3 ausgeführten Vergleichen der beiden Städte untereinander konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass sich die Verteilung der saisonalen mittleren Temperaturanomalien zu höheren Temperaturen verschoben hat und der Bereich der Anomalien mit der Zeit zunimmt. Diese Aussage kann besonders für die Analyse der Temperaturdaten für die Sommermonate von Stuttgart bestätigt werden und entspricht den Beobachtungen von *Hansen* und *Sato*. Dennoch muss angemerkt werden, dass die Entwicklung der gefitteten Gaußfunktionen mit den Zeitintervallen zwar zumeist breiter und zu positiven Standardabweichungen relativ zu referenziellen Glockenkurve verschoben sind, jedoch in ihren Ausmaßen deutlich kleiner sind als jene Trends bei *Hansen* und *Sato*.

Im direkten Vergleich zur Stadt Stuttgart, ist die Rechtsverschiebung der Temperaturabweichungen für die Stadt Schwerin nicht so stark ausgeprägt. Ebenso lässt sich der Trend der Zunahme der Temperatur mit den Jahren der Stadt Stuttgart nicht auf die Stadt Schwerin übertragen. Während die Temperaturabweichung für die Stadt Stuttgart im Jahreszeitraum 2009 bis 2019 die größten Temperaturanomalien aufweist, liegen die höchsten Abweichungen für die Stadt Schwerin im Jahreszeitraum 1998 bis 2008.

Auch wenn für beide deutsche Städte die Verschiebung der gefitteten Gaußfunktionen in Richtung positiver Standardabweichungen zum Referenzwert gering erscheinen, sollte dies ein Anstoß dafür sein, dass der Menschheit die Zeit abläuft, den Klimawandel noch zu stoppen bzw. die Auswirkungen der letzten Jahrzehnte noch zu minimieren. Die Geschwindigkeit und das Maß des Temperaturanstiegs der letzten Jahre ist dramatisch und nicht mit natürlichen und periodisch wiederkehrenden Ereignissen wie z.B. den *Milanković-Zyklen* erklärbar. Der Klimaschutz sollte näher in den Fokus der Politik und das Handeln jedes Einzelnen gerückt werden. Das gesetzte Klimaziel des Pariser Abkommens, die Temperatur unter einer Erhöhung von + 1,5 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu halten, ist zwar nahezu überschritten (aktuell + 1,2°C), aber wir können und müssen noch heute etwas daran ändern, dieses Ziel noch zu erreichen.

Wenig überraschend, aber dennoch wichtig an dieser Stelle zu erwähnen ist, dass die zuvor getroffene Annahme bezüglich des vermeintlich schlechteren Klimas (hier eher höherer Temperaturanstieg) der Stadt Stuttgart im direkten Vergleich zur Stadt Schwerin anhand der erstellten Grafiken und Ergebnissen bestätigt werden kann.

Mithilfe der Analyse der Temperaturentwicklung einer Stadt, konnte zudem aufgezeigt werden, dass bei einer regionalen Betrachtung der Temperatur die Streuung dieser sehr stark ausfallen kann und in Abhängigkeit des Standorts der Messstation variiert. Besonders bei der Temperaturanalyse der Stadt Schwerin, welche lediglich Temperaturdaten einer Messstation

beinhalten, ist die Streuung der Glockenkurven stark ausgeprägt. Diese Erkenntnisse sind in guter Übereinstimmung mit der Analyse nach *Hansen* und *Santo*, die ebenfalls (*„noisy“*) Glockenkurven mit höheren Streuungen bei der Betrachtung von regionaleren Temperaturdaten erhielten.[22] Für den konkreten Fall sollten hier ein paar Messstationen aus dem Umkreis von Schwerin zur Analyse hinzugezogen werden. Dies hätte aber in unserem Fall den zeitlichen Rahmen und Aufwand dieser Semesterarbeit überschritten. Um Streuungen zu minimieren, sollte zukünftig eine breitere Betrachtung der Region oder sogar Bundesländern für die Temperaturanalyse betrachtet werden, um verlässlichere Aussagen über die Temperaturentwicklung im Zeitverlauf machen zu können. Zudem beschränken sich die Auswertungen dieser Arbeit lediglich auf Landtemperaturen, was ebenfalls zu verzerrten Ergebnissen führen kann, da die Landmassen deutlich wärmer sind als Meere. An dieser Stelle kann auch die „extremere“ Temperatur in Stuttgart aufgrund der Lage im Stuttgarter Talkessel verstanden werden, durch die sich die Land- und Luftmassen stärker und „ungehindert“ aufwärmen können.

Über diese Arbeit hinaus wäre ein Zusammentragen der Ergebnisse anderer Gruppen mit diesem Thema sinnvoll. Ein direkter Vergleich von mehr als nur zwei deutschen Städten lässt weitere Interpretationen und Schlussfolgerungen zu. Auch dies könnte für abschließende Aussagen nicht genügen, da *Hansen* und *Sato* beispielsweise sogar die gesamte Nord- und Südhemisphäre für ihre Ausführungen betrachtet haben.

Neben der ausschließlichen Betrachtung der Temperatur, die ein wichtiger Parameter für die direkte Beurteilung des Klimawandels ist, sollten in folgenden Arbeiten weiterführende Analysen zu Größen durchgeführt werden, die direkt mit der Temperatur korrelieren. So wäre es u.a. interessant eine graphische Aufbereitung der CO_2-Konzentration der Stadtluft von Schwerin und Stuttgart im Laufe der Zeit darzulegen. Je mehr Parameter ausgewertet und verglichen wurden, desto mehr Argumente können für den (anthropogenen) Klimawandel gebracht werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Auswertungen sehr kleinräumig, also regional erfolgten und sich lediglich auf die Landtemperatur bezogen wurde. Der Deutsche Wetterdienst bietet neben der bodennahen Lufttemperatur noch andere Datensätze wie u.a. Bodentemperatur und Luftfeuchte. Für ein abschließendes und aussagekräftigeres Fazit sollten daher mehrere Parameter neben der Temperatur graphisch aufgearbeitet werden.

6 Literaturverzeichnis

[1] Universität Kassel: Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, "Praktikumsskript: Thermische Messtechnik. Teil 1: Temperaturmessung".

[2] Prof. Dr. M. Schmitt, *Vorlesungsskript*, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf, **Wintersemester 2020/21**.

[3] "Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - G - Globale-Durchschnittstemperatur", zu finden unter: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/3/034009/pdf. Zuletzt geprüft am: 11.11.2020.

[4] D. Eis, D. Helm, D. Laußmann, K. Stark, *Klimawandel und Gesundheit*. *Ein Sachstandsbericht*, Berlin, **2010**.

[5] "Global Temperature Report for 2019 - Berkeley Earth", zu finden unter: http://berkeleyearth.org/archive/2019-temperatures/. Zuletzt geprüft am: 15.12.2020.

[6] "Feinstaub und Stickoxide in Stuttgart: Fakten im Check", zu finden unter: https://reportage2.stuttgarter-zeitung.de/feinstaub/. Zuletzt geprüft am: 08.12.2020, 19:17 Uhr.

[7] Rainer Kapp, "Stadtklima Stuttgart | 8.4 Anzahl der Tage mit Schwüle (Karte-XII) | 8. Klimakarten", zu finden unter: https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_klimaatlas_klimakarten-k12. Zuletzt geprüft am: 10.12.2020, 21:27 Uhr.

[8] "Stadtchronik & Stadtgeschichtliche Sammlungen - Landeshauptstadt Schwerin", zu finden unter: https://www.schwerin.de/kultur-tourismus/kunst-kultur/volkshochschule-literatur-bibliotheken-archive-00001/stadtarchiv/stadtchronik-stadtgeschichtliche-sammlungen/. Zuletzt geprüft am: 10.12.2020, 21:15 Uhr.

[9] "Schwerin radelt zum siebten Mal für ein gutes Klima - Klima-Bündnis-Kampagne STADTRADELN startet am 14. September - Landeshauptstadt Schwerin", zu finden unter: https://www.schwerin.de/news/246cb8de-ecfc-11ea-9983-1967de695b51/. Zuletzt geprüft am: 08.12.2020, 19:20 Uhr.

[10] Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für, "Kohleausstieg und Strukturwandel", zu finden unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/kohleausstieg-und-strukturwandel.html. Zuletzt geprüft am: 11.12.2020, 21:12 Uhr.

[11] K. Ångström, "Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre", *Ann. Phys.* **1900**, *308*, 720.

[12] D. E. Koelle, "Beweise für die Unwirk-samkeit von CO2 bei der Klima-Entwick-lung", zu finden unter: https://www.eike-klima-energie.eu/2017/07/08/beweise-fuer-die-unwirksamkeit-von-co2-bei-der-klima-entwicklung/. Zuletzt geprüft am: 08.12.2020, 19:41 Uhr.

[13] "Abkommen von Paris", zu finden unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html. Zuletzt geprüft am: 08.12.2020, 19:45 Uhr.

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group 1, Science, Change, *Climate change 2007*. *The physical science basis; contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge Univ. Pr, Cambridge, Mass., **2007**.

[15] Zweites Deutsches Fernsehen, "Neue Lkw-Maut kommt - mit Fokus auf CO2", *Politik* **2020**.

[16] "Climate Data Center. Mapview Stuttgart", zu finden unter: https://www.bundestag.de/resource/blob/805260/53df18dcfba9e0b515f8c56d495fb4a1/WD-8-014-20-pdf-data.pdf. Zuletzt geprüft am: 08.12.2020, 22:35 Uhr.

[17] "Climate Data Center. Mapview Schwerin", zu finden unter: https://cdc.dwd.de/portal/202007291339/mapview. Zuletzt geprüft am: 08.12.2020, 22:29 Uhr.

[18] "DATENSATZBESCHREIBUNG. Tägliche Stationsmessungen der Sonnenscheindauer in Stunden für Deutschland", *Version v19.3 & recent*.

[19] "Temperaturmessung. LEXIKON DER GEOWISSENSCHAFTEN", zu finden unter: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/temperaturmessung/16401. Zuletzt geprüft am: 10.12.2020, 20:46 Uhr.

[20] F.-L. Averdunk, "Deutscher Bundestag - Beeindruckt von Klima-streiks der „Fri-days for Future“-Bewe-gung", zu finden unter: https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2019/kw11-de-aktuelle-stunde-klimastreiks-628294. Zuletzt geprüft am: 20.12.2020, 17:04 Uhr.

[21] "Experten erwarten weitere Zusagen auf UN-Klimagipfel | MDR.DE. Virtuelle Konferenz", zu finden unter: https://www.mdr.de/nachrichten/politik/ausland/un-klima-gipfel-experten-erwarten-zusagen-100.html. Zuletzt geprüft am: 20.12.2020, 17:08 Uhr.

[22] J. Hansen, M. Sato, "Regional climate change and national responsibilities", *Environ. Res. Lett.* **2016**, *11*, 34009.

[23] "Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem — Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung", zu finden unter: https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infothek/kippelemente. Zuletzt geprüft am: 27.12.2020.