

---

**Zeitreihenanalyse des Trends der Eiskonzentrationen in  
Arktis und Antarktis von 1979 bis 2013**

---

**Bachelorarbeit**  
an der Universität Bremen  
im Fachbereich 01: Physik / Elektrotechnik  
am Institut für Umweltphysik (IUP)

**eingereicht von:** Malte Gerken  
**Matrikelnr.:** 2596799  
**Email:** malte.gerken@uni-bremen.de

**eingereicht am:** 6. Oktober 2014

**Betreuer:** Dr. Georg Heygster

**Gutachter:** 1. Prof. Dr. Justus Notholt  
2. Dr. Georg Heygster

In der Arbeit werden Meereiskonzentrations-Zeitreihen der Arktis und Antarktis im Hinblick auf groß- und kleinräumige Trends untersucht. Diese ergeben in der Arktis eine Abnahme der Meereisfläche um  $(45000 \pm 15000) \text{ km}^2/\text{a}$  und eine Zunahme der Meereisfläche in der Antarktis um  $(17000 \pm 4600) \text{ km}^2/\text{a}$ . Diese Ergebnisse decken sich mit der Literatur, für die Antarktis steigt die Zunahme für längere Untersuchungszeiträume immer weiter an (Parkinson und Cavalieri, 2008). Für die Arktis ist dies ebenso der Fall, hier steigt die Rate der Abnahme mit der Zeit an (Deser und Teng, 2008). Dies lässt sich auch an pixelweisen Trends der Eiskonzentrationen ablesen, in der Arktis nimmt die Eiskonzentration nur in der Beringstrasse zu. Mittels Hauptkomponentenanalyse wird zudem nach Mustern in der Konzentrationsänderung gesucht, woraus sich unter anderem die bereits erhaltenen Ergebnisse bestätigen lassen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>7</b>
<b>2. Physikalische und mathematische Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1. Meereis . . . . .	8
2.2. Berechnung der Meereiskonzentrationen . . . . .	9
2.3. Meereisausdehnung und -fläche . . . . .	10
2.4. Hauptkomponentenanalyse . . . . .	11
<b>3. Verwendete Daten</b>	<b>13</b>
<b>4. Zeitreihenanalyse der Konzentrationsänderungen</b>	<b>15</b>
4.1. Trends der Meereisausdehnung und -fläche . . . . .	15
4.2. Pixelweise Trends der Meereiskonzentration . . . . .	19
4.3. Hauptkomponentenanalyse . . . . .	22
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>27</b>
<b>A. Literatur</b>	<b>28</b>
<b>B. Anhang</b>	<b>30</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Frequenzabhängigkeit der Mikrowellenemissivität von einjährigem und mehrjährigem Eis sowie von Wasser für vertikale und horizontale Polarisation. Daten aus Oberflächenmessungen der norwegischen NORSEX Gruppe im Jahr 1979. Aus: Comiso, Cavalieri et al. (1997) . . . . .	9
3.1. Tageweise Daten der Meereisfläche für die Arktis. . . . .	14
4.1. Trends der Meereisfläche in der Arktis von 1979 bis 2013. . . . .	16
4.2. Trends der Meereisfläche in der Antarktis von 1979 bis 2013. . . . .	16
4.3. Zeitreihe der Fitkoeffizienten eines Polynoms ersten Grades für die Meereisfläche sowie deren Mittelwerte. . . . .	18
4.4. Zeitreihe der Fitkoeffizienten eines Polynoms zweiten Grades für die Meereisfläche. Dargestellt sind die beiden Koeffizienten für die Potenzen erster und zweiter Ordnung. . . . .	19
4.5. Farbkodierte Darstellung des Verlaufs der Meereisfläche. Die schwarze Linie zeigt die Position des Maximums bzw. Minimums in jedem Jahr. . . .	20
4.6. Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Arktis im ersten Quartal, die anderen Quartalskarten sind in Abbildung B.4 abgebildet. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr. . . . .	21
4.7. Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Antarktis im ersten Quartal, die anderen Quartalskarten sind in Abbildung B.5 abgebildet. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr. . . . .	22
4.8. Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis. Beachte die mit den Komponenten abnehmenden Werte in den Skalen. . . . .	23
4.9. Gewichtungen der einzelnen Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis. . . . .	25
4.10. Kumulierte Gewichtungen der Hauptkomponenten. . . . .	26

B.1. Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Arktis für das gesamte Jahr. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr. . . . .	30
B.2. Mittelwerte der Eiskonzentrationen für die jeweiligen Monate über alle Jahre in der Arktis. . . . .	32
B.3. Mittelwerte der Eiskonzentrationen für die jeweiligen Monate über alle Jahre in der Antarktis. . . . .	33
B.4. Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Arktis. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr. . . .	34
B.5. Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Antarktis. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr.	35
B.6. Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis für den Januar. . .	36
B.7. Gewichtungen der einzelnen Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis für den Januar. . . . .	37
B.8. Summierte Signifikanzen der Hauptkomponenten für eine monatsweise Analyse. . . . .	38

# Tabellenverzeichnis

4.1. Parameter der Trends des linearen Fits durch die Meereisfläche. . . . .	17
B.1. Linearer Koeffizienten $c_1$ und quadratischer Koeffizient $c_2$ mitsamt ihren Fehlern für die quadratischen Fits durch die Meereisfläche. . . . .	31

# 1. Einleitung und Motivation

Das Meereis in Arktis und Antarktis ist im aktuellen Tagesgeschehen immer präsenter, so dass die Untersuchung des Trends dieses Eises in den vergangenen 34 Jahren von allgemeinem Interesse ist. Hierbei ist es wichtig, diese Untersuchung regelmäßig mit den aktuellen Daten fortzuführen, so dass Änderungen in den Trends frühzeitig erkannt werden. Vor allem in der Arktis ist die Abnahme nicht konstant, die erhaltenen Trends hängen immer von der untersuchten Zeitspanne ab (Deser und Teng (2008), Comiso und Nishio (2008) und Parkinson, Cavalieri et al. (1999)). Dies ist wichtig, da eine beschleunigte Abnahme des Meereises einen immer größeren Einfluss auf das Klima der Erde hat, da Eis eine wesentlich höhere Albedo als offenes Wasser besitzt. Hieraus entsteht eine Rückkopplung, da eine höhere Temperatur mehr Eis schmelzen lässt, so dass sich die Albedo der gesamten Arktis immer weiter verringert (Comiso und Nishio (2008)).

Dies ist eine wichtige Motivation für diese Arbeit, in der die zeitliche Entwicklung sowohl des Meereises als Ganzes als auch regionale Trends untersucht werden. Diese Bereiche sollten möglichst klein gewählt werden, damit nicht nur großräumige Strukturen aufgelöst werden können. Die einzelnen Datenpixel haben eine Kantenlänge von 25 km, welches den verwendeten Sensoren geschuldet ist, die auf Satelliten die Messungen der charakteristischen Strahlung des Eises vornehmen. Nur durch diese Satellitensensoren zur Beobachtung der Pole ist eine Zeitreihenanalyse überhaupt erst machbar. Auf anderen Wegen sind kontinuierlichen Datenreihen der gesamten polaren Gebiete nicht realisierbar. Auf diese Weise sind kontinuierliche Daten seit 1979 vorhanden. Seitdem wurden immer neue Sensoren in den Orbit gebracht, damit mit dem Ende der Operationszeit der Satelliten die Fortsetzung der Datenreihe sichergestellt ist.

In dieser Arbeit soll nun diese Zeitreihe untersucht werden, zum einen die Entwicklung der Meereisfläche und zum anderen pixelweise Trends der Meereiskonzentration. Ein weiterer Abschnitt widmet sich einer Hauptkomponentenanalyse der Konzentrationen, bei der versucht wird Muster aus den Konzentrationskarten zu extrahieren und diese zu interpretieren. Außerdem sollen die erhaltenen Trends mit Publikationen verglichen werden, um die Änderung im Laufe der Zeit festzustellen.

## 2. Physikalische und mathematische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen sowohl die mathematischen wie auch die physikalischen Grundlagen dieser Arbeit näher erläutert werden, hierzu zählen vor allem das Meereis und die verwendeten Methoden, um aus Satellitenbildern Meereiskonzentrationen zu berechnen. Außerdem wird auf mathematische Methoden zur Analyse von Mustern und Zusammenhängen in großen Datenmengen eingegangen.

### 2.1. Meereis

Meereis entsteht aus gefrorenem Wasser der Ozeane und ist demzufolge salzhaltig. Dies stellt bereits einen wichtigen Unterschied zum Eis auf Seen und Flüssen dar. Letzteres entsteht aus Süßwasser und ist daher salzfrei. Außerdem ist Eis auf Seen wesentlich transparenter und ebener, es friert von oben nach unten auf der Seeoberfläche, so dass es weitestgehend frei von Einschlüssen aller Art ist. Meereis hingegen entsteht unter eher rauen Bedingung und Einfluss des Windes, so dass sich keine gleichmäßigen Strukturen ausbilden. Außerdem entstehen Einschlüsse im Eis, hier handelt es sich um kleine Mengen stark salzhaltigem Wasser. Durch die Einschlüsse lassen sich beide Eisarten zudem optisch sehr leicht voneinander unterscheiden, dieses ist vor allem für die Albedo des Eises von Bedeutung. Diese ist bei Meereis sehr viel höher als bei Süßwassereis. Allerdings erhöht auf das Eis gefallener Schnee die Albedo in beiden Fällen stark. Aus diesem Grund ist auch die Untersuchung der langfristigen Trends des Meereises von Interesse, da schmelzendes Eis eine Reduzierung der Albedo an der betreffenden Stelle zur Folge hat. Aufgrund der verringerten Albedo erhöht sich die Strahlungsabsorption und damit auch die Temperatur, welches die Geschwindigkeit des Eisrückgangs langfristig erhöhen kann. Wichtig für die Fernerkundung des Meereises sind hierbei die elektromagnetischen Eigenschaften des Wassers und des Eises, so dass diese voneinander unterschieden werden können (Nach Petrich und Eicken, 2010, S. 23ff.).

## 2.2. Berechnung der Meereiskonzentrationen

Die Meereiskonzentrationen in den verwendeten Daten wurden vom NASA DAAC (Distributed Active Archive Center) nach dem NASA Team Meereis Algorithmus aus der Mikrowellenstrahlung des Meereises errechnet. Hierfür werden die Kanäle im 19 GHz (sowohl horizontale als auch vertikale Polarisation) und im 37 GHz Bereich (nur vertikale Polarisation) verwendet.

Für den NASA Team Algorithmus wird angenommen, dass sich die gemessene Helligkeitstemperatur  $T_B$  aus drei Komponenten zusammensetzt, und zwar aus offenem Wasser ( $T_{BW}$ ) und von zwei verschiedenen Eistypen ( $T_{BIA}$  und  $T_{BIB}$ ):

$$T_B = T_{BW}C_W + T_{BIA}C_{IA} + T_{BIB}C_{IB} \quad , \quad (2.1)$$

wobei die  $C_i$  die Anteile der betreffenden Oberflächentypen in dem gemessenen Pixel darstellen. Die Summe der  $C_i$  ist eins. Die beiden Eistypen sind in der Arktis einjähriges und mehrjähriges Eis. Für die Antarktis ist dies weniger klar.

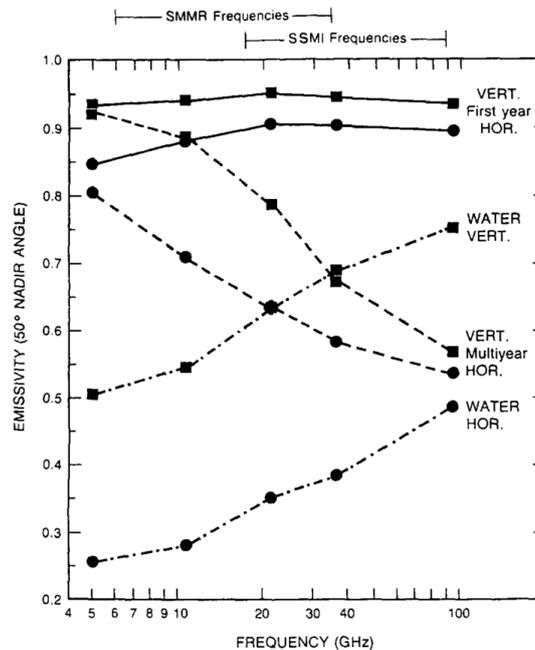


Abbildung 2.1.: Frequenzabhängigkeit der Mikrowellenemissivität von einjährigem und mehrjährigem Eis sowie von Wasser für vertikale und horizontale Polarisation. Daten aus Oberflächenmessungen der norwegischen NORSEX Gruppe im Jahr 1979. Aus: Comiso, Cavalieri et al. (1997)

Die verschiedenen Oberflächen besitzen bei den betrachteten Frequenzen unterschiedliche Helligkeitstemperaturen, so dass nach Abbildung 2.1 die einzelnen Oberflächen unter-

schieden werden können. Aus den Daten werden zwei Strahlungsverhältnisse errechnet, das Polarisationsverhältnis  $PR$  und das Gradientenverhältnis  $GR$ , jeweils berechnet wie im Folgenden:

$$PR = \frac{T_B(19V) - T_B(19H)}{T_B(19V) + T_B(19H)}$$

$$GR = \frac{T_B(37V) - T_B(19V)}{T_B(37V) + T_B(19V)}$$

Zusammen mit Gleichung (2.1) ergeben sich damit Gleichungen zur Berechnung der Eiskonzentrationen:

$$C_{IA} = \frac{a_0 + a_1PR + a_2GR + a_3PR \cdot GR}{D}$$

$$C_{IB} = \frac{b_0 + b_1PR + b_2GR + b_3PR \cdot GR}{D}$$

mit

$$D = c_0 + c_1PR + c_2GR + c_3PR \cdot GR \quad .$$

Da für diese Betrachtungen die gesamte Eiskonzentration von Interesse ist, müssen beide Konzentrationen noch aufsummiert werden:  $C_T = C_{IA} + C_{IB}$ . Für die Berechnung fehlen außerdem noch die  $a_i, b_i, c_i$  aus den Gleichungen, diese Koeffizienten werden aus Verbindungspunkten errechnet, welche derart bestimmt werden, dass die errechneten Eiskonzentrationen mit in situ Messungen und auch den Eiskonzentrationen aus anderen Sensoren möglichst gut übereinstimmen. Dies ist vor allem für meine Betrachtung der Daten wichtig, da Trends untersucht werden, für die es wichtig ist, dass die Daten sich nicht aufgrund des Algorithmus oder einem Wechsel zwischen Sensoren mit geringfügig unterschiedlichen Kanälen ändern. Um Artefakte, wie detektiertes Meereis über offenem Wasser, zu entfernen werden mehrere Wetterfilter eingesetzt, welche für bestimmte Grenzwerte für  $GR(37/19)$  und  $GR(22/19)$  die Eiskonzentration auf 0 setzen (Nach Comiso, Cavalieri et al. (1997)).

### 2.3. Meereisausdehnung und -fläche

Zur Berechnung eines Maßes für die Fläche des Eises muss aus der Meereiskonzentration eines jeden Pixels eine Fläche errechnet werden. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten, zunächst jedoch wird für jeden Pixel die tatsächliche Fläche errechnet. Diese ist bei der häufig verwendeten polarstereographischen Projektion abhängig von den Längen- und Breitengraden des betrachteten Pixels. Eine Möglichkeit ist die Berechnung der Meereisausdehnung. Hierbei werden die Flächen aller Pixel aufsummiert, die eine Meereiskonzentration von 15% oder mehr aufweisen (Zwally et al. 2002). Eine andere Möglichkeit ist die Meereisfläche, wobei hier für jeden Pixel das Produkt aus Meereiskonzentration

und Fläche gebildet und über alle Pixel summiert wird (Zwally et al. 2002). Eine alternative Möglichkeit ist, auch hier wieder über alle Pixel zu summieren, die mindestens eine Eiskonzentration von 15% aufweisen (Parkinson, Cavalieri et al. 1999).

## 2.4. Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse ist eine mathematische Methode zur Dimensionsreduktion von Daten. Ziel ist die Berechnung von neuen, untereinander linear unabhängigen Basisvektoren als Linearkombination der gegebenen Basis, so dass die Basen die maximale Variabilität unter den Daten repräsentieren.

Wir betrachten einen  $K$ -dimensionalen Datenvektor  $\mathbf{x}$ , welcher für unterschiedliche Messungen vorliegt. Das Ziel ist nun, diese Daten in einen neuen Vektor  $\mathbf{u}$  mit Dimension  $M$  zu transformieren, so dass  $M \ll K$  gilt ohne signifikante Informationen zu verlieren. Mit einer Rücktransformation kann dadurch der ursprüngliche Datenvektor errechnet werden, der sich nur in einer gewissen Toleranz von  $\mathbf{x}$  unterscheidet. Zur Transformation ist es einfacher, nur Anomalien  $\mathbf{x}' = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}$  zu betrachten, da damit die Daten bereits um den Ursprung zentriert sind und die Hauptkomponentenanalyse nur eine Drehung des Koordinatensystems ist. Es werden nun die einzelnen Komponenten  $u_i$  bestimmt, wobei  $u_1$  so konstruiert wird, dass es die größtmögliche Varianz in den Daten widerspiegelt. Für  $i = 2, 3, \dots, K$  wird wieder jeweils die Richtung der größten Varianz ermittelt, die senkrecht auf alle  $u_j$  mit  $j < i$  steht.

Die Berechnung erfolgt zum Beispiel über die Eigenvektoren  $e_i$  der Kovarianzmatrix  $S$  von  $\mathbf{x}'$ . Geometrisch gesehen ist die  $m$ -te Hauptkomponente die Projektion des Datenvektors auf den  $m$ -ten Eigenvektor (Wilks, 2011, S. 520).

$$u_m = \mathbf{e}_m^T \mathbf{x}'$$

Die Reihenfolge der Eigenvektoren ergibt sich aus ihren Eigenwerten, welche absteigend angeordnet werden. Aus diesen Eigenvektoren lässt sich eine Orthogonalmatrix  $E$  mit den Eigenvektoren als Spalten konstruieren, so dass die Erzeugung der Hauptkomponente einer Rotation entspricht:

$$\mathbf{u} = E^T \mathbf{x}'.$$

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung ist eine Singulärwertzerlegung von  $\mathbf{x}'$ . Hierzu wird die Zerlegung  $\mathbf{x}' = U\Sigma V^T$  der ursprünglichen Matrix berechnet. Aus dieser Zerlegung kann aufgrund von  $V^{-1} = V^T$  (wegen Orthogonalität) nun nach  $\mathbf{x}'V = \Sigma U$  umgestellt werden. Daraus lässt sich dann  $V^T \mathbf{x}'^T = U^T \Sigma$  ableiten, welches mit der Definition  $\mathbf{u}^T \equiv U^T \Sigma$  nun die Transformation der Hauptkomponentenanalyse mit

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^T &= V^T \mathbf{x}'^T \\ \mathbf{u} &= \mathbf{x}' V \end{aligned}$$

ergibt. Die Rücktransformation erfolgt dann analog über  $\mathbf{x}' = V^T \cdot \mathbf{u}$  (Nach Shlens, 2014, S. 7ff.).

Für die Analyse braucht es außerdem ein Maß für die Nützlichkeit der Hauptkomponentenanalyse zur Datenreduktion. Hier konstruiert man sich zunächst aus der Varianz  $\sigma$  eine Signifikanz  $S$  für jede Hauptkomponente als Prozentsatz der in ihr enthaltenen Informationen. Sie berechnet sich als

$$\sigma_i = \frac{\sum_{i,i}^2}{K}$$
$$S_k = \frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^K \sigma_i}$$

Da in allen Hauptkomponenten insgesamt alle Informationen enthalten sein müssen, muss außerdem  $\sum_i S_i = 1$  gelten. Aus diesen Werten kann außerdem die Signifikanz der ersten  $i$  Komponenten  $a_i$  mit

$$a_i = \sum_{k=1}^i S_k$$

errechnet werden. Dies lässt eine Aussage zu, nach wie vielen Komponenten wie viel Informationen in den Hauptkomponenten enthalten sind. Eine Grenze kann dann zum Beispiel bei  $a_i \geq 0,8$  gesetzt werden. Hieraus kann die Anzahl der benötigten Komponenten zur Darstellung von 80% der Informationen ermittelt werden (Wilks, 2011, S. 521).

### 3. Verwendete Daten

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen von dem National Snow and Ice Data Center der NASA, welche die Daten von mehreren Sensoren zu einem Datensatz zusammengefügt haben. Die ältesten Daten stammen vom SMMR (1979 - 1987), gefolgt von einer Zeitreihe aus drei Verschiedenen SSM/I Sensoren (DMSP-F8, DMSP-F11 und DMSP-F13, 1987-2007). Seit 2007 stammen die zu grunde liegenden Daten vom SS-MIS Sensor (DMSP-F17). Die Daten liegen bereits als Eiskonzentrationsdaten vor, das heißt dass sie bereits bearbeitet wurden, damit die Daten in sich konsistent sind. Aus diesem Grund ist der Übergang zwischen den verschiedenen Sensoren in den Daten nicht zu erkennen, da die Konzentrationsberechnung so angepasst wurde, dass sie in den Überlappungszeiträumen zueinander passt. Ein wichtiger Unterschied besteht trotz allem zwischen den Daten von SMMR und den Nachfolgenden: So wurden die SMMR Daten nur alle zwei Tage aufgenommen, wohingegen es von den anderen Sensoren tägliche Daten gibt. Da die Auswertung allerdings mit Monatsmitteln arbeitet, stellt dies kein großes Problem dar.

Problematisch ist allerdings das von den Sensoren nicht erfasste kreisförmige Gebiet um die Pole. Bedingt durch den quasipolaren sonnensynchronen Orbit und die unterschiedlichen Bahnparameter der Satelliten ist der nicht abgedeckte Bereich um die Pole bei SMMR am größten mit einem Radius von 611 km (Der Bereich nördlich von  $84.5^\circ$ ). Dies ergibt sich aus der Inklination der Satellitenbahn um  $99,1^\circ$  und der Breite des Abtaststreifens von 780 km. Bei den neueren Sensoren ist der Bereich ohne Daten wesentlich kleiner, der Radius beträgt hier nur 311 km (Der Bereich nördlich von  $87.2^\circ$ , Inklination  $98,8^\circ$ , Abtastbreite 1394 km), so dass ein wesentlich größeres Gebiet betrachtet werden kann. Hier wurde für die Daten eine Eiskonzentration von 100% angenommen, da es sich ausnahmslos um einen Bereich handelt, der von nahezu 100% eisbedeckter Fläche umgeben ist.

Die monatliche Meereisfläche wurde aus täglichen Flächen errechnet, welche Monatsweise gemittelt wurden. Dieses Verfahren ist genauer, als wenn zuerst die Eiskonzentrationen monatsweise gemittelt werden. Die entstandene Zeitreihe ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Sie stellt einen Teil der Ausgangsdatenbasis dar, in der bereits ein Rückgang der Fläche in der Arktis erkennbar ist.

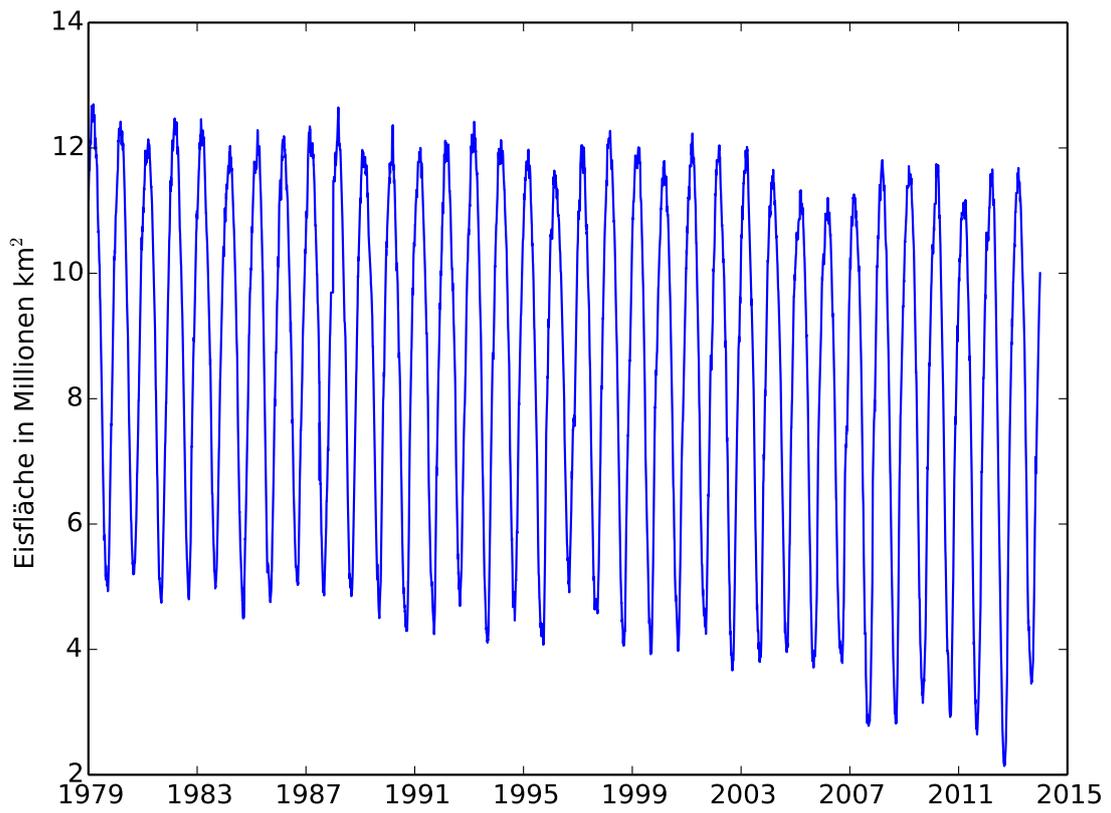


Abbildung 3.1.: Tageweise Daten der Meereisfläche für die Arktis.

## 4. Zeitreihenanalyse der Konzentrationsänderungen

Für die Analyse wurden die tageweisen Daten (Abbildung 3.1) zunächst jeweils monatsweise gemittelt. Für die pixelweisen Auswertungen wurde zudem nur die Anomalie, das heißt die Abweichung vom Mittel über alle betrachteten Jahre berücksichtigt. Hierfür wurden für sämtliche Monate Monatsmittel errechnet, um Werte für einen durchschnittlichen Monat zu bekommen. Durch diese Methode wird zudem der Jahresgang, also der Verlauf der Eiskonzentrationen aufgrund der Jahreszeiten, aus den Daten herausgerechnet.

### 4.1. Trends der Meereisausdehnung und -fläche

Aus den monatlichen Konzentrationsdaten wurde nach den in Kapitel 2 genannten Verfahren die Meereisausdehnung und die Meereisfläche berechnet, um eine gesamthafte Analyse des Jahresgangs sowie der gesamten Zu- bzw. Abnahme durchzuführen. Durch die sich ergebenden Werte wurde jeweils ein Polynom ersten und zweiten Grades mittels Methode der kleinsten Quadrate angepasst. Aus den so errechneten Daten lässt sich zum einen ablesen, ob und wie sich die Fläche pro Monat verändert, zum anderen kann aus dem Polynom zweiten Grades auch auf die Änderungsrate der Zunahme geschlossen werden.

In Abbildung 4.1 ist eine lineare Anpassung an die gemessenen Daten abgebildet, die Trends sind in Tabelle 4.1a aufgelistet. Es ist erkennbar, dass langfristig betrachtet die Meereisfläche abnimmt, was auch in sämtlichen Monaten des Jahres der Fall ist. Die maximale Abnahme ist im Oktober mit  $(-66200 \pm 8500) \text{ km}^2/\text{a}$  zu verzeichnen. Im Jahresmittel beträgt die Änderung der Meereisfläche ca.  $(-45300 \pm 15100) \text{ km}^2/\text{a}$ , es ist also eine deutliche Abnahme zu verzeichnen. Der außerordentlich große Fehler entsteht durch die Mittelung über das ganze Jahr, da die Werte sehr weit gestreut sind. Zudem fällt die Gruppierung jeweils zweier Monate im Graphen ins Auge. Dieses Verhalten entsteht rein zufällig durch die willkürliche Festlegung des Monatsanfangs. Würde man den Anfang des Monats verschieben, würde sich ein anderes Bild ergeben. Zu sehen ist dies in Abbildung 4.2 für die Antarktis, bei der dieses Phänomen nicht auftritt.

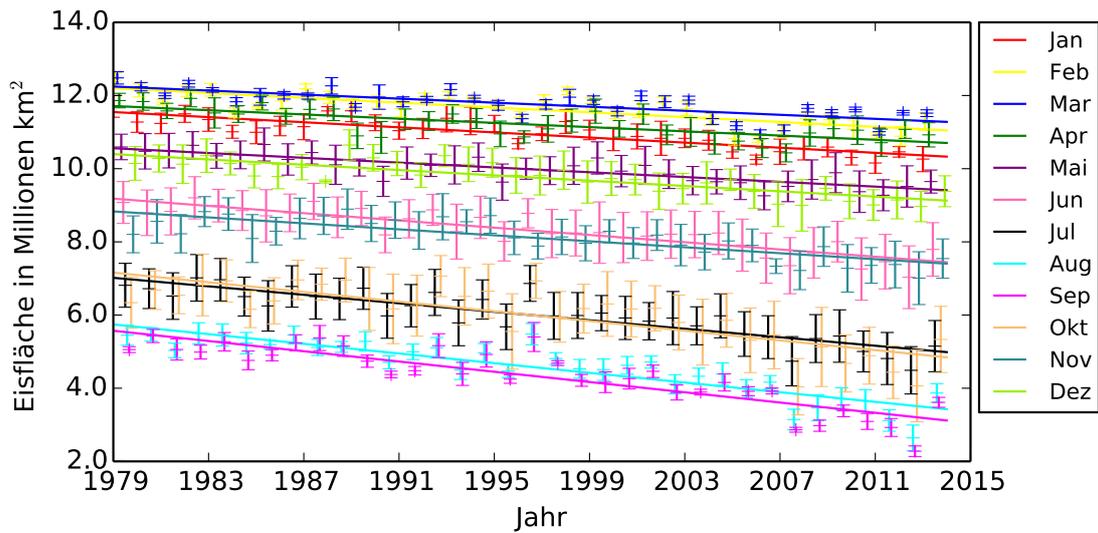


Abbildung 4.1.: Trends der Meereisfläche in der Arktis von 1979 bis 2013.

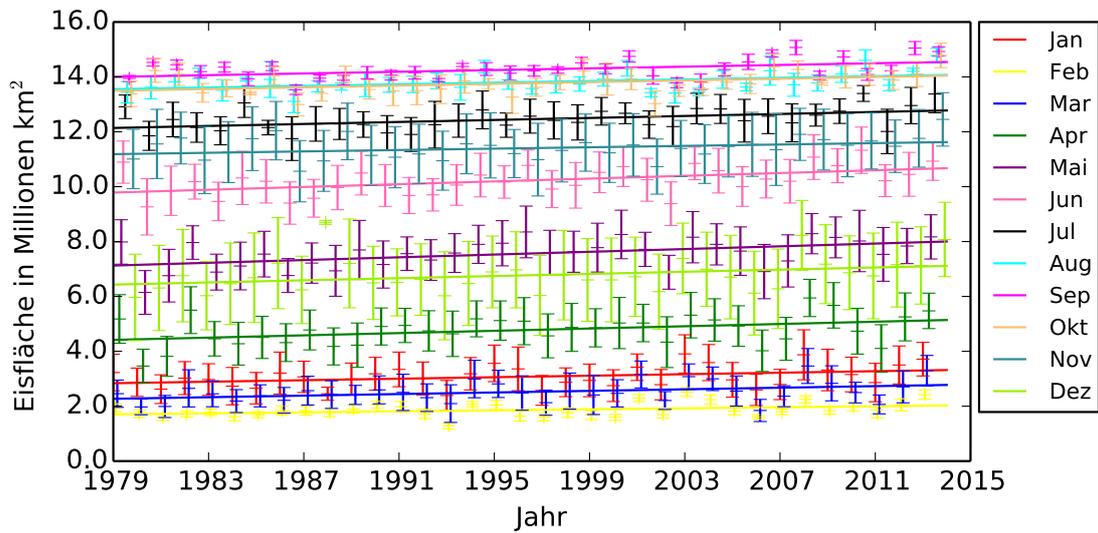


Abbildung 4.2.: Trends der Meereisfläche in der Antarktis von 1979 bis 2013.

Für die Antarktis zeigt sich ein anderes Bild: Hier ist keine Abnahme zu beobachten, die Ausdehnung des Meereises hat in den letzten 35 Jahren leicht zugenommen (siehe Abbildung 4.2 und Tabelle 4.1b). Die maximale Zunahme ist in den Monaten Mai und Juni zu verzeichnen, in welchen die Zunahme ca.  $25000 \text{ km}^2/\text{a}$  beträgt. Über das Jahr gemittelt liegt die Zunahme für die gesamte Antarktis bei  $(17000 \pm 4600) \text{ km}^2/\text{a}$ , dies ist signifikant höher als zum Beispiel bei Zwally et al. (2002) angegeben; Sie haben für den Zeitraum von 1979 bis 1998 einen Anstieg von  $(11100 \pm 4100) \text{ km}^2/\text{a}$  ermittelt. Für

Monat	Trend in km <sup>2</sup> /a	Monat	Trend in km <sup>2</sup> /a
1	-34821 ± 3771	1	13691 ± 6332
2	-33020 ± 4497	2	9279 ± 4283
3	-27621 ± 4227	3	14413 ± 6140
4	-28864 ± 4546	4	20705 ± 8710
5	-32794 ± 3597	5	25035 ± 8074
6	-49601 ± 4473	6	25364 ± 7696
7	-58020 ± 5491	7	18214 ± 6256
8	-66140 ± 6065	8	14826 ± 5239
9	-70091 ± 7106	9	15500 ± 5828
10	-66217 ± 8562	10	15680 ± 6149
11	-40787 ± 5193	11	12570 ± 6544
12	-36307 ± 4374	12	19466 ± 10300
Jahr	-45357 ± 15186	Jahr	17062 ± 4666

(a) Arktis

(b) Antarktis

Tabelle 4.1.: Parameter der Trends des linearen Fits durch die Meereisfläche.

diesen Zeitraum ergibt sich mit den hier betrachteten Daten ein ähnlicher Wert von ca. 10000 km<sup>2</sup>/a. In Parkinson und Cavalieri (2008) findet sich für den Zeitraum von 1979 bis 2006 jedoch ein kleinerer Wert von (9500 ± 2400) km<sup>2</sup>/a. Da die ermittelte Geschwindigkeit der Änderung der Eisfläche also vom betrachteten Zeitraum abhängt und mit der Zeit zunimmt, liegt der Schluss nahe, dass der Zusammenhang nichtlinear ist. Aus diesem Grund wurde zusätzlich die Beschleunigung der Änderung untersucht. Diese Information kann aus dem Leitkoeffizienten der Interpolation mit einem Polynom zweiten Grades entnommen werden. Die Werte der Koeffizienten sind in Tabelle B.1 nachzulesen, im Jahresmittel beträgt er (54 ± 57) km<sup>2</sup>/a<sup>2</sup>, wodurch auf einen positiven Wert geschlossen werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass der lineare Koeffizient des quadratischen Fits nicht dem linearen Koeffizienten des linearen Fits entsprechen. Zudem sind die Koeffizienten nur in drei Monaten kleiner als 0, so dass auch so auf eine beschleunigte Zunahme geschlossen werden kann (siehe Tabelle B.1 im Anhang).

Bei den Betrachtungen der Meereisfläche ist zu beachten, dass diese Daten keine Rückschlüsse auf das Volumen des Meereises zulassen, da keine Informationen über die Dicke vorliegen. So ist es möglich, dass sich die Fläche verringert, da das Eis aufgetürmt wird. Zudem ist es möglich, dass sich Eisflächen zwischen verschiedenen Regionen der Arktis verschieben (siehe Zwally et al. 2002; Liu, 2004). Jedoch wird eine Abnahme der mittleren Eisdicke im untersuchten Zeitraum beobachtet, so dass das Volumen des arktischen Meereises noch schneller abnimmt als seine Fläche (Haas et al. 2008).

Die einzelnen Koeffizienten lassen sich auch zu einer Zeitreihe zusammensetzen, diese

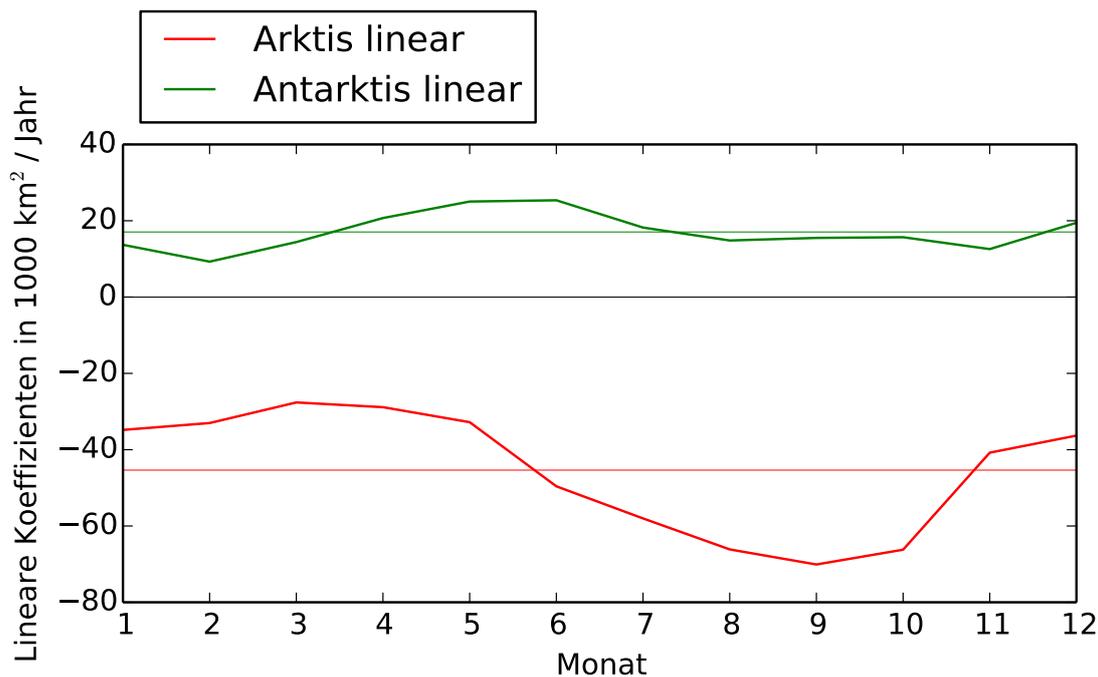


Abbildung 4.3.: Zeitreihe der Fitkoeffizienten eines Polynoms ersten Grades für die Meeresfläche sowie deren Mittelwerte.

ist in Abbildung 4.3 für den linearen Fit dargestellt. In der Arktis gibt es ausgeprägtes Minimum von Juli bis Oktober, das Maximum liegt im März. Die maximale Abnahme im September ist zudem um den Faktor 2,5 größer als die Abnahme im März. Für die Antarktis ist die Änderung durchweg positiv, die Werte sind jedoch wesentlich kleiner als in der Arktis. Auch ist der Jahresgang nicht so stark ausgeprägt, das Minimum im Februar und das Maximum im Juni unterscheiden sich um einen Faktor von 2,7.

Für ein Polynom zweiten Grades ergibt sich die Darstellung in Abbildung 4.4. Hier ist zu erkennen, dass die quadratischen Koeffizienten ein ähnliches Bild widerspiegeln als die linearen Koeffizienten des Polynoms ersten Grades. Für die Arktis liegen sie mit Ausnahme von März bis Mai im negativen Bereich und für die Antarktis mit der selben Ausnahme im positiven Bereich. Daraus lässt sich erkennen, dass die Ab- bzw. Zunahme der Meereisfläche beschleunigt wird.

Zur besseren Visualisierung ist in Abbildung 4.5a die Entwicklung der Meereisfläche farb-kodiert dargestellt, damit man die einzelnen Jahre besser miteinander vergleichen kann. Da für den SMMR Zeitraum nur Daten für jeden zweiten Tag vorhanden sind, wurde für den gesamten Zeitraum nur jeder zweite Tag verwendet, womit ca. 150 Datenpunkte pro Jahr dargestellt werden. In dieser Darstellung ist außerdem die Lage des jährlichen Minimums und Maximums eingezeichnet, welche sich über die Jahre relativ konstant

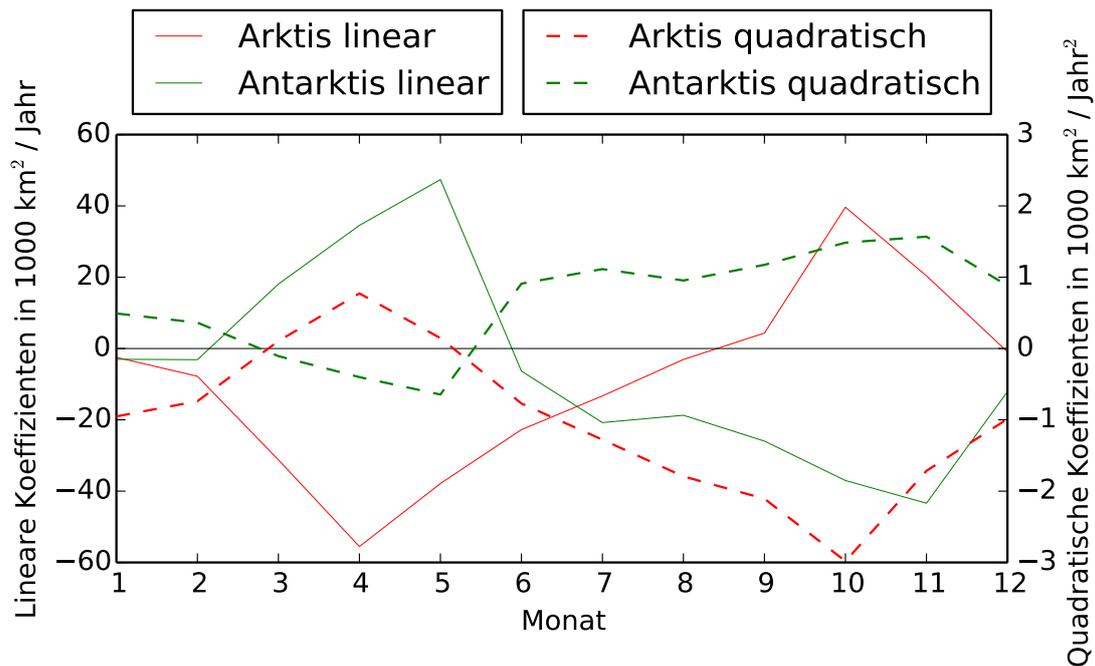


Abbildung 4.4.: Zeitreihe der Fitkoeffizienten eines Polynoms zweiten Grades für die Meereisfläche. Dargestellt sind die beiden Koeffizienten für die Potenzen erster und zweiter Ordnung.

in dem gleichen Bereich bewegt. So ist das Maximum Anfang März und das Minimum Anfang September erreicht. Auch hier ist die Abnahme der Meereisfläche in der Arktis sichtbar. In Abbildung 4.5b ist die gleiche Graphik für die Antarktis dargestellt. Die im vorhergehenden Absatz gewonnene Erkenntnis lässt sich auch hier wiederfinden, die Meereisfläche ist in der Antarktis nahezu konstant, der leichte Anstieg ist hier durch die etwas dunkleren Rottöne im September und Oktober zu erkennen. Außerdem ist der zeitliche Verlauf der Extremstellen im Jahr dargestellt. Diese verschiebt sich nicht, die Länge der Schmelzperiode ist also nahezu konstant. Das Minimum befindet sich hier Ende Februar, das Maximum Anfang September.

## 4.2. Pixelweise Trends der Meereiskonzentration

Zur weiteren Untersuchung wurde aus den Monatsweise gemittelten Meereiskonzentrationen ein Datenwürfel erstellt, der Auswertungen entlang der Zeitachse problemlos sehr erleichtert. Hierfür werden die Karten in einer dreidimensionalen Matrix übereinander gespeichert, so dass für jeden Pixel ein Trend errechnet werden kann. Da die Eisgrenze in jedem Monat an anderer Stelle verläuft, aber in jedem gleichen Monat relativ konstant

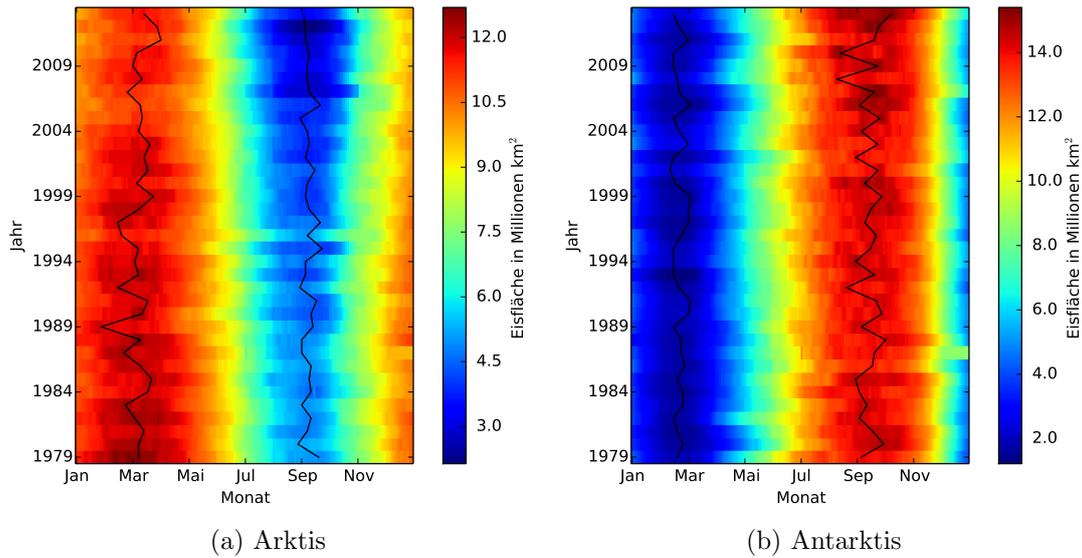


Abbildung 4.5.: Farbkodierte Darstellung des Verlaufs der Meereisfläche. Die schwarze Linie zeigt die Position des Maximums bzw. Minimums in jedem Jahr.

ist, wurde der Würfel zusätzlich in die Monate aufgeteilt, um 12 Würfel zu erzeugen. Aus der Trendberechnung entstehen wiederum Karten für jeden Koeffizienten, wobei ein besonderes Augenmerk auf den Leitkoeffizienten gelegt wird. Für die Berechnung der Trends wurde nur die Anomalie, also die Abweichung vom Mittelwert betrachtet. Aufgrund der Verschiebung der Meereisfläche im Jahresgang wurden daher 12 Monatsmittel errechnet. Es wird jedoch zusätzlich der Mittelwert über alle Jahre in der Auswertung dargestellt. Zur komprimierten Visualisierung wurden anschließend jeweils aus drei Monatskarten Quartalskarten erstellt, worauf sich die Änderung der Eiskonzentration an vier Karten pro Hemisphäre ablesen lässt. Eine beispielhafte Karte ist für das erste Quartal in Abbildung 4.6 dargestellt, alle anderen Quartale sind in Abbildung B.4 im Anhang abgedruckt.

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Änderung der Meereiskonzentrationen vor allem in den Randbereichen der eisbedeckten Fläche geschieht. Aber auch hier spiegelt sich die bereits im vorherigen Abschnitt erlangte Erkenntnis wieder, dass die Eisfläche in der Arktis abnimmt. Lediglich in einem kleinen Bereich in der Beringstraße nimmt die Eiskonzentration langfristig zu. Diese Zunahme lässt sich jedoch nicht einfach durch eine Verschiebung des Meereises erklären, da in den benachbarten Gebieten kein negativer Trend der Meereiskonzentration festgestellt werden kann. Ein Vorschlag für die Erklärung der Zunahme findet sich in Wendler et al. (2013), in dieser Studie wurde das Phänomen der Meereiszunahme in der Beringstrasse näher untersucht. Die Autoren haben auch einen leichten Abfall der Oberflächentemperatur gefunden und erklären ihn mit der pazifischen Dekaden-Oszillation (PDO) in Richtung einer PDO-Kaltphase, welche zu

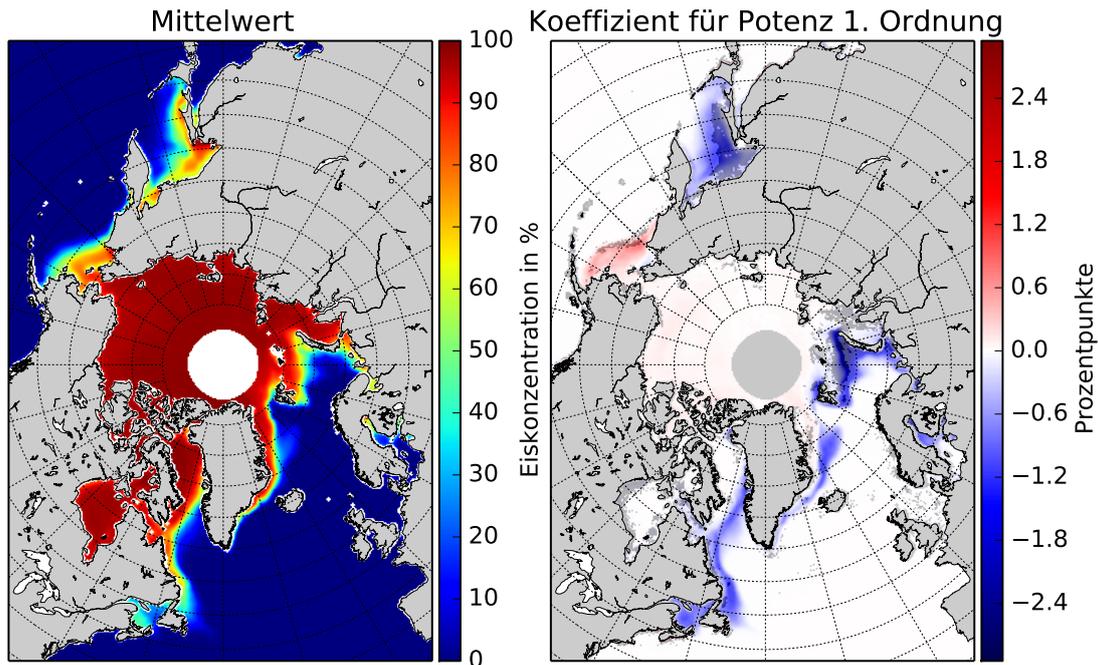


Abbildung 4.6.: Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Arktis im ersten Quartal, die anderen Quartalskarten sind in Abbildung B.4 abgebildet. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von  $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr.

dem Anstieg der Eiskonzentration geführt hat. Die PDO ist eine dem El Niño ähnliches langlebiges Muster im Pazifik, welche die Veränderungen der Oberflächentemperatur beschreibt (Mantua und Hare, 2002). Da der Rand des Eises in den anderen Quartalen nicht in der Beringstraße liegt, findet hier auch keine Zunahme statt. In den anderen Gebieten der Arktis ist ganjährig eine Abnahme zu verzeichnen, wenn Eis vorhanden ist.

Ein anderes Bild zeigt sich für die Antarktis in Abbildung 4.7 für das erste Quartal und B.5 für die restlichen drei Quartale. Hier ist das Verhältnis zwischen Zu- und Abnahme relativ ausgewogen, wobei die Summe über alle Pixel einen positiven Wert ergibt. Dies bedeutet, dass die Eisfläche in der Antarktis insgesamt größer wird. Insbesondere die ersten beiden Quartale sind für die Antarktis von Interesse, da hier die Änderungen am besten ausgeprägt sind (Abbildungen 4.7 und B.5a). Die Abnahme in der Bellingshausensee und die Zunahme im angrenzenden Weddelmeer und Rossmeer lässt sich mit dem Windsystem des La Niña erklären, da ab den 1990er Jahren in der Bellingshausensee ein wärmerer Nordwind vorherrscht und in den angrenzenden Meeren ein kälterer Südwind

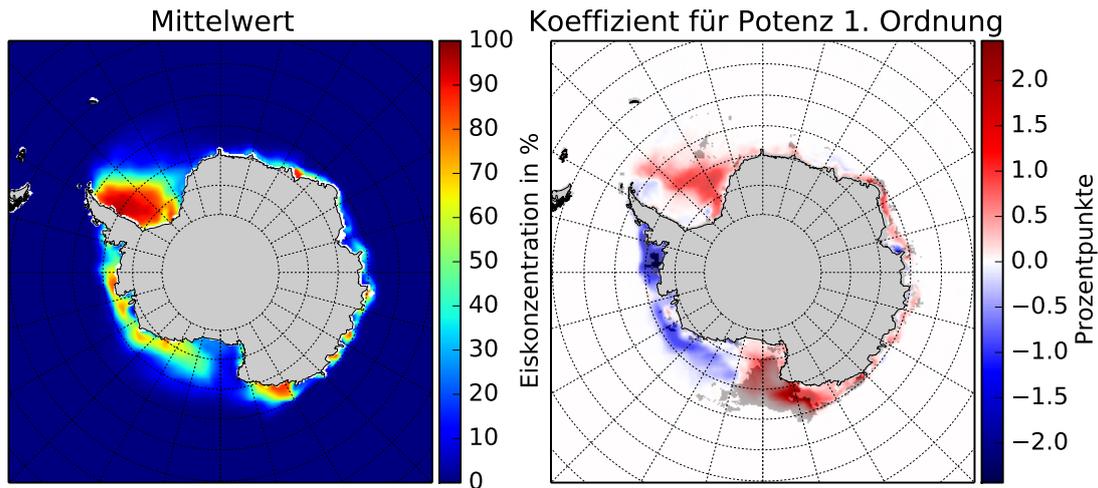


Abbildung 4.7.: Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Antarktis im ersten Quartal, die anderen Quartalskarten sind in Abbildung B.5 abgebildet. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von  $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr.

als zu Beginn des untersuchten Zeitraumes. Aus diesem Grund hat sich die Lage des Eises verändert (Massom und Stammerjohn, 2010). In den letzten beiden Quartalen ist die Änderung der Eiskonzentration nur gering bis nicht vorhanden.

### 4.3. Hauptkomponentenanalyse

Um räumliche Verteilungsmuster in den Meereiskonzentrationen erkennen zu können, welche sich in verschiedenen Jahren wiederfinden, wurde auf die Konzentrationsdaten eine Hauptkomponentenanalyse angewendet. Hierzu wurden die Daten um den Mittelwert bereinigt (siehe Kapitel 2.4) und in Einheiten der Standardabweichung ausgedrückt, diese wird ebenfalls monatsweise berechnet. Die Hauptkomponentenanalyse wurde nun auf zwei verschiedene Arten angewandt: Zum einen hat sie den gesamten Datensatz verarbeitet und zum anderen wurden alle Monate gesondert behandelt, so dass für alle zwölf Monate eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt wurde.

In Abbildung 4.8 sind exemplarisch die ersten sechs sowie drei höhere Hauptkomponenten dargestellt. In den ersten Komponenten lassen sich in der Regel bestimmte Muster finden, die für die gesamte Zeitreihe charakteristisch sind. Im vorliegenden Fall konnte dies jedoch nur bedingt bestätigt werden. Die erste Komponente entspricht in guter

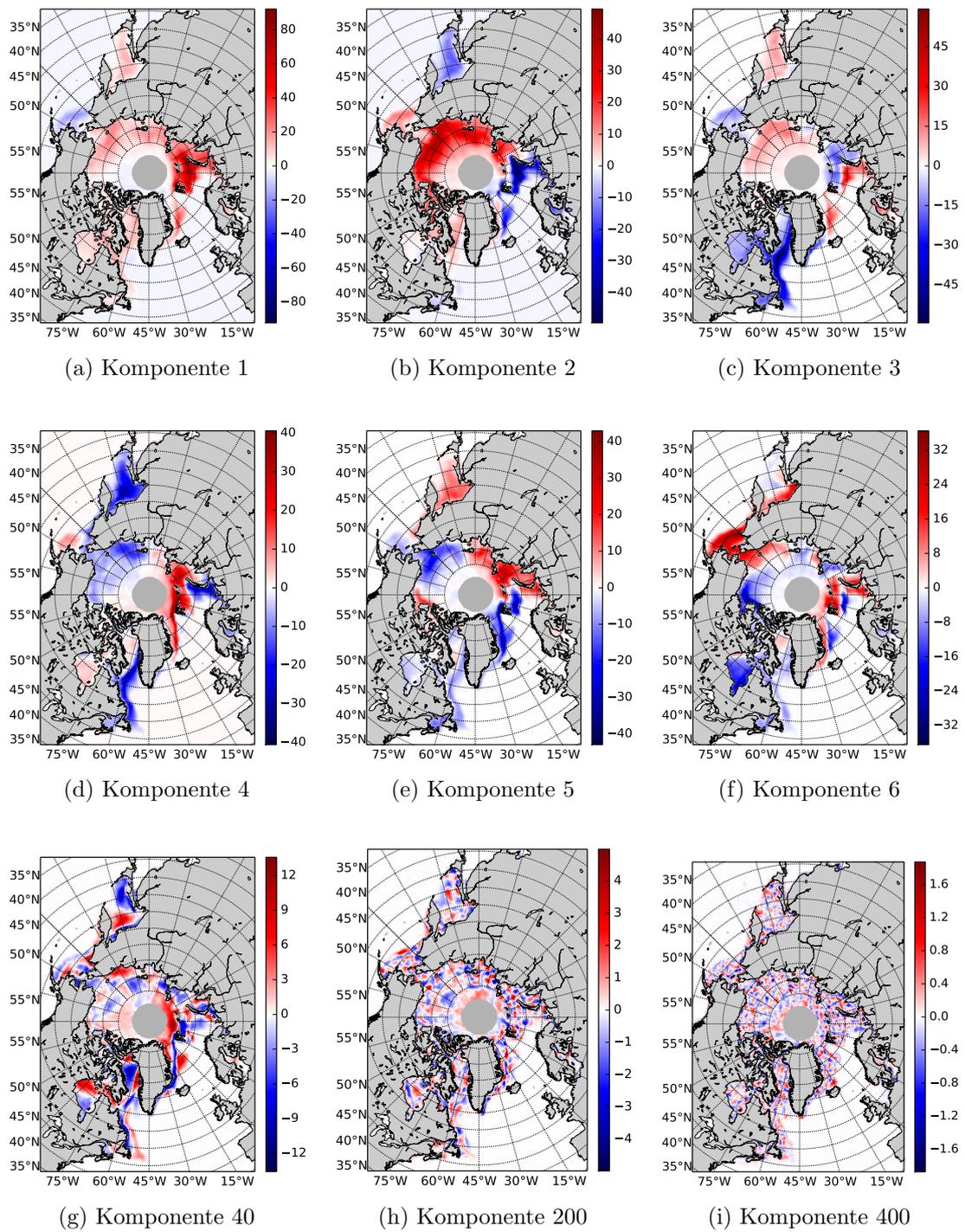
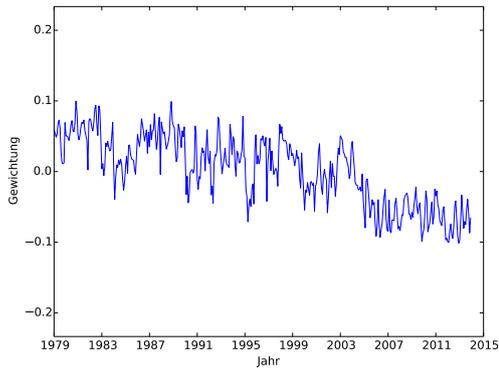


Abbildung 4.8.: Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis. Beachte die mit den Komponenten abnehmenden Werte in den Skalen.

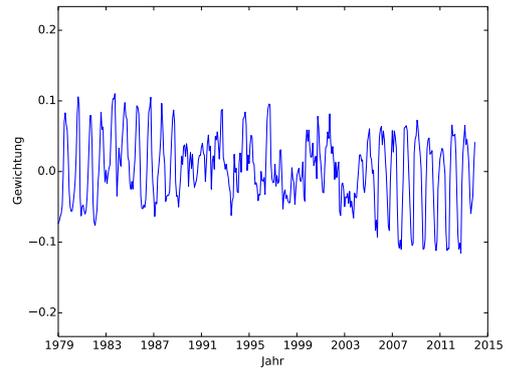
Näherung dem linearen Trend über dem gesamten Zeitraum (siehe Abbildung B.1). Dies wird in Abbildung 4.9a bestätigt, da das Gewicht der ersten Komponente über den betrachteten Zeitraum stark abfällt. Wie aus den höheren Komponenten in Abbildung 4.8 zu sehen ist, nimmt das Rauschen in diesen immer weiter zu, so dass es schwierig ist diese zu interpretieren. Hierzu tragen auch die irregulären Verläufe der Gewichte dieser Komponenten in den Zeitreihen (Abbildung 4.9) bei. Es ist so, dass die ersten Hauptkomponenten zusammen zwar den näherungsweise Verlauf der Eiskonzentration beschreiben, dieser jedoch noch erheblich von den ursprünglichen Karten abweicht. Diese Abweichung wird erst durch die kleinskaligen Muster in den höheren Komponenten geringer.

Dies spiegelt sich außerdem in Abbildung 4.9 wider, wo die Koeffizienten zur Berechnung der Hauptkomponenten teilweise eine quasiperiodische Struktur zeigen. In Abbildung 4.9b sind deutlich zwei periodische Bereiche am Anfang und am Ende zu erkennen. Zwischen diesen findet jedoch ein Phasenwechsel statt, so dass die Zuordnung von Monaten zu bestimmten Strukturen in der Komponente nicht ohne weiteres möglich ist. In den höheren Komponenten folgt das Gewicht der Hauptkomponenten keinem klaren Zusammenhang, so dass auch hier eine Zuordnung erschwert ist. Problematisch ist daher vor allem, dass die Hauptkomponenten höherer Ordnung nur Abweichungen der Eiskonzentrationen von den niedrigeren Hauptkomponenten darstellen. Die teilweise auftretende Oszillation des Vorzeichens erschwert zusätzlich die Interpretation, da sich daraus nicht schließen lässt, ob im Realraum eine Abnahme oder eine Zunahme stattgefunden hat. Außerdem ist das Rauschen der Koeffizienten recht groß, welches sich auch bei Betrachtung eines Monats nicht ändert (Abbildung B.7). Diese Betrachtung sollte bessere Ergebnisse liefern, da durch den Jahresgang die Eisgrenze in jedem Monat an anderer Stelle liegt. Deswegen ist es eigentlich besser, wenn nur korrelierte Muster betrachtet werden. Entsprechende Grafiken sind im Anhang in den Abbildungen B.6 und B.7 gezeigt. Man kann aber keine klare Verbesserung erkennen. Trotz der Probleme, die Bilder in einen Zusammenhang zu stellen, kann in den jeweils ersten Hauptkomponenten ein Muster errechnet werden, was schon aus vorangegangenen Auswertungen bekannt ist. In beiden Abbildungen (4.8a und B.6a) ist das Muster der Abnahme der Eiskonzentration im gesamten arktischen Gebiet mit Ausnahme der Beringstrasse zu erkennen. Die umgekehrten Vorzeichen lassen sich aus der Hauptkomponentenanalyse begründen.

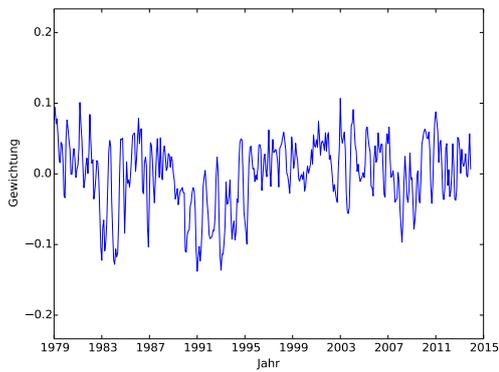
Wie in Kapitel 2.4 beschrieben ist das Ziel der Hauptkomponentenanalyse die Reduktion von Dimensionen, also in diesem Fall die Reduktion der für die Darstellung der Monatskarten benötigten Komponenten. Im Idealfall reichen bereits wenige Hauptkomponenten um die Informationen in guter Näherung beschreiben zu können. In diesem Fall ist die Reduktion gering, denn es werden weiterhin ca. 50 Hauptkomponenten benötigt um 80% der Informationen darzustellen (Abbildung 4.10). Diese Zahl an benötigten Komponenten ist deutlich zu hoch, da so nicht mehr durch wenige Komponenten Aussagen über die Beobachtungen gemacht werden können. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man nur einen Monat betrachtet, in Abbildung B.8 sind die Graphen für eine monatsweise Auswertung abgebildet. Auch hier ist die Konvergenz der Graphen nicht ideal, der



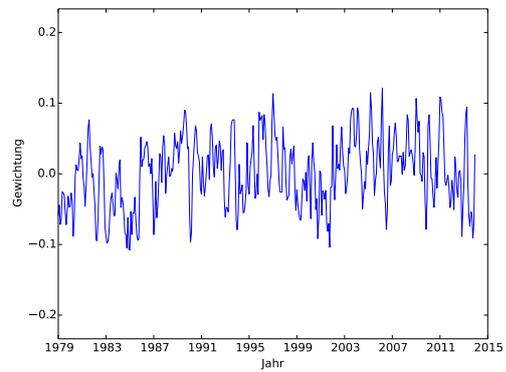
(a) Komponente 1



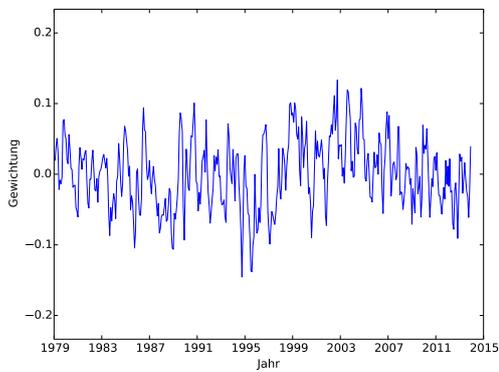
(b) Komponente 2



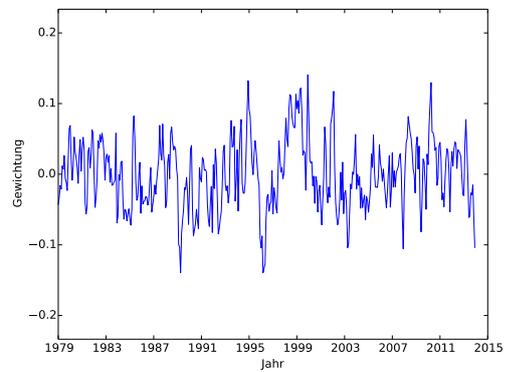
(c) Komponente 3



(d) Komponente 4



(e) Komponente 5



(f) Komponente 6

Abbildung 4.9.: Gewichtungen der einzelnen Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis.

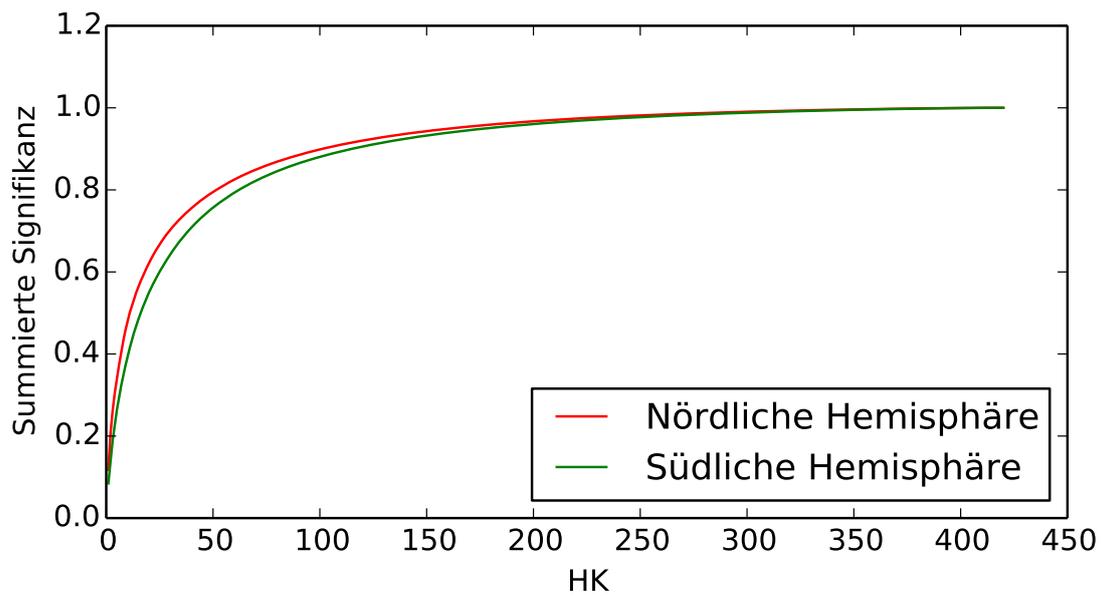


Abbildung 4.10.: Kumulierte Gewichtungen der Hauptkomponenten.

Informationsgehalt der ersten Hauptkomponenten also nicht allzu hoch.

All diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine Analyse der zeitlichen Entwicklung der Meereiskonzentrationen mittels Hauptkomponentenanalyse es nicht erlaubt die Entwicklung durch wenige Komponenten zu beschreiben. Eventuell ist es zielführender, lediglich einzelne Gebiete der Arktis zu betrachten, um dort wiederkehrende Strukturen zu erkennen und zu analysieren. Dies sollte also in einem nächsten Schritt untersucht werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse lassen sich für die Antarktis in der Literatur wiederfinden. Der leichte Anstieg der Meereisfläche um  $(17000 \pm 4600) \text{ km}^2/\text{a}$  wurde bereits festgestellt und konnte bestätigt werden. So lässt sich der Schluss ziehen, dass die Antarktis sich in einem relativ konstantem Zustand befindet. Trotz dieser Kontinuität hinsichtlich der Eisfläche und -ausdehnung verschiebt sich die regionale Eisbedeckung in diesem Gebiet. So geht in der Bellingshausen-See die Eisbedeckung immer weiter zurück, nimmt jedoch in den angrenzenden Meeren zu.

Für die Arktis ist das Ergebnis ein Anderes, hier nimmt die Eisfläche mit immer höherer Geschwindigkeit um  $(45000 \pm 15000) \text{ km}^2/\text{a}$  ab, gerade in den letzten Jahren ist die Eisfläche auf einen Tiefststand gesunken. Diese Entwicklung sollte Anlass zur Sorge bereiten und weiterhin beobachtet werden, wie es in den letzten Jahren bereits getan wurde. Eine Sonderstellung in der Arktis nimmt die Beringstrasse ein, sie ist der einzige Bereich mit einer Meereiszunahme. Diese ist wahrscheinlich durch eine Temperaturabnahme im betroffenen Gebiet im Zusammenhang mit der Pazifischen Dekadenoszillation zu erklären, da keine Anzeichen für einen Eistransport zu erkennen waren.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse sind wenig aufschlußreich. In der ersten Hauptkomponente ist der ganzjährige Trend enthalten, doch sind die weiteren Hauptkomponenten nicht so leicht zu interpretieren. Sie enthalten die Abweichungen, welche in den einzelnen Jahren auftreten können. Außerdem sind für die Darstellung von ausreichend Informationen viele Hauptkomponenten erforderlich, so dass die Hauptkomponentenanalyse in der hier verwendeten Form nicht zur komprimierten Darstellung der Zeitreihe anwendbar ist.

Als weiteres Vorgehen sollte daher die Hauptkomponentenanalyse nur auf einzelne Regionen angewendet werden, so dass die Hauptkomponenten weitestgehend einheitliche Daten enthalten. Außerdem gibt es andere Arten der Hauptkomponentenanalyse, welche hier eventuell zum Erfolg führen können, zum Beispiel die unabhängige Komponentenanalyse (Hyvärinen und Oja, 2000).

## A. Literatur

- Comiso, J. C., D. J. Cavalieri et al. (1997). „Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques“. *Remote Sensing of Environment* 60.3, S. 357–384. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00220-9.
- Comiso, J. C. und F. Nishio (2008). „Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data“. *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 113.2, C02S07. DOI: 10.1029/2007JC004257.
- Deser, C. und H. Teng (2008). „Evolution of Arctic sea ice concentration trends and the role of atmospheric circulation forcing, 1979-2007“. *Geophysical Research Letters* 35.2, S. L02504. DOI: 10.1029/2007GL032023.
- Haas, C. et al. (2008). „Reduced ice thickness in Arctic Transpolar Drift favors rapid ice retreat“. *Geophysical Research Letters* 35.17, S. L17501. DOI: 10.1029/2008GL034457.
- Hyvärinen, A. und E. Oja (2000). „Independent component analysis: algorithms and applications“. *Neural Networks* 13.4-5, S. 411–430. DOI: 10.1016/S0893-6080(00)00026-5.
- Liu, J. (2004). „Interpretation of recent Antarctic sea ice variability“. *Geophysical Research Letters* 31.2, S. L02205. DOI: 10.1029/2003GL018732.
- Mantua, N. J. und S. R. Hare (2002). „The Pacific Decadal Oscillation“. *Journal of Oceanography* 58.1, S. 35–44. DOI: 10.1023/A:1015820616384.
- Massom, R. a. und S. E. Stammerjohn (2010). „Antarctic sea ice change and variability – Physical and ecological implications“. *Polar Science* 4.2, S. 149–186. DOI: 10.1016/j.polar.2010.05.001.
- Parkinson, C. L. und D. J. Cavalieri (2008). „Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2006“. *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 113.7, S. C07004. DOI: 10.1029/2007JC004564.
- Parkinson, C. L., D. J. Cavalieri et al. (1999). „Arctic sea ice extends, areas, and trend, 1978-1996“. *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 104, S. 20837–20856.
- Petrich, C. und H. Eicken (2010). „Growth, Structure and Properties of Sea Ice“. *Sea Ice*. Hrsg. von D. N. Thomas und G. S. Dieckmann. 2. Aufl. Wiley-Blackwell, S. 23–79.
- Shlens, J. (2014). *A Tutorial on Principal Component Analysis*. arXiv: 1404.1100.
- Wendler, G. et al. (2013). „Recent sea ice increase and temperature decrease in the Bering Sea area, Alaska“. *Theoretical and Applied Climatology* 117.3-4, S. 393–398. DOI: 10.1007/s00704-013-1014-x.

- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Bd. 100. International Geophysics. Elsevier, S. 519–562. DOI: 10.1016/B978-0-12-385022-5.00012-9.
- Zwally, H. J. et al. (2002). „Variability of Antarctic sea ice 1979 – 1998“. *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 107.

## B. Anhang

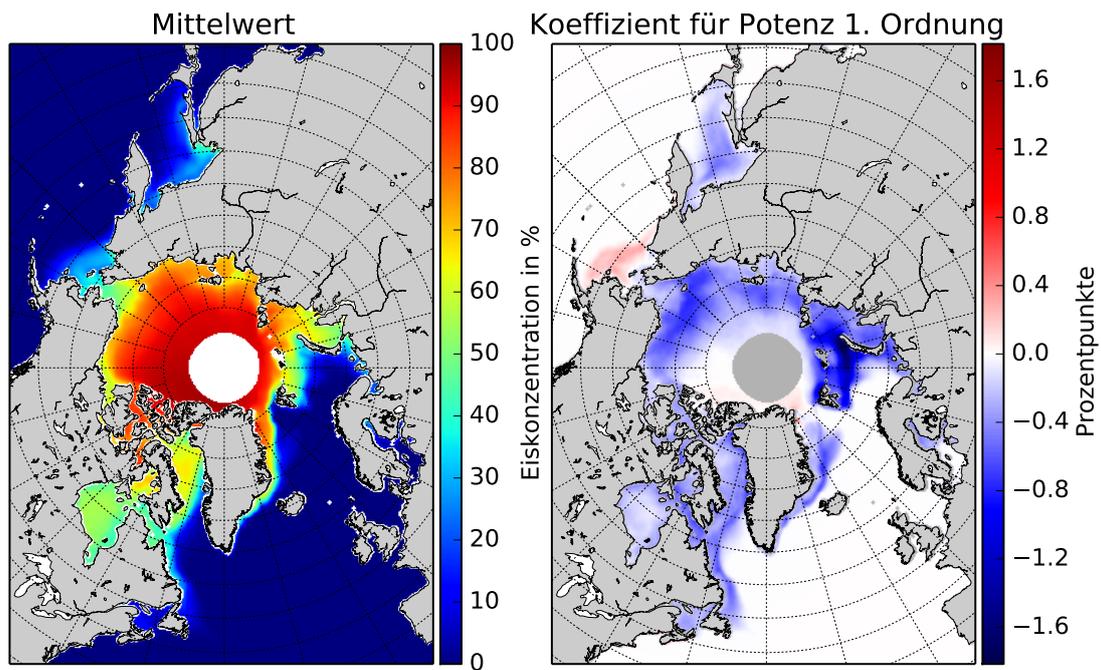


Abbildung B.1.: Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Arktis für das gesamte Jahr. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von  $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr.

Monat	$c_1$ in $\text{km}^2/\text{a}$	$c_2$ in $\text{km}^2/\text{a}^2$
1	$-2473.6 \pm 13641.3$	$-951.4 \pm 387.8$
2	$-7779.8 \pm 17262.8$	$-738.8 \pm 488.5$
3	$-31224.7 \pm 16896.4$	$104.9 \pm 476.0$
4	$-55532.1 \pm 17560.1$	$773.0 \pm 492.4$
5	$-37868.2 \pm 14486.4$	$146.3 \pm 404.4$
6	$-22758.8 \pm 17416.7$	$-770.6 \pm 484.0$
7	$-13296.1 \pm 20711.8$	$-1277.8 \pm 573.0$
8	$-3070.9 \pm 21779.7$	$-1793.5 \pm 599.9$
9	$4332.7 \pm 25609.0$	$-2106.4 \pm 702.3$
10	$39629.4 \pm 29173.2$	$-2981.6 \pm 796.5$
11	$20387.6 \pm 18186.1$	$-1715.2 \pm 494.3$
12	$-916.5 \pm 16949.9$	$-987.7 \pm 458.7$
Jahr	$-9214.3 \pm 24580.7$	$-1024.9 \pm 1006.8$

(a) Arktis

Monat	$c_1$ in $\text{km}^2/\text{a}$	$c_2$ in $\text{km}^2/\text{a}^2$
1	$-3013.6 \pm 24900.8$	$491.3 \pm 707.9$
2	$-3128.6 \pm 16892.8$	$363.2 \pm 478.0$
3	$18071.4 \pm 24548.9$	$-106.6 \pm 691.5$
4	$34537.0 \pm 34900.9$	$-400.9 \pm 978.7$
5	$47389.3 \pm 32315.7$	$-644.8 \pm 902.1$
6	$-6333.1 \pm 30623.3$	$910.0 \pm 851.1$
7	$-20773.5 \pm 24396.6$	$1113.9 \pm 675.0$
8	$-18719.3 \pm 20479.8$	$953.9 \pm 564.1$
9	$-25963.6 \pm 22636.9$	$1173.5 \pm 620.7$
10	$-37021.4 \pm 23354.2$	$1484.6 \pm 637.6$
11	$-43391.3 \pm 24997.7$	$1569.0 \pm 679.5$
12	$-12101.4 \pm 42472.0$	$881.0 \pm 1149.4$
Jahr	$-5870.7 \pm 26246.3$	$649.0 \pm 689.5$

(b) Antarktis

Tabelle B.1.: Linearer Koeffizienten  $c_1$  und quadratischer Koeffizient  $c_2$  mitsamt ihren Fehlern für die quadratischen Fits durch die Meereisfläche.

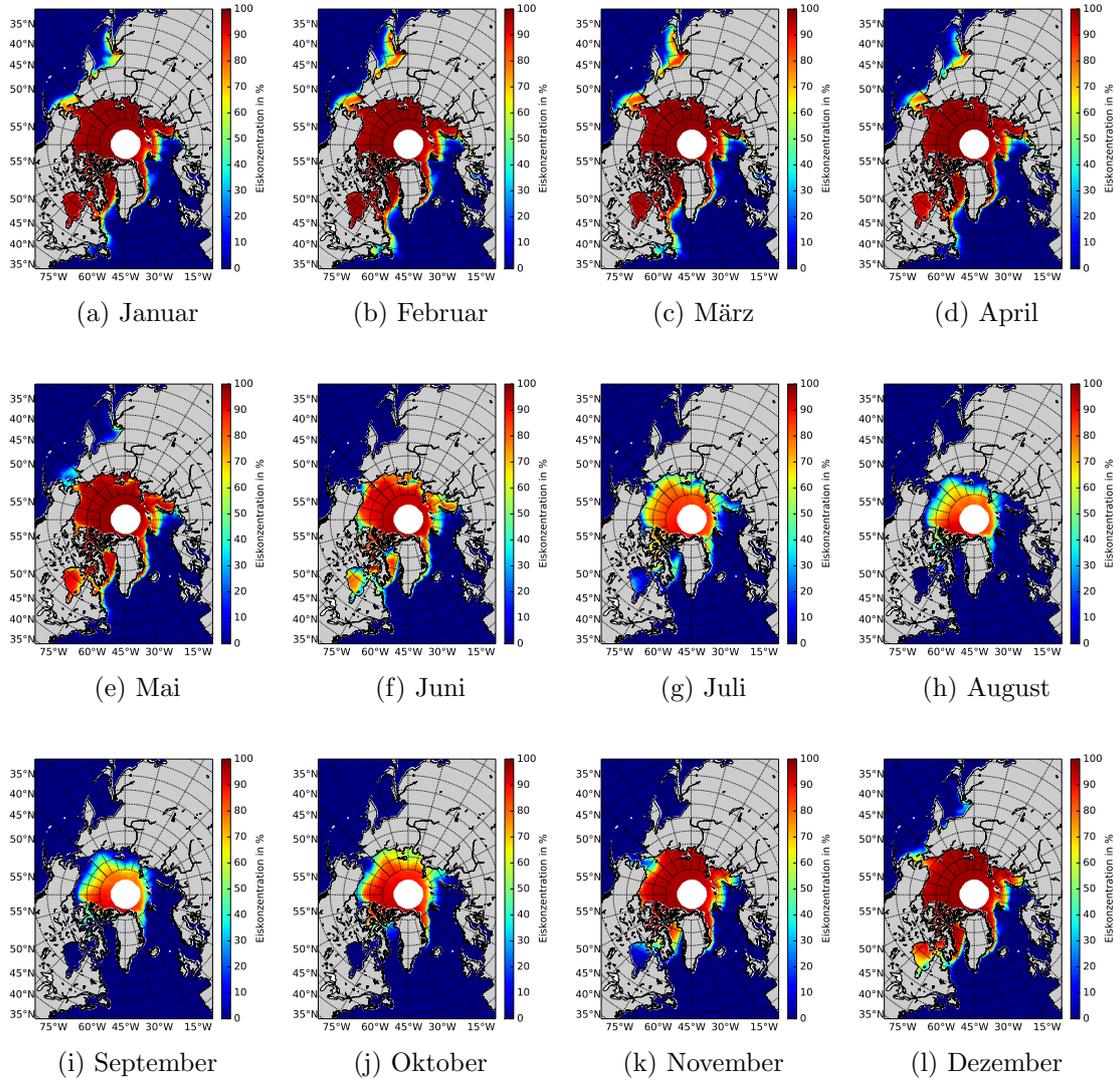


Abbildung B.2.: Mittelwerte der Eiskonzentrationen für die jeweiligen Monate über alle Jahre in der Arktis.

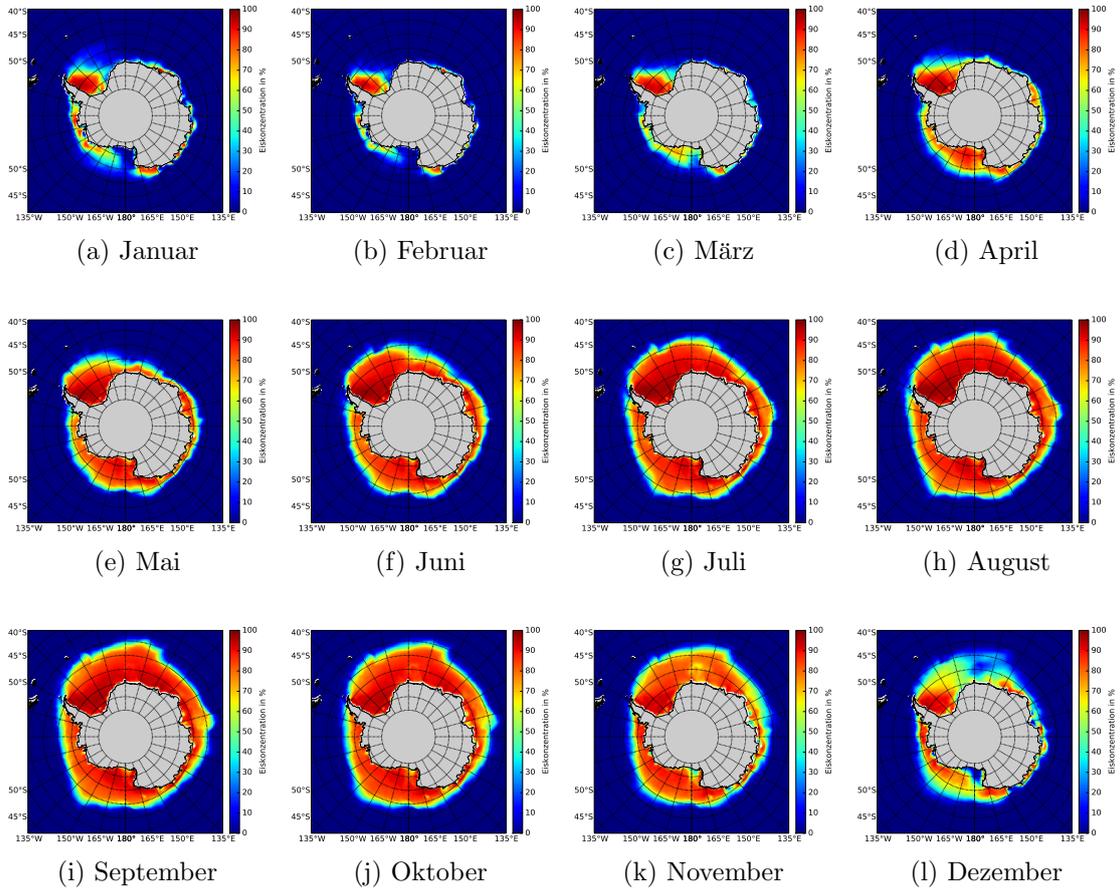
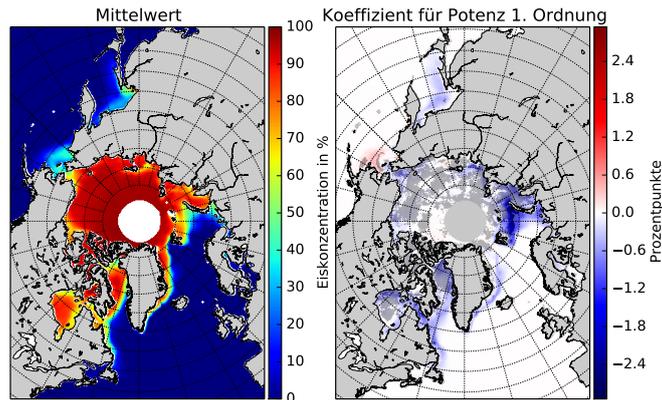
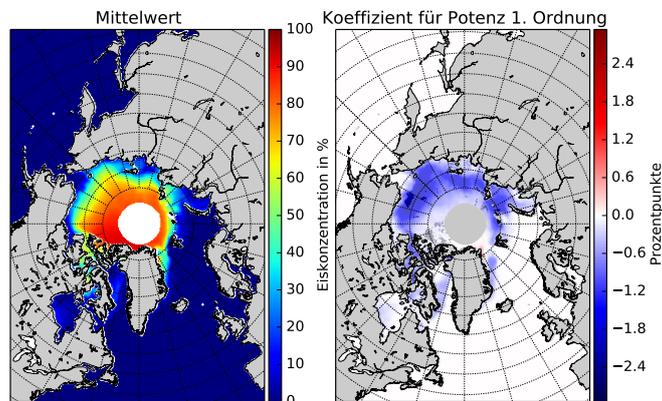


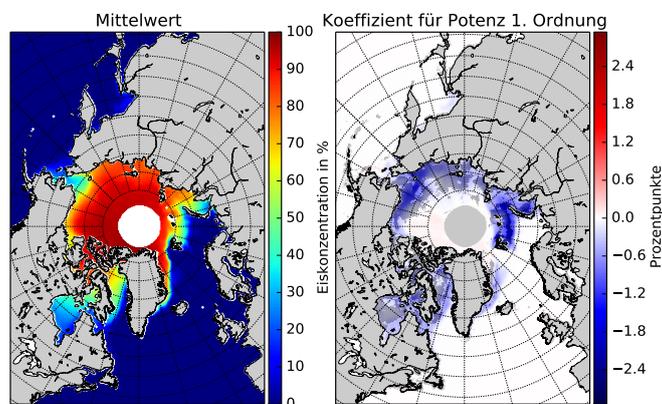
Abbildung B.3.: Mittelwerte der Eiskonzentrationen für die jeweiligen Monate über alle Jahre in der Antarktis.



(a) 2. Quartal

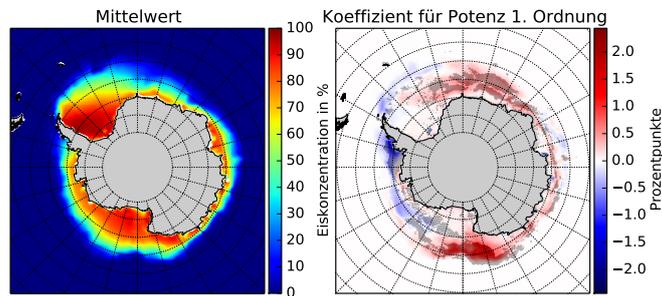


(b) 3. Quartal

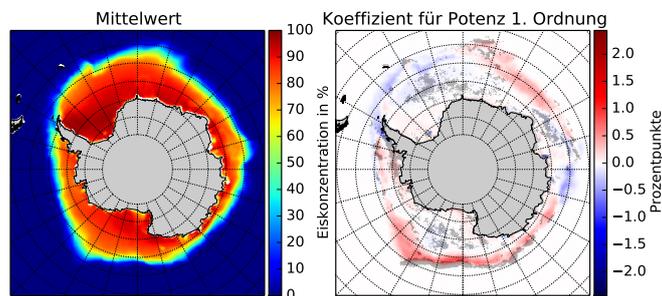


(c) 4. Quartal

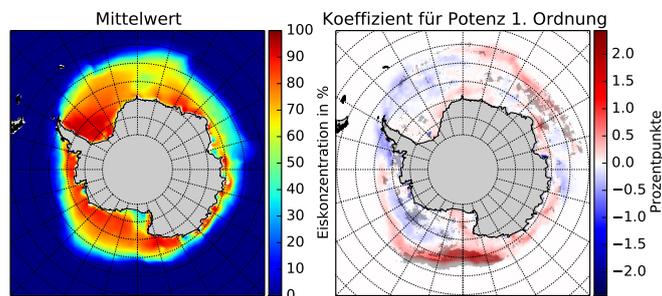
Abbildung B.4.: Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Arktis. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von  $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr.



(a) 2. Quartal



(b) 3. Quartal



(c) 4. Quartal

Abbildung B.5.: Pixelweise Trends der Eiskonzentration mit linearer Interpolation für die Antarktis. Dargestellt ist der Mittelwert im betrachteten Zeitraum sowie der Anstieg der Eiskonzentration. Ausgegraute Werte bei den Trends zeigen eine Korrelation von  $R^2 < 0.7$ , alle Werte in Prozentpunkte pro Jahr.

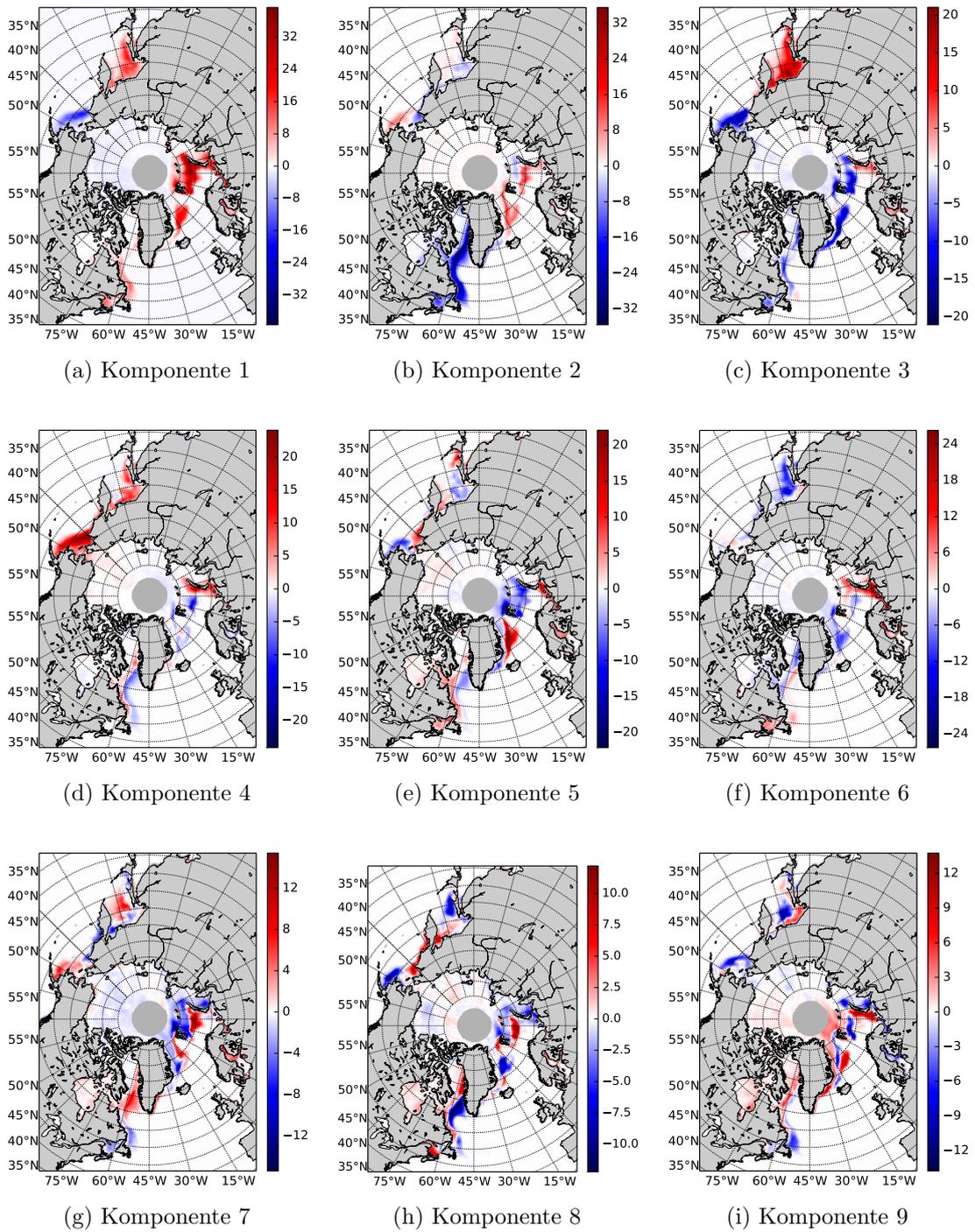
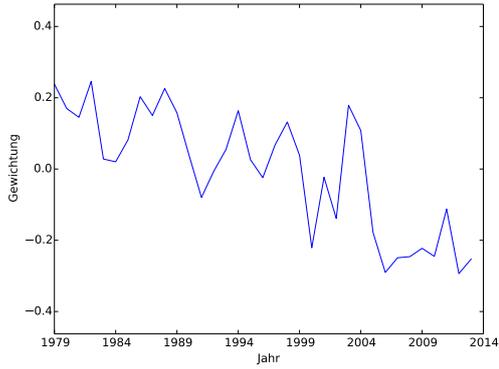
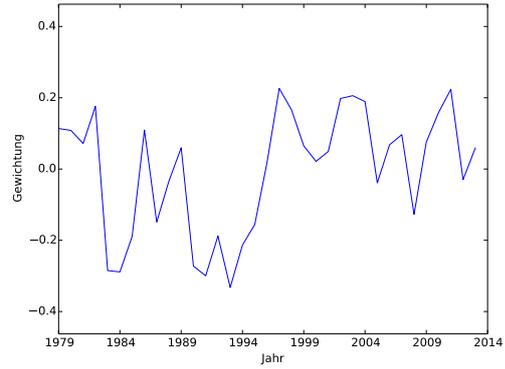


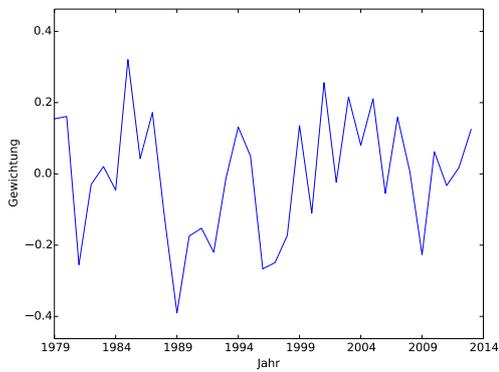
Abbildung B.6.: Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis für den Januar.



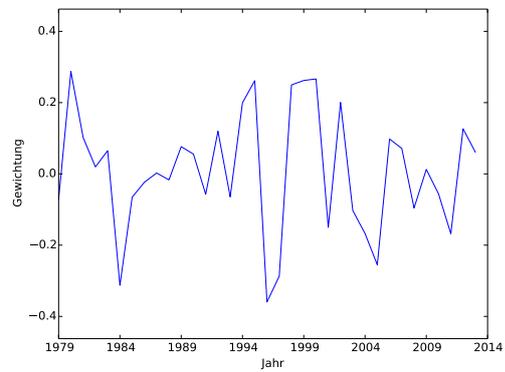
(a) Komponente 1



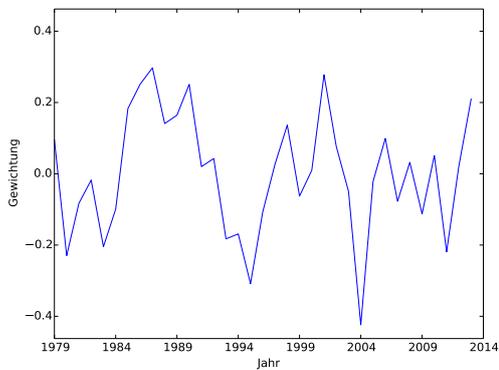
(b) Komponente 2



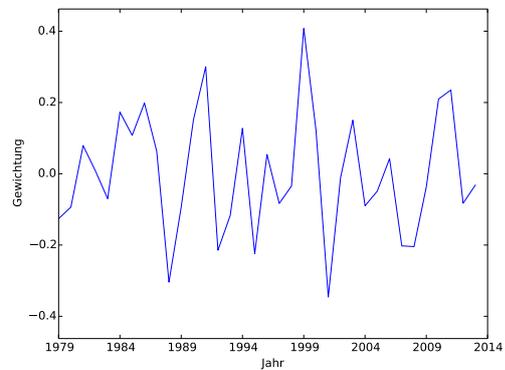
(c) Komponente 3



(d) Komponente 4



(e) Komponente 5



(f) Komponente 6

Abbildung B.7.: Gewichtungen der einzelnen Hauptkomponenten der Eiskonzentrationen der Arktis für den Januar.

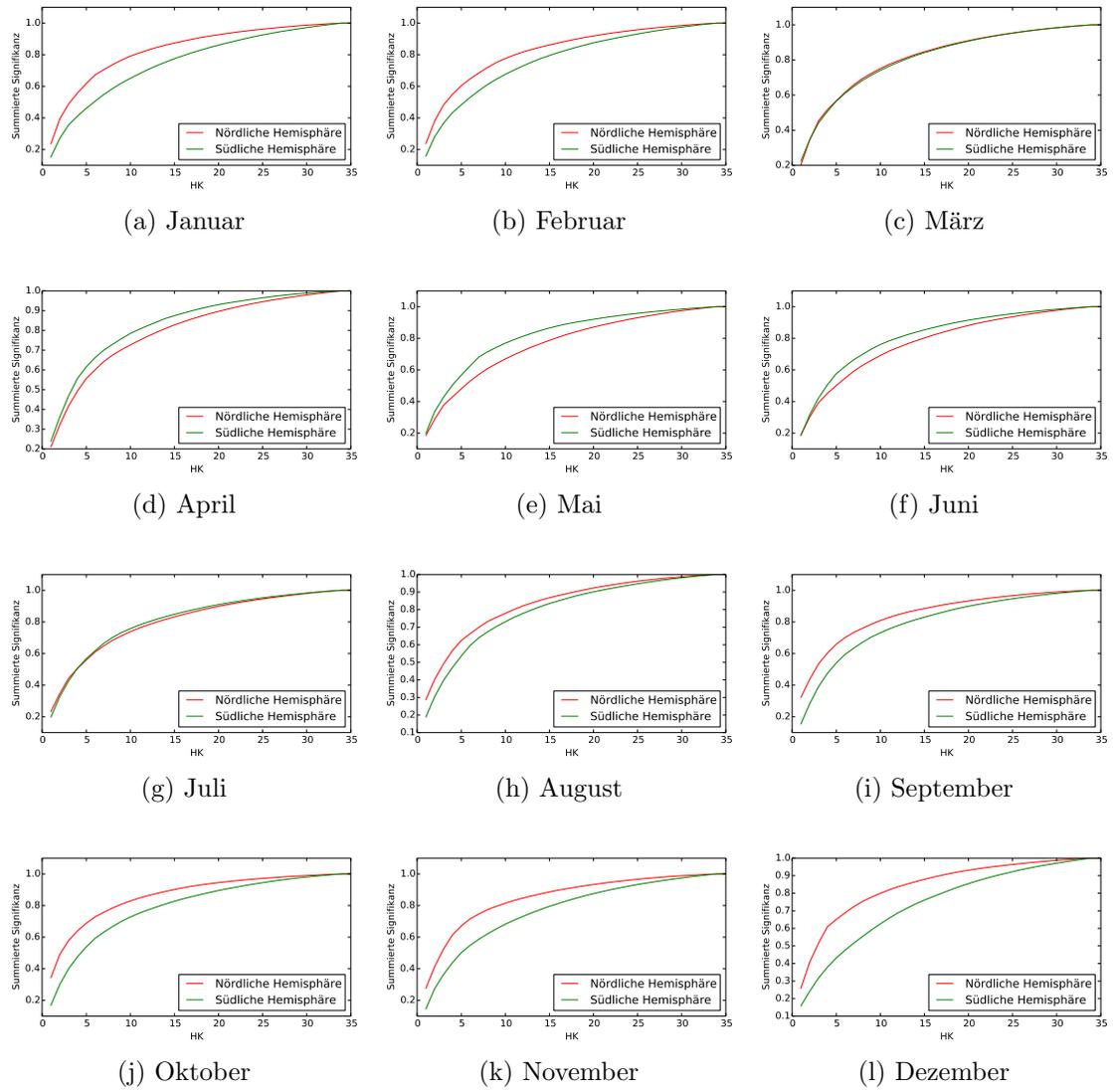


Abbildung B.8.: Summierte Signifikanzen der Hauptkomponenten für eine monatliche Analyse.

**Diese Erklärungen sind in jedes Exemplar der Abschlussarbeit mit einzubinden.**

Name: \_\_\_\_\_

Matrikel-Nr.: \_\_\_\_\_

## **Urheberrechtliche Erklärung**

Erklärung gem. § 10 (10) Allgemeiner Teil der BPO vom 27.10.2010

Hiermit versichere ich, dass ich meine Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe angefertigt habe, und dass ich keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich unter Angabe der Quellen als solche kenntlich gemacht.

Die Bachelorarbeit darf nach Abgabe nicht mehr verändert werden.

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

## **Erklärung zur Veröffentlichung von Abschlussarbeiten**

Bitte auswählen und ankreuzen:

- Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.
- Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit nach 30 Jahren (gem. §7 Abs.2 BremArchivG) im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.
- Ich bin nicht damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_