



TU WIEN  
DEPARTMENT OF  
GEODESY AND  
GEOINFORMATION

## DIPLOMARBEIT

# Modellierung der atmosphärischen Anregung der Polbewegung für das 21. Jahrhundert unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Klimaentwicklungsszenarien

zur Erlangung des akademischen Grades

## Diplom-Ingenieurin

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation

Forschungsbereich Höhere Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. techn. Sigrid Böhm

durch

**Anne Magdalena Strümpf**

Matrikelnummer: 11703477

Wien, im Februar 2024

\_\_\_\_\_  
Unterschrift (Verfasserin)

\_\_\_\_\_  
Unterschrift (Betreuerin)

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/ Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im Februar 2024

---

## Danksagung

Zuallererst möchte ich mich ganz herzlich bei Sigrid Böhm für ihre Betreuung bedanken! Dankeschön für dein immer offenes Ohr, für alle E-Mails und Besprechungen und für die Ermutigung, jede noch so banale Frage zu stellen. Danke für den Rückhalt, das Wissen und die Erfahrung, die du mir weitergegeben hast, ich hätte keine besseren Rahmenbedingungen für den Arbeitsprozess bekommen können.

Ich möchte mich auch bei Lorenz und Clemens ganz herzlich für unsere gemeinsame Zeit im Studium bedanken. Danke für die Zusammenarbeit, fürs gemeinsame Lernen und vor allem für den Spaß, den wir zusammen hatten.

Danke Mama, Danke Papa, zum einen, dass ihr mir ermöglicht habt zu studieren, dass ihr mir immer das Gefühl gebt, dass ich alles schaffen kann, und dass ihr euch immer die Zeit nehmt, mich zu unterstützen und mir zu helfen.

Danke Michi, dass du mich durch alle Höhen und Tiefen mit so viel Geduld und Liebe begleitest.

## Kurzfassung

Bezogen auf den Erdkörper wird die zeitlich variable Lageveränderung der Erdachse als Polbewegung bezeichnet. Die Polbewegung zeigt sich als Schwingung mit vielen unterschiedlichen Perioden und wird zu einem erheblichen Teil von der Atmosphäre angeregt. Die Atmosphäre weist zwar verglichen mit dem Erdkörper eine sehr geringe Masse auf, unterliegt aber aufgrund der vielen Luftbewegungen, die in ihr stattfinden, großen Drehimpulsschwankungen, die sie zu einem Großteil an die feste Erde weitergibt.

In der vorliegenden Arbeit wird diese Anregung der Polbewegung mithilfe von atmosphärischen Drehimpulsfunktionen modelliert und bis zum Jahr 2100 prognostiziert. Dabei wird besonders auf die zukünftige Entwicklung des Klimas aufgrund von anthropogenem Treibhausgasausstoß Bezug genommen. Die Drehimpulsfunktionen werden mit Luftdruck- und Windgeschwindigkeitsdaten ausgewertet. Diese Daten stammen aus elf unterschiedlichen Klimamodellen des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), die jeweils für fünf Klimaentwicklungsszenarien berechnet wurden. Das Hauptziel ist, eine Prognose für die Veränderung der atmosphärischen Anregung der Polbewegung über das 21. Jahrhundert zu berechnen und zu untersuchen, ob sich die Entwicklung der atmosphärischen Anregung zwischen den Klimaentwicklungsszenarien unterscheidet.

Pro Klimaszenario wird aus den elf Modellen eine Multi-Model-Mean (MMM) Zeitreihe der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen berechnet. Die atmosphärische Anregung der Polbewegung ist zum größten Teil von Druckveränderungen angetrieben. Weil die Ozeane Unterschiede im Oberflächendruck durch Heben und Senken der Wasseroberfläche ausgleichen, ist die Polbewegung in einer Richtung deutlich stärker gedämpft, was zu einer elliptischen Form ihrer Schwingung führt. Die am stärksten ausgeprägte Periode der atmosphärischen Anregung ist die jährliche. Die Amplitude bewegt sich zwischen 14 und 18 Millibogensekunden, was projiziert auf die Erdoberfläche etwa 50 cm entspricht. Der Vergleich der MMM Zeitreihen zeigt, dass die Amplitude der atmosphärischen Anregung stärker ansteigt, je intensiver der Treibhausgasausstoß für das Klimaszenario angenommen wird. Am Beginn der Zeitreihe unterscheiden sich die Amplituden der Szenarien nur um etwa eine Millibogensekunde, am Ende driften die Szenarien um bis zu drei Millibogensekunden auseinander. Das bedeutet, dass die Atmosphäre die Polbewegung mit fortschreitendem Klimawandel stärker anregt als bei einer treibhausgasarmen Entwicklung.

# Abstract

The temporally variable positional change of the Earth's axis related to the Earth's body is called polar motion. Polar motion manifests as an oscillation with multiple periods and is influenced to a significant part by the atmosphere. Although the mass of the atmosphere is small compared to that of the solid Earth, it undergoes substantial angular momentum fluctuations due to air movements within it, which are largely transferred to the solid Earth.

In this work, the atmospheric excitation of polar motion is modelled using angular momentum functions and predicted up to 2100. The angular momentum functions are evaluated using surface air pressure and wind speed data, provided by eleven different climate models from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), each of which was run for five climate development scenarios. Particular consideration is given to the influence of anthropogenic greenhouse gas emissions on climate development, and the changing atmospheric behavior concerning polar motion excitation is investigated. In other words, the main goal is to forecast atmospheric excitation of polar motion throughout the 21st century and to examine whether the development of atmospheric excitation varies between the different climate development scenarios.

For each climate scenario, a Multi-Model Mean (MMM) time series of atmospheric angular momentum functions is calculated from the output of the eleven models. The atmospheric excitation of polar motion is primarily driven by pressure changes. Because oceans compensate for differences in surface pressure by lifting and lowering the water surface, polar motion is significantly damped in one direction, leading to an elliptical shape of its oscillation. The major period of atmospheric excitation is an annual wobble. The amplitude ranges between 14 and 18 milliarcseconds, corresponding to approximately 50 cm projected onto the Earth's surface. The comparison of the MMM time series reveals that the amplitude of atmospheric excitation increases more intensely with increasing greenhouse gas emissions assumed for the scenarios. At the beginning of the time series, the amplitudes of the scenarios differ by only about one milliarcsecond, while at the end, the scenarios differ by up to three milliarcseconds. These findings imply that the atmosphere excites polar motion more intensely with ongoing climate change than within a low greenhouse gas emission development.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation der Arbeit . . . . .	1
1.2. Hypothese . . . . .	2
1.3. Überblick über Datengrundlage und Methode . . . . .	3
1.4. Zielsetzungen . . . . .	4
<b>2. Theoretischer Hintergrund und Stand der Forschung</b>	<b>6</b>
2.1. Erdorientierungsparameter . . . . .	6
2.2. Polbewegung . . . . .	9
2.3. Atmosphärische Anregung der Polbewegung . . . . .	15
2.4. Mathematische Formulierung der Polbewegung . . . . .	17
2.4.1. Herleitung der Liouville Gleichung . . . . .	17
2.4.2. Linearisierung der Liouville Gleichung . . . . .	18
2.4.3. Anregungsfunktionen und Lösungen der Liouville Gleichung	20
2.4.4. Drehimpulsfunktionen . . . . .	21
2.4.5. Effektive Drehimpulsfunktionen . . . . .	23
2.4.6. Evaluierung der effektiven atmosphärischen Drehimpulsfunk-	
tionen . . . . .	25
2.4.7. Invertierte Barometer Hypothese als Korrektur für den at-	
mosphärischen Druckterm . . . . .	27
2.4.8. Alternative Berechnung über Drehmomentfunktionen . . . . .	28
2.5. Coupled Model Intercomparison Project, Scenario Model Intercom-	
parison Project . . . . .	29
2.5.1. Klimamodelle . . . . .	30
2.5.2. Coupled Model Intercomparison Project . . . . .	31
2.5.3. Scenario Model Intercomparison Project und Klimaszenarien	32

<b>3. Berechnung und Auswertung</b>	<b>36</b>
3.1. Datengrundlage . . . . .	36
3.2. Auswertung mit Matlab . . . . .	37
3.2.1. Vergleich der Modelle und Szenarien und Evaluation der Trends . . . . .	39
3.2.2. Fast Fourier Transformation und Ausgleich der Amplitude der jährlichen Schwingung . . . . .	40
3.3. Validierung und Vergleich mit GFZ Referenzdaten . . . . .	42
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>44</b>
4.1. Vergleich der Richtungen $\chi_1$ und $\chi_2$ und Vergleich der Klimamodelle	46
4.1.1. Vergleich der Richtungen $\chi_1$ und $\chi_2$ . . . . .	46
4.1.2. Vergleich der Klimamodelle . . . . .	47
4.2. Vergleich der Klimaszenarien . . . . .	52
4.2.1. Perioden . . . . .	52
4.2.2. Multi-Model-Mean Vergleich der Szenarien . . . . .	53
4.2.3. Säkulare Trends . . . . .	56
4.2.4. Entwicklung der AAMs über das 21. Jahrhundert und Ausgleich der Amplitude der jährlichen Schwingung der Szenarien . . . . .	58
4.3. Vergleich von Druck- und Windterm . . . . .	62
4.3.1. Multi-Model-Mean Vergleich von Druck- und Windterm getrennt . . . . .	63
4.3.2. Ausgleich der jährlichen Amplitude von Druck- und Windterm getrennt . . . . .	65
4.4. Vergleich der Ergebnisse mit GFZ Referenzdaten . . . . .	66
4.4.1. Vergleich der Multi-Model-Means pro Szenario mit den Referenzdaten . . . . .	67
4.4.2. Vergleich der einzelnen Modell Outputs des Szenarios SSP2-4.5 mit den Referenzdaten . . . . .	69
4.4.3. Vergleich der ausgeglichenen Amplitude der jährlichen Schwingung der Referenzdaten . . . . .	71
4.4.4. Vergleich von Multi-Model-Mean pro Szenario, Wind- und Druckterm getrennt, mit den Referenzdaten . . . . .	73

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>5. Fazit</b>	<b>77</b>
5.1. Zusammenfassung der Auswertung . . . . .	77
5.2. Wichtigste Ergebnisse . . . . .	77
5.3. Evaluierung der Hypothese . . . . .	78
5.4. Mögliche zukünftige Forschung . . . . .	79
<b>A. Anhang</b>	<b>80</b>
A.1. ad Kapitel 4.1.2 . . . . .	80
A.2. ad Kapitel 4.2.4: . . . . .	81
<b>B. Referenzen der GFZ und CMIP6 Daten</b>	<b>83</b>
<b>Referenzen</b>	<b>87</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1. Mittlerer Trend des Oberflächendrucks für das 21. Jahrhundert für verschiedene Klimaszenarien . . . . .	4
2.1. Transformation vom himmelfesten (GCRS) ins erdfeste Referenzsystem (TRS) . . . . .	7
2.2. Bewegungen des CIP . . . . .	8
2.3. Frequenzen Polbewegung und Nutation . . . . .	9
2.4. Polbewegung 1962–2019 . . . . .	10
2.5. Perioden und Amplituden der Polbewegung . . . . .	15
2.6. Beobachtete und modellierte Polbewegung . . . . .	16
2.7. Koordinatensystem der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen . .	22
2.8. Schematische Darstellung von Wind- und Druckterm bzw. Bewegungs- und Massenterm . . . . .	23
2.9. Beiträge zu den Skalierungsfaktoren der effektiven äquatorialen Drehimpulsfunktionen . . . . .	25
2.10. Druckterm der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen ohne und mit IB-Korrektur . . . . .	28
2.11. Schematische Darstellung der auf die Erde wirkenden Drehmomente	29
2.12. Schematische Darstellung eines Klimamodells . . . . .	30
2.13. Kausalkette der Erderwärmung . . . . .	35
3.1. Überlagerung einer prograden und einer retrograden kreisförmigen Schwingung . . . . .	41
4.1. Atmosphärischer Drehimpuls für Szenario SSP2-4.5 und Modell FGOALS-g3 . . . . .	45
4.2. Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP1-1.9 im Zeitraum 2015–2025 . . . . .	48
4.3. Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP1-1.9 im Zeitraum 2090–2100 . . . . .	48
4.4. Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP5-8.5 im Zeitraum 2015–2025 . . . . .	49
4.5. Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP5-8.5 im Zeitraum 2090–2100 . . . . .	49
4.6. Frequenz- und Amplitudenspektrum der berechneten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen für die Multi-Model-Mean Ergebnisse aller fünf Klimaszenarien . . . . .	53

4.7. Atmosphärische Drehimpulsfunktionen über den gesamten Zeitraum 2015–2100, Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5 . . . . .	54
4.8. Multi-Model-Mean AAMs aller fünf Klimaszenarien für die Jahre 2090 bis 2100 . . . . .	54
4.9. Lineare Trends der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen für die Klimaszenarien mit Multi-Model-Mean Schwingung für SSP2-4.5 .	57
4.10. Multi-Model-Mean der ausgeglichenen Amplituden der jährlichen Schwingung für jedes Klimaszenario . . . . .	60
4.11. Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP1-1.9, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung . . . . .	61
4.12. Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP5-8.5, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung . . . . .	62
4.13. Druckterm für die letzten 10 Jahre Multi-Model-Mean . . . . .	64
4.14. Windterm für die letzten 10 Jahre Multi-Model-Mean . . . . .	64
4.15. Multi-Model-Mean der ausgeglichenen Amplituden der jährlichen Schwingung für jedes Klimaszenario, Druck- und Windterm getrennt	66
4.16. Vergleich der GFZ Referenzdaten mit dem Multi-Model-Mean für jedes Szenario . . . . .	67
4.17. Vergleich der GFZ Referenzdaten mit dem Output der elf Klimamodelle für SSP2-4.5 . . . . .	70
4.18. Ausgeglichene jährliche Amplitude der GFZ Referenzdaten . . . . .	72
4.19. Vergleich des Multi-Model-Mean Druckterms jedes Szenarios mit den Referenzdaten . . . . .	74
4.20. Vergleich des Multi-Model-Mean Windterms jedes Szenarios mit den Referenzdaten . . . . .	74
A.1. Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP2-4.5 im Zeitraum 2015-2025 . . . . .	80
A.2. Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP2-4.5 im Zeitraum 2090-2100 . . . . .	80
A.3. Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP1-2.6, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung . . . . .	81

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

A.4. Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP2-4.5, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung . . . . .	82
A.5. Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP3-7.0, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung . . . . .	82

## Tabellenverzeichnis

2.1. Verwendete Klimamodelle . . . . .	31
4.1. Standardabweichung der Differenzen zwischen Multi-Model-Mean und Output der einzelnen Modelle für jedes Szenario . . . . .	50
4.2. Korrelationskoeffizienten zwischen Multi-Model-Mean und Output der einzelnen Modelle für jedes Szenario . . . . .	51
4.3. Korrelationskoeffizienten zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen der fünf Szenarien untereinander . . . . .	55
4.4. Root Mean Square Error zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen der fünf Szenarien untereinander . . . . .	55
4.5. Steigung und Ordinatenabschnitt der linearen Trends der Zeitserien pro Szenario . . . . .	57
4.6. Korrelationskoeffizienten zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen zwischen den ersten und letzten 10 Jahren des untersuchten Zeitraums 2015–2100 für jedes Szenario . . . . .	58
4.7. Root Mean Square Error zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen zwischen den ersten und letzten 10 Jahren des untersuchten Zeitraums 2015–2100 für jedes Szenario . . . . .	59
4.8. Korrelationskoeffizienten zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi-Model-Mean Werten jedes Szenarios . . . . .	68
4.9. Root Mean Square Error zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi-Model-Mean Werten jedes Szenarios . . . . .	68
4.10. Korrelationskoeffizienten zwischen GFZ Vergleichsdaten und allen Modellwerten von SSP2-4.5 . . . . .	71
4.11. RMSE zwischen GFZ Vergleichsdaten und Modellwerten von SSP2-4.5	72
4.12. Korrelationskoeffizienten zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi-Model-Mean von jedem Szenario für Druckterm und Windterm getrennt . . . . .	75
4.13. Root Mean Square Error zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi-Model-Mean von jedem Szenario für Druckterm und Windterm getrennt . . . . .	75

## Abkürzungsverzeichnis

**AAM** Atmospheric Angular Momentum (atmosphärische Drehimpulsfunktion)

**CIP** Celestial Intermediate Pole

**CMIP** Coupled Model Intercomparison Project

**CW** Chandler Wobble

**DORIS** Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

**ECMWF** European Centre for Medium-range Weather Forecasts

**ESGF** Earth System Grid Federation

**FCN** Free Core Nutation

**FFT** Fast Fourier Transformation

**GCRS** Geocentric Celestial Reference System

**GFZ** Deutsches GeoForschungsZentrum

**GNSS** Global Navigation Satellite Systems

**IERS** International Earth Rotation and Reference System Service

**ICRF** International Celestial Reference Frame

**IB** Inverted Barometer

**IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change

**ITRF** International Terrestrial Reference Frame

**LLL** Lunar Laser Ranging

**MMM** Multi-Model-Mean

**RMSE** Root Mean Square Error

**SLR** Satellite Laser Ranging

**SSP** Shared Socioeconomic Pathway

**TRS** Terrestrial Reference System

**UTC** Universal Time Coordinated

**UT1** Universal Time, Weltzeit

**VLBI** Very Long Baseline Interferometry

## 1. Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Polbewegung, also der zeitlich veränderlichen Lage der Erdachse bezogen auf den Erdkörper, genauer gesagt mit der atmosphärischen Anregung der Polbewegung. Die atmosphärische Anregung wird mithilfe von Drehimpulsfunktionen berechnet. In der Arbeit wird aufgrund von prognostizierten Oberflächendruck- und Winddaten die Veränderung der Polbewegungsanregung über das 21. Jahrhundert modelliert. Dazu werden fünf unterschiedliche zukünftige Szenarien der sozioökonomischen Entwicklung und elf globale Klimamodelle herangezogen, die den unterschiedlich hohen Treibhausgasausstoß in die Atmosphäre simulieren.

### 1.1. Motivation der Arbeit

Die Erdrotationsachse ist nicht fix, sondern verändert ihre Lage im Raum und bezogen auf den Erdkörper mit der Zeit, da die Erde keine perfekt symmetrische Form aufweist, einen inhomogenen, mehrschichtigen inneren Aufbau besitzt, äußere Kräfte auf sie wirken und globale dynamische Prozesse im Erdinneren und an der Erdoberfläche stattfinden. Die Attraktion von Sonne, Mond und Planeten verursacht äußere Drehmomente, innere Drehmomente entstehen durch geodynamische Prozesse, wie die Bewegung von Fluiden, beispielsweise der Atmosphäre oder der Ozeane (Schindelegger et al., 2013).

Vernachlässigt man externe Drehmomente, gilt im System der Erde und ihrer geophysikalischen Fluide das Prinzip der Drehimpulserhaltung. Die zeitlichen Veränderungen im Drehimpuls der geophysikalischen Fluide spiegeln sich also in entgegengesetzten Veränderungen des Drehimpulses der festen Erde wider. Trotz ihrer im Vergleich zum Erdkörper geringen Masse, weist die Atmosphäre verhältnismäßig starke Drehimpulsschwankungen auf, die sie zu einem großen Teil an die feste Erde weitergibt. Die atmosphärischen Drehimpulsänderungen werden vor allem durch Druckvariationen und veränderliche Windgeschwindigkeiten hervorgerufen. Die Erde reagiert auf die äußeren und inneren Drehmomente mit Änderungen in ihrem Rotationsverhalten. Die Änderungen der Rotationsachse werden in einer axialen und zwei äquatorialen Komponenten beschrieben. Der axiale Anteil beschreibt die zeitliche Änderung der Rotationsgeschwindigkeit, die beiden äquatorialen Komponenten beschreiben die Schwankungen der Rotationsachse bezogen auf den Erdkörper, also die Polbewegung (Salstein et al., 1993).

Die genaue Kenntnis der zeitlichen Veränderung der Orientierung der Erdachse und der veränderlichen Rotationsgeschwindigkeit geben Einsicht in die Strukturen und Dynamiken im Erdinneren und über die Interaktion zwischen Erdkörper und Atmosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre. Auch der Einfluss des Menschen auf die Entwicklung der atmosphärischen Anregung der Polbewegung in Form von Treibhausgasausstoß ist ein wichtiger Aspekt der Thematik (Schuh und S. Böhm, 2020). Des Weiteren ist für die genaue Positionierung und Navigation die genaue Kenntnis der Erdrotationsachse und ihrer zeitlich variierenden Lage notwendig (Salstein et al., 1993).

Obwohl die Masse der Atmosphäre im Vergleich zur Masse des Erdkörpers nur etwa  $1 : 10^6$  beträgt, ist der Austausch von Drehimpuls zwischen der Atmosphäre und der festen Erde eine der größten Komponenten, die die Polbewegung anregen. Der Beitrag der Atmosphäre zur Polbewegung ist sogar größer als der Beitrag der Ozeane, deren Masse im Vergleich zur Atmosphäre etwa im Verhältnis  $10^2 : 1$  steht. Der Grund dafür, dass die Interaktion zwischen Atmosphäre und festem Erdkörper stärker ist als die zwischen fester Erde und Ozeanen oder flüssigem Kern, ist, dass die Bewegungen von Wassermassen und Erdkern viel langsamer ablaufen als die der Atmosphäre. Durch atmosphärische Bewegungen werden Polbewegungen mit halbtäglichen Perioden bis hin zu mehrere Jahre andauernden Zyklen angeregt (Munk und MacDonald, 1960). Die atmosphärische Anregung der Polbewegung hängt von Variationen des Oberflächendrucks und von Windfeldern in der Atmosphäre ab, wobei die Druckvariationen einen wesentlich größeren Anteil am Gesamtterm haben als die Winde (Nastula und Salstein, 1999).

Die Polbewegung wird in der vorliegenden Arbeit in Millibogensekunden (mas) angegeben. Eine Bewegung der Erdachse von einer Millibogensekunde projiziert auf die Erdoberfläche entspricht etwa drei Zentimetern.

## 1.2. Hypothese

Mit steigenden Temperaturen aufgrund des Klimawandels ändern sich auch die Verteilung des Luftdrucks und die Windgeschwindigkeiten. Je nach Treibhausgasausstoß, der von den Klimaszenarien unterschiedlich modelliert wird, ändern sich die Parameter unterschiedlich stark. Szenario SSP1-1.9 zeigt von den fünf die klimafreundlichste Entwicklung, SSP5-8.5 die klimaschädlichste. Der mittlere Trend des Luftdrucks an der Erdoberfläche für das 21. Jahrhundert ist für jedes der fünf untersuchten Klimaszenarien in Abbildung 1.1 gezeigt. An manchen Stellen sinkt

der Luftdruck, an anderen steigt er, die Trends werden aber mit steigendem Treibhausgasausstoß deutlich verstärkt. Mit steigender Erwärmung der Erde werden sich auch die globalen Windfelder verstärken und die Windgeschwindigkeiten erhöhen.

Für die Entwicklung der atmosphärischen Anregung der Polbewegung wird also angenommen, dass sie sich mit sich ändernden Druck- und Windbedingungen ebenfalls ändert. Für die fünf untersuchten Klimaszenarien werden die Änderungen unterschiedlich stark ausfallen. Für das klimafreundliche Szenario SSP1-1.9 wird nur eine kleine Verstärkung der atmosphärischen Anregung oder sogar eine Stagnation vermutet. Für die Szenarien SSP1-2.6 und SSP2-4.5 wird ein geringer Anstieg der atmosphärischen Anregung aufgrund der deutlichen Veränderungen des Oberflächendrucks und Winds angenommen. Die Szenarien SSP3-7.0 und SSP5-8.5 könnten einen starken Anstieg der Polbewegung prognostizieren, da die Druckunterschiede für diese beiden Szenarien und besonders für SSP5-8.5 sehr gravierend ausfallen. Es wird also angenommen, dass die atmosphärische Anregung der Polbewegung mit der Klimaerwärmung zunimmt, und zwar umso stärker, je mehr Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen.

### 1.3. Überblick über Datengrundlage und Methode

Die atmosphärische Anregung der Polbewegung wird über Drehimpulsfunktionen modelliert. Diese basieren auf dem Prinzip der Drehimpulserhaltung in einem geschlossenen System, in diesem Fall das System Erdkörper und Atmosphäre. Eine zeitliche Änderung des Drehimpulses der Atmosphäre kommt durch Druckvariationen und Winde zustande. Diese wird auf die feste Erde übertragen und hat eine zeitliche Änderung gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung des Drehimpulsvektors des Erdkörpers zur Folge. Die Drehimpulsfunktionen sind diskretisierte Volumenintegrale über die Druck- und Windverteilungen der Erde. Die meteorologischen Daten über Wind und Druck zur Auswertung der Drehimpulsfunktionen sind mit elf unterschiedlichen Klimamodellen für fünf verschiedene zukünftige Klimaszenarien prognostizierte Werte. Diese Daten werden vom Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) zur Verfügung gestellt (Meehl et al., 2000).

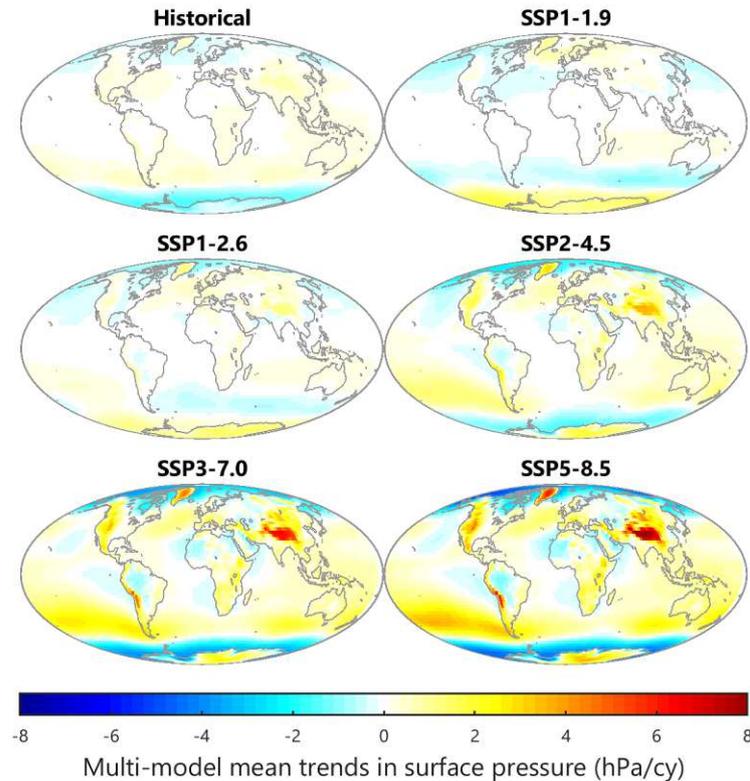


Abbildung 1.1: Mittlerer Trend des Oberflächendrucks für das 21. Jahrhundert für eine Klimasimulation nach historischen Bedingungen der Atmosphäre und den fünf in der vorliegenden Arbeit verwendeten Klimaszenarien SSP1-1.9 bis SSP5-8.5; die Reihenfolge der Klimaszenarien richtet sich nach der Höhe des erwarteten Treibhausgasausstoßes, SSP1-1.9 ist das ausstoßärmste Szenario, SSP5-8.5 das mit dem höchsten Treibhausgasausstoß (Sigrid Böhm, 2023).

## 1.4. Zielsetzungen

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Klimamodelle der berechneten atmosphärischen Anregung sollen für jedes der fünf Klimaszenarien verglichen werden. Weiters soll der Unterschied der beiden Komponenten der Polbewegungsanregung analysiert werden. Aus den Ergebnissen der elf Klimamodelle soll für jedes der fünf Klimaszenarien dann ein Mittelwert, ein sogenannter Multi-Model-Mean (MMM) berechnet werden, um eine möglichst verlässliche Prognose für die atmosphärische Anregung in jedem Szenario zu erhalten. Die Unterschiede zwischen den MMM-Prognosen der Klimaszenarien sollen besonders im Fokus der Untersuchungen liegen. Um die Entwicklung über das 21. Jahrhundert zu analysieren, werden

## 1 EINLEITUNG

---

die Amplituden der atmosphärischen Anregung jeweils über fünf Jahre ausgeglichen, so können der Anstieg der Anregung und dessen Unterschiede zwischen den Klimaszenarien analysiert werden. Neben der Amplitude werden auch die Hauptfrequenzen der atmosphärischen Anregung für jedes Klimaszenario untersucht. Da Druck und Wind unterschiedlich große Anteile an der atmosphärischen Anregung haben, werden die beiden Teile der Anregungsfunktionen und ihre Entwicklung über das 21. Jahrhundert auch getrennt voneinander untersucht. Ein wichtiger Aspekt ist auch die Kontrolle und Validierung der berechneten Ergebnisse mit vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) zur Verfügung gestellten Daten zur atmosphärischen Anregung der Polbewegung.

## 2. Theoretischer Hintergrund und aktueller Stand der Forschung

Der folgende Abschnitt umfasst Informationen zur Orientierung der Erdachse im Raum und zur Polbewegung. Weiters wird die mathematische Formulierung der Polbewegung hergeleitet. Abschließend folgt ein Abschnitt über die in der Arbeit verwendeten Klimaszenarien und Klimamodelle.

### 2.1. Erdorientierungsparameter

Die Orientierung der Erde im Raum wird durch fünf Parameter, die zu drei Gruppen zusammengefasst werden können, vollständig dargestellt:

- Präzession und Nutation, die langperiodische Variationen der Erdrotationsachse bezogen auf ein himmelfestes Referenzsystem beschreiben,
- Polbewegung in zwei Komponenten ( $x$ ,  $y$ ), die die Veränderung der Erdrotationsachse bezogen auf ein erdfestes Referenzsystem umfasst,
- und die Differenz zwischen Weltzeit (UT1) und Atomzeit (Universal Time Coordinated, UTC),  $UT1-UTC$  ( $dUT1$ ); diese steht in direktem Zusammenhang zur Tageslängenschwankung bzw. zur Schwankung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde.

Betrachtet man nur die Parameter der Polbewegung und die Tageslängenschwankungen, so erhält man einen Satz von Parametern, die Erdrotationsparameter genannt werden (Schindelegger et al., 2013). Durch diese drei Komponenten wird der momentane und zeitlich variable Vektor der Erdrotation beschrieben. Die ersten beiden Komponenten, die sich auf die Polbewegung beziehen, werden auch als äquatoriale Komponenten bezeichnet, die dritte Komponente, die mit der Änderung der Rotationsgeschwindigkeit zusammenhängt, als axiale Komponente.

Definiert werden die Erdorientierungsparameter durch Transformation zwischen erdfestem Referenzsystem TRS (Terrestrial Reference System) und raumfestem System GCRS (Geocentric Celestial Reference System), wie auch Abbildung 2.1 veranschaulicht.

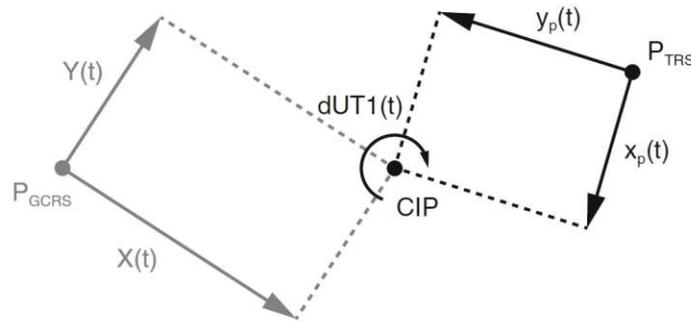


Abbildung 2.1: Gewinnung der Erdorientierungsparameter über Transformation vom himmelfesten (GCRS) ins erdfeste Referenzsystem (TRS) über den CIP,  $dUT1(t)$  beschreibt die Tageslängenschwankung (Schindelegger et al., 2013)

Dieser Vorgang ist durch die International Astronomical Union (IAU) Resolutionen der Jahre 2000 und 2006 festgelegt und dokumentiert (Petit und Luzum, 2010). Die derzeit aktuellen vom International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) regelmäßig überprüften und verbesserten Referenzrahmen sind ICRF3 (International Celestial Reference Frame) und ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame) (Altamimi et al., 2023; Charlot et al., 2020). Die Transformation wird über den Celestial Intermediate Pole (CIP) durchgeführt. Der CIP ist kein physikalisch definierter Pol, wie beispielsweise die Figurenachse einen definiert, sondern per Konvention festgelegt. Messungen geodätischer Weltraumverfahren beziehen sich auf den CIP, durch ihn wird somit die beobachtete Rotationsachse der Erde definiert. Der CIP spaltet als Zwischenpol die Bewegung des TRS-Pols in einen erdfesten und einen himmelfesten Teil auf, also in Präzession und Nutation und Polbewegung (Schindelegger et al., 2013). Abbildung 2.2 veranschaulicht den CIP und die Aufspaltung der Bewegungen der Erdachse.

Die Transformation vom TRS zum GCRS kann folgendermaßen angeschrieben werden (Petit und Luzum, 2010, S.43):

$$[GCRS] = Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \cdot [TRS] \quad (2.1)$$

wobei  $W$ ,  $R$  und  $T$  für zeitabhängige Matrizen stehen und  $W$  die Polbewegung beschreibt,  $R$  in direktem Zusammenhang mit der Rotationsgeschwindigkeit steht und  $Q$  Präzession und Nutation modelliert.

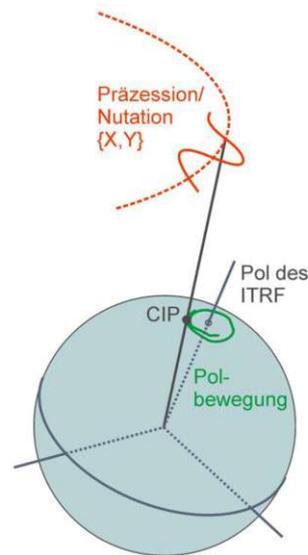


Abbildung 2.2: Bewegungen des CIP aufgespalten in Präzession, Nutation und Polbewegung (S. Böhm, 2010)

### Unterscheidung der Polbewegung von Präzession und Nutation

Früher wurden Präzession/Nutation und Polbewegung nach ihrer Ursache unterschieden, Präzession und Nutation resultieren aus der gravitativen Anziehung von Sonne, Mond und anderen Planeten, während die Polbewegung durch erdinterne geophysikalische Prozesse, wie die Bewegung von geophysikalischen Fluiden und damit einhergehenden Massenverlagerungen, verursacht wird. Die aktuelle Unterscheidung der Bewegungen der Erdachse erfolgt über Frequenzen bzw. die Periodendauer der Bewegungen. Ein positives Vorzeichen der Frequenz beschreibt eine prograde Bewegung, also eine Bewegung in dieselbe Richtung wie die Erde selbst rotiert, ein negatives Vorzeichen steht für eine retrograde Bewegungsrichtung, also entgegen der Erdrotation gerichtet. Präzession und Nutation beschreiben also Bewegungen der Erdachse im Raum mit einer Periodenlänge von zwei Tagen oder länger bezogen auf das himmelfeste Referenzsystem, wie auch im oberen Teil der Abbildung 2.3 zu sehen ist. Die Polbewegung beschreibt die Bewegungen der Erdachse im erdfesten Koordinatenrahmen. Wie in Abbildung 2.3 im unteren Bereich abgelesen werden kann, sind das die beiden Frequenzbänder  $f < -1,5$  und  $f > 0,5$ . Nutation und Polbewegung werden, wie in Abbildung 2.3 gezeigt, im himmelfesten Referenzrahmen bei einer Periode von  $\pm 0,5$  cpsd (cycles per sidereal day, Zyklen pro Sterntag, die Länge eines Sterntags sind 23 h 56 min 4 s) getrennt, im erdfesten Referenzsystem erfolgt die Trennung bei  $-1,5$  bzw.  $-0,5$  cpsd, weil beim Übergang vom GCRS zum TRS die tägliche Rotation des TRS be-

zogen auf das GCRS berücksichtigt werden muss (Schuh und S. Böhm, 2020). Mit der frequenzbasierten Unterscheidung von Präzession, Nutation und Polbewegung zählen auch durch erdinterne Prozesse, beispielsweise durch Gezeiten, angeregte Bewegungen zur Nutation, und externe Anregungsmechanismen, beispielsweise durch Anziehung von Mond und Sonne, beeinflussen auch Veränderungen der Erdachse, die zur Polbewegung gezählt werden (Schindelegger et al., 2013). Die in der vorliegenden Arbeit behandelte atmosphärische Anregung verursacht vor allem Polbewegungen mit Perioden von einem Jahr, schwächer ausgeprägt auch halb-, drittel- und vierteljährlich, diese wären also auf der Skala bezogen auf das terrestrische Referenzsystem im Frequenzbereich  $\pm \frac{1}{365}$  zu finden.

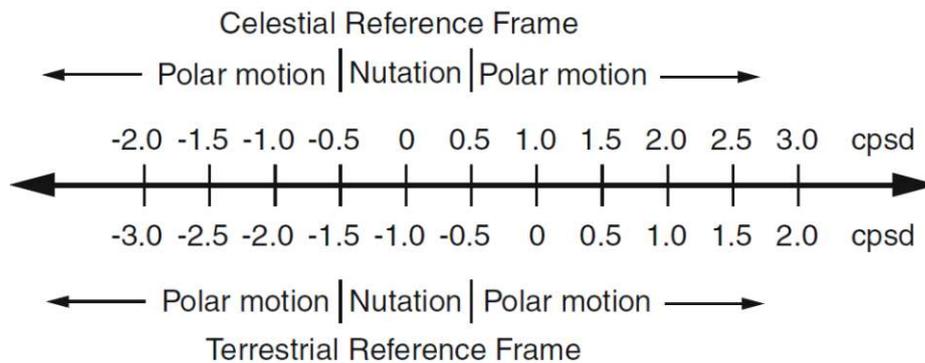


Abbildung 2.3: Unterscheidung von Polbewegung und Nutation nach Frequenz in Zyklen pro Sterntag, cycles per sidereal day (cpsd); Aufgrund der Rotation der Erde und des TRS sind die Frequenzen in den beiden Referenzsystemen um ein cpsd verschoben (Gross, 2007).

## 2.2. Polbewegung

Wie oben erwähnt wird unter Polbewegung also die Abweichung der Erdrotationsachse von der durch Weltraumverfahren beobachteten mittleren Rotationsachse bezogen auf ein erdfestes Referenzsystem verstanden. Die Polbewegung kann mit den geodätischen Weltraumverfahren Global Navigation Satellite System (GNSS), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Lunar Laser Ranging (LLR) und Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) gemessen werden und wird regelmäßig vom IERS veröffentlicht. Das Koordinatensystem, in dem die Polbewegung bzw. die Polkoordinaten angegeben werden, hat seinen Ursprung im Pol des ITRF, die x-Achse zeigt in Richtung des Meridians von Greenwich, die y-Achse weist 90° Richtung Westen. Die Größenordnung der Polbewegung bewegt sich im Bereich von bis zu mehreren Metern an

der Erdoberfläche, wie in Abbildung 2.4 anhand von IERS Daten dargestellt ist und kann heute bis zu einer Genauigkeit von 0,5 cm mit GNSS bestimmt werden (Brzeziński et al., 2002).

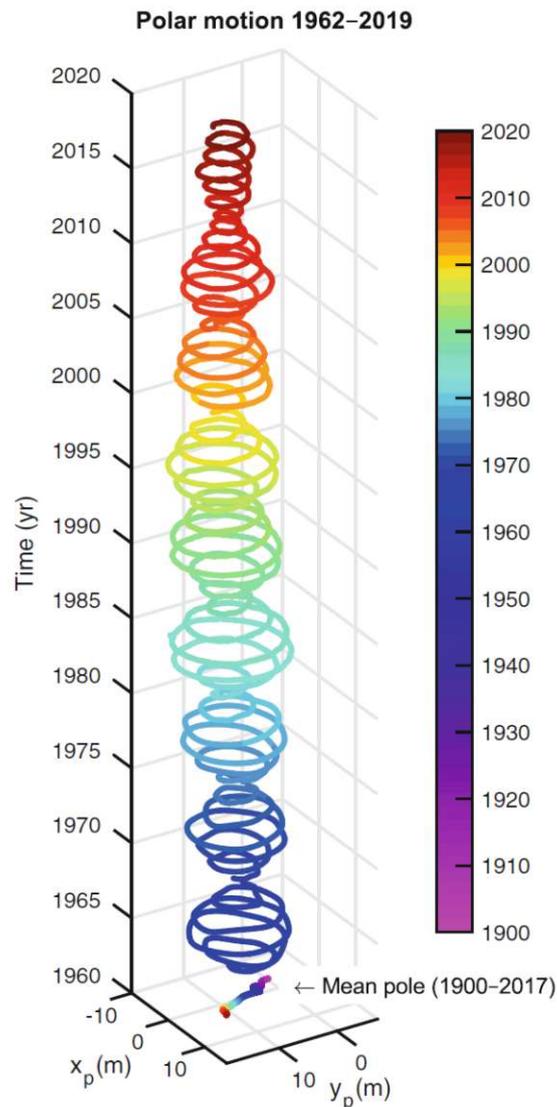


Abbildung 2.4: Polbewegung basierend auf IERS Daten und mittlere Position des Pols von 1962 bis 2019 (Schuh und S. Böhm, 2020)

Die in Abbildung 2.4 gezeigte beobachtete Polbewegung ist eine Interferenz aus folgenden Hauptschwingungen und kleineren Bewegungen:

- Chandler Wobble mit einer Periode von ca. 14 Monaten bzw. 433 Tagen und einer Amplitude von etwa 160 Millibogensekunden (mas), was in etwa 4,8 m projiziert auf die Erdoberfläche entspricht,

- jährlicher Wobble mit einer Amplitude von ungefähr 90 Millibogensekunden bzw. 2,7 m an der Erdoberfläche,
- dekadische Variationen, auch Markowitz Wobble genannt, in einer Größenordnung von 30 mas oder 0,9 m an der Erdoberfläche,
- säkularer Trend von im Mittel 3,5 mas pro Jahr in Richtung 79° West,
- kleine kurzperiodische Variationen im zeitlichen Bereich von mehreren Tagen, Wochen oder Monaten.

Die resultierende kreisförmige Schwingung weist alle 6,3 Jahre ein Maximum in der Bewegung von 9 m auf. Die Polbewegung entspricht also einer durch die Reibung im Erdinneren gedämpften Welle, die immer wieder angeregt wird. Die genauen Anregungsmechanismen sind noch nicht restlos geklärt, der aktuelle wissenschaftliche Konsens geht unter anderem von atmosphärisch-ozeanischen Wechselwirkungen aus (Schuh und S. Böhm, 2020).

In welche unterschiedlichen Frequenzen die beobachtete Polbewegung aufgeschlüsselt werden kann und was die erforschten und vermuteten Anregungsmechanismen der einzelnen Bewegungskomponenten sind, soll im Folgenden überblicksmäßig dargestellt werden. Da sich die vorliegende Arbeit auf die Anregung der Polbewegung bezieht, werden nur die äquatorialen Bewegungen der Rotationsachse angegeben, die axiale Komponente der Erdrotation wird hier nicht weiter behandelt.

Die erste Unterteilung der Polbewegungen ist die in freie und erzwungene Schwingung. Ein asymmetrischer Körper, der um eine Achse rotiert, die nicht mit seiner Figurenachse übereinstimmt, taumelt während seiner Rotation (Euler, 1765). Die taumelnde Bewegung manifestiert sich in einer periodischen Bewegung der Achse mit Eigenfrequenz des Körpers. Die Eigenfrequenzen hängen vom physikalischen Aufbau des rotierenden Körpers ab. Da die Erde aus verschiedenen festen und flüssigen Schichten besteht, hat sie mehrere Eigenfrequenzen. Die für die Polbewegung bedeutendsten Schwingungen mit Eigenfrequenz sind die Chandler-schwingung und die Free Core Nutation. Neben den freien Schwingungen wird die Polbewegung auch durch externe und interne Kräfte angeregt, was zu erzwungenen Bewegungen der Erdachse führt. Hier wird wiederum unterschieden, ob die Anregung durch andere Himmelskörper passiert, oder ob die Bewegung von geophysikalischen Fluiden, wie Atmosphäre, Ozeane oder dem flüssigen Kern, hervorgerufen wird (Schindelegger, 2014).

Die wichtigsten und ausschlaggebendsten Anregungskomponenten der Polbewegung sollen im Folgenden noch einmal genauer betrachtet und auch nach ihren Anregungsmechanismen untersucht werden. Die Arbeit von Gross (2007) gibt für unterschiedliche Perioden die Anregungsmechanismen der Polbewegung an, was im folgenden Abschnitt zusammengefasst dargestellt ist. Die Reihenfolge der Aufstellung ist nach absteigender Periodendauer geordnet, nicht nach Amplitudengröße.

### **Dekadische Variationen**

Die bekannteste der dekadischen Polbewegungen ist der Markowitz Wobble mit einer Periode von etwa 30 Jahren und einer Amplitude von 30 mas. Als Hauptanregungsmechanismen für die dekadischen Variationen gelten nach aktuellem Forschungsstand elektromagnetische Kräfte, die durch Interaktion zwischen festem inneren und flüssigem äußeren Erdkern hervorgerufen werden, sowie das Abschmelzen der Polkappen und der damit einhergehende Anstieg des Meeresspiegels. Die Modelle der Anregungsmechanismen der dekadischen Perioden der Polbewegung erklären aber nach wie vor nur einen Teil der gemessenen Variationen und sind weiterhin aktueller Forschungsgegenstand.

### **Chandler Wobble**

Wie bereits erwähnt wird ein asymmetrischer Körper, der um eine Achse rotiert, die nicht mit seiner Figurenachse übereinstimmt, bei seiner Rotation taumeln. Die Frequenz des Taumelns hängt vom inneren Aufbau und den Eigenschaften des Körpers, also der Erde, ab und wird Eigenfrequenz genannt. Der Chandler Wobble ist eine prograde Schwingung mit einer Periode von 433 Tagen und einer Amplitude von 160 mas. Die Bewegung ist neben der jährlichen Schwingung einer der Hauptanteile der gesamten Polbewegung. Er ist eine gedämpfte Schwingung, die wegen der Anelastizität des Erdmantels nach einigen Jahrzehnten zum Erliegen kommen würde, würde sie nicht immer wieder angeregt werden. Was genau die Anregungsmechanismen des Chandler Wobble sind, ist nicht restlos geklärt, der aktuelle wissenschaftliche Konsens geht davon aus, dass Irregularitäten im Wechselwirkungssystem Atmosphäre-Ozean die notwendigen Energiequellen für die immer wiederkehrende Anregung des Chandler Wobble sind (Schuh und S. Böhm, 2020). Variationen im Ozeanbodendruck und in Meeresströmungen, sowie atmosphärische Druck- und Windvariationen sind die größten Einzeleffekte, die einen Teil der gemessenen Polbewegungen des Chandler Wobble erklären.

### **Jährlicher Wobble und saisonale Schwankungen**

Die einjährig periodische Polbewegung macht zusammen mit dem Chandler Wobble den Hauptteil der Polbewegung aus und wird durch atmosphärische Druckvariationen und Winde angeregt, vor allem durch ein Hochdruckgebiet über Sibirien jedes Jahr im Winter. Neben den atmosphärischen Druckschwankungen als Hauptkomponente der Anregung sind auch Druckvariationen am Ozeangrund Ursachen für jährliche und halbjährliche Perioden der Polbewegung. Andere Mechanismen, die berücksichtigt werden sollten, um die gemessene Polbewegung vollständig zu modellieren, sind Variationen in der Bodenfeuchte und Schneelast. Weitere Polbewegungen mit Frequenzen von einem halben Jahr bis zu mehreren Wochen werden ebenfalls zu einem großen Teil auf atmosphärische Anregungen durch Druck- und Windvariationen und ozeanische Anregung durch Strömungen und Ozeanboden-druckvariationen zurückgeführt.

### **Free Core Nutation**

Die zweite, die Orientierung der Erdachse betreffende, Eigenfrequenz der Erde kommt dadurch zustande, dass der ellipsoidische äußere flüssige Kern nicht im Gleichklang mit dem ihn umgebenden Mantel rotiert. Somit entsteht ein Drehmoment an der Kern-Mantel Grenze. Die Free Core Nutation ist ebenfalls eine gedämpfte Schwingung, die immer wieder angeregt wird und deshalb nicht zum Erliegen kommt. Als Anregungsmechanismen werden Auflasteffekte und damit einhergehende Massenverlagerungen vermutet, aber auch atmosphärische Anregung vor allem durch Druckvariationen. Die Free Core Nutation schwingt mit retrograder täglicher Periode und einer Amplitude von etwa 0,15 mas und fällt damit eigentlich in den Bereich des terrestrischen Nutationsbandes, soll aber der Vollständigkeit halber hier erwähnt sein (Brzeziński et al., 2002; Schindelegger, 2014).

### **Tägliche und halbtägliche Bewegungen**

Die täglichen und halbtäglichen Polbewegungen sind zu etwa 60 % von den Gezeiten der Ozeane beeinflusst, in geringerem Ausmaß auch von atmosphärischen Gezeiten. Durch die gezeitenbedingte Verschiebung von Wassermassen wird ein Drehimpuls auf die feste Erde übertragen, der zu Polbewegungen führt. Die Ozeane reagieren auch auf Variationen des atmosphärischen Drucks und auf Winde, was ebenfalls zu Polbewegungen im täglichen und subtäglichen Bereich führt.

### Säkularer Trend der Polbewegung

Wie auch in Abbildung 2.4 zu sehen ist, weist die Polbewegung neben den periodischen Bewegungen auch eine lineare Drift von im Mittel 3,5 mas pro Jahr in Richtung 79° West auf. Der größte Faktor für die säkulare Poldrift ist die postglaziale Landhebung. Mit wegfallender Eislast nach dem Ende der letzten Eiszeit hebt sich der Erdmantel langsam, was zu einer Figurveränderung der Erde und damit zur Poldrift führt. Des Weiteren hat das durch den Klimawandel bedingte Abschmelzen der arktischen und antarktischen Eiskappen einen Effekt auf die Poldrift. Weitere kleinere Beiträge zum säkularen Trend liefern tektonische Prozesse und Erdbeben. Als anthropogener Beitrag zur Poldrift wurde auch jüngst die globale Entnahme von Grundwasser diskutiert (Seo et al., 2023).

Einen Überblick über die kurzperiodischen Frequenzen der Polbewegung bis zu etwa einem Jahr Periodenlänge und die zugehörigen Größenordnungen der Amplituden gibt Abbildung 2.5. Die Anregungsmechanismen der unterschiedlichen Frequenzen und die Eigenschwingungen der Erde sind farblich dargestellt. Gut sichtbar ist, dass Atmosphäre und Ozeane einen großen Beitrag zur Anregung der Polbewegung leisten, vor allem in den Perioden von einem Jahr, etwas schwächer auch mit halb-, drittel- und vierteljährlichen Perioden sowohl im prograden als auch im retrograden Bereich. In Gelb sind die beiden Eigenschwingungen der Erde gekennzeichnet, im retrograden Spektrum die Free Core Nutation, im prograden Bereich die Chandlerschwingung. Durch Überlagerung der Eigenschwingungen mit atmosphärisch oder ozeanisch angeregten Schwingungen bilden sich, wie in der Abbildung gut sichtbar ist, Resonanzen der Polbewegungsanregung.

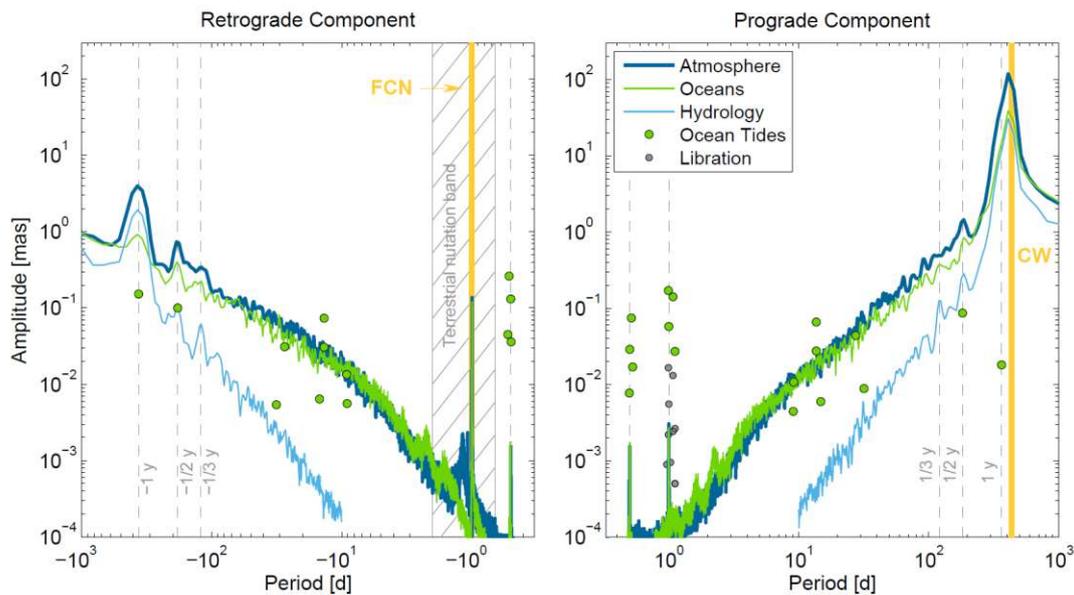


Abbildung 2.5: Perioden und Amplituden der Polbewegung und ihre Hauptanregungsmechanismen;

Atmosphäre, Ozeane und Hydrologie liefern ein kontinuierliches Spektrum an Frequenzen, die die Polbewegung anregen. Ozeantiden und die sogenannte Libration, die von den Gezeitenkräften abhängig sind, haben strenge Perioden und sind deshalb in der Abbildung als Punkte dargestellt.

In Gelb sind außerdem die Eigenfrequenzen des Erdkörpers angedeutet, die zu Resonanzen mit der atmosphärischen und ozeanischen Anregung führen (Schindelegger, 2014).

### 2.3. Atmosphärische Anregung der Polbewegung

Über viele Frequenzen hinweg finden sich Atmosphäre und Ozeane immer wieder als wichtige Treiber für die Anregung der Polbewegung. Zu welchen Teilen die beobachtete Polbewegung mit Atmosphären- bzw. Atmosphären- und Ozeanmodellen erklärt werden kann, wurde von Gross (2003) für die Jahre 1980–2000 untersucht. Abbildung 2.6 zeigt ein Leistungsspektraldichtediagramm (Power Spectral Density (PSD) Plot) der beobachteten und modellierten Polbewegung. Die Hauptpeaks der beobachteten Funktion der Polbewegung werden durch die rein atmosphärische Anregung gut abgebildet, eine Verbesserung der Korrelation der Kurven ist mit zusätzlichen Ozeanmodellen aber zu erkennen. Die Übereinstimmung zwischen modellierter und beobachteter Funktion ist im Bereich der Hauptmaxima mit jährlicher, halbjährlicher, dritteljährlicher und noch kürzerer Periode besser als bei Periodendauer von länger als einem Jahr.

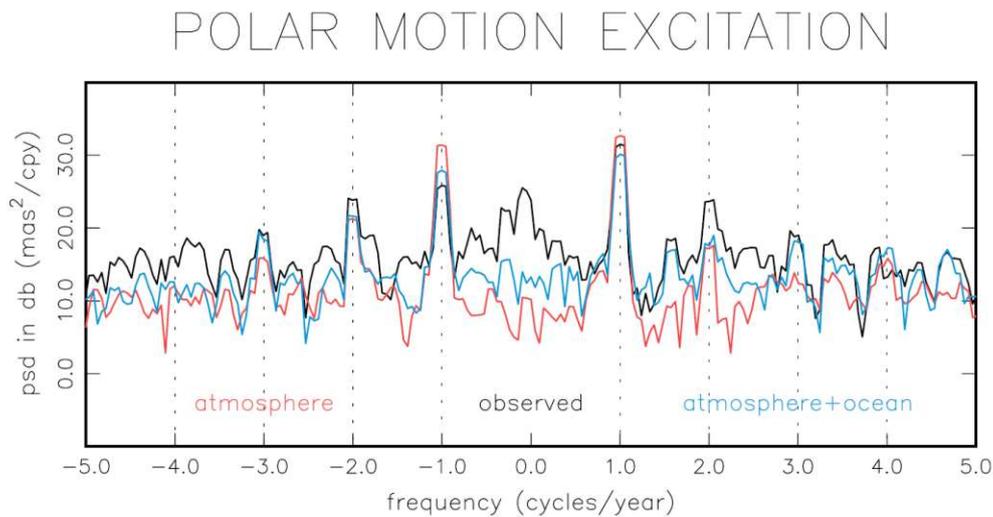


Abbildung 2.6: Beobachtete und modellierte Polbewegung, wobei die Beobachtungen in Schwarz, die rein mit atmosphärischer Anregung modellierte Polbewegung in Rot und die atmosphärisch-ozeanisch modellierte Polbewegung in Blau dargestellt sind (Gross, 2003)

Da sich die folgende Arbeit auf die atmosphärische Anregung der Polbewegung beschränkt, wird im Folgenden nur betrachtet, wie gut die atmosphärische Modellierung alleine die beobachtete Polbewegung erklärt. Die jährliche Polbewegung wird sowohl in prograder als auch in retrograder Richtung von atmosphärischen Druckvariationen als am stärksten ausgeprägter einzelner Mechanismus angeregt. Der Anteil der Druckveränderungen ist für die jährlichen Perioden der Anregung mehr als sechsmal so groß wie der Anteil der Winde. Ein ähnliches Bild ergibt sich für halbjährliche und dritteljährliche Perioden, auch hier machen atmosphärische Druckvariationen den größten Anteil der Anregung aus. Für halbjährliche Perioden ist der Anteil der Winde etwa ein Achtel des Anteils der Druckvariationen, für dritteljährliche Perioden etwa die Hälfte. Die Anregung des Chandler Wobble erklären atmosphärische Wind- und Druckvariationen nur zu etwa einem Viertel. Für mehrjährige und dekadische Zyklen bis hin zum Markowitz Wobble mit einer Periodenlänge von etwa 30 Jahren sind atmosphärische Druck- und Windvariationen nicht stark genug, um diese Schwingungen anzuregen. Anders sieht die Situation bei den kürzeren Perioden von mehreren Tagen bis mehreren Monaten aus. Atmosphärische Druck- und Windvariationen sind hier für mindestens 35 bis 50 % der Anregung verantwortlich und damit der größte einzelne Einflussfaktor.

## 2.4. Mathematische Formulierung der Polbewegung

Für die mathematische Beschreibung werden folgende Schritte benötigt, die in den Unterkapiteln näher erklärt werden: Ausgehend von der allgemeinen Bewegungsgleichung für rotierende Körper folgen Umformungen vom Inertialsystem zum erdfesten Referenzsystem. Dann werden die Gleichungen so erweitert, dass sie nicht nur für starre Körper gelten, sondern für ein elastisches Erdmodell mit zeitlich variablen Veränderungen, man gelangt zu den sogenannten Anregungsfunktionen für die Polbewegung. Der nächste Schritt ist die Berücksichtigung von geophysikalischen Fluiden wie Atmosphäre und Ozean und führt zu den Drehimpulsfunktionen. Weiters werden ein flüssiger Kern und andere Modellerweiterungen zur genaueren Beschreibung des elastischen Verhaltens des Erdmantels hinzugefügt. Schlussendlich werden die Drehimpulsfunktionen so umgeschrieben und diskretisiert, dass als Eingangsparameter Outputdaten aus globalen Zirkulationsmodellen verwendet werden können. Mit diesen Drehimpulsfunktionen kann dann die modellierte Anregung ausgewertet und mit beobachteten Werten der Polbewegung verglichen werden.

### 2.4.1. Herleitung der Liouville Gleichung

Der erste Abschnitt folgt weitgehend der Publikation von Schuh und S. Böhm (2020, S. 2, 3). Grundlage ist die in Formel (2.2) dargestellte dynamische Bewegungsgleichung für rotierende Starrkörper bezogen auf ein Inertialsystem. Diese Gleichung beschreibt auch den Zusammenhang zwischen Drehmoment (torque)  $L$  und Drehimpuls (angular momentum)  $H$ .

$$L = \frac{dH}{dt} \quad (2.2)$$

Da die Polbewegung die Veränderung der Erdachse bezogen auf einen erdfesten Koordinatenrahmen ist, muss Gleichung (2.2) so erweitert werden, dass sich die beschriebene Bewegung auf ein körperfestes mitrotierendes Referenzsystem bezieht. Die Achsen des körperfesten Systems sind sogenannte Tisserand-Achsen. Die Geschwindigkeiten, mit der sich die Stationspositionen ändern, durch die das Referenzsystem realisiert wird, werden durch die Wahl der Tisserand-Achsen im Mittel auf Null gesetzt. Mit Tisserand-Achsen wird also das terrestrische Referenzsystem so gelagert, dass der mittlere Drehimpuls aufgrund der Bewegung von Erdkruste und Erdmantel verschwindet (Gross, 2007).

Gleichung (2.3) ist eine Form der dynamischen Eulerschen Bewegungsgleichung für rotierende starre Körper, wobei  $\omega$  für die Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Objekts und des körperfesten Referenzrahmens steht.

$$\mathbf{L} = \frac{d\mathbf{H}}{dt} + \omega \times \mathbf{H} \quad (2.3)$$

Weiters kann der Drehimpuls  $\mathbf{H}$  als Produkt des Trägheitstensors  $\mathbf{I}$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  angeschrieben werden.  $\mathbf{I}$  ist eine symmetrische Matrix, die in der Hauptdiagonale die Hauptträgheitsmomente und in den nichtdiagonalen Elementen die Deviationsmomente des rotierenden Körpers beinhaltet und somit die Masseverteilung des Körpers beschreibt. Bisher wurde in den Gleichungen von starren Körpern ausgegangen. Da die Erde aber nicht starr, sondern deformierbar ist und sich somit Massenelemente in Bezug auf das körperfeste System bewegen können, ist der Trägheitstensor  $\mathbf{I}$  nicht konstant, sondern zeitlich variabel. Diese Teilchenbewegung relativ zum erdfesten Referenzrahmen wird als relativer Drehimpuls  $\mathbf{h}$  in die Gleichungen eingeführt und der Drehimpuls für deformierbare Körper kann dann folgendermaßen angeschrieben werden:

$$\mathbf{H} = \mathbf{I}\omega + \mathbf{h}. \quad (2.4)$$

Darin wird  $\mathbf{I}\omega$  auch als Rotationsdrehimpuls oder Massenterm bezeichnet,  $\mathbf{h}$  als Relativedrehimpuls oder Bewegungsterm.

Setzt man diese Schreibweise des Drehimpulses in die Eulersche Bewegungsgleichung für rotierende Körper (2.3) ein, ist das Ergebnis die Euler-Liouville Gleichung oder kurz auch nur Liouville Gleichung:

$$\mathbf{L} = \frac{d}{dt}(\mathbf{I}\omega + \mathbf{h}) + \omega \times (\mathbf{I}\omega + \mathbf{h}). \quad (2.5)$$

#### 2.4.2. Linearisierung der Liouville Gleichung

Der nächste Schritt der mathematischen Beschreibung ist nun, die Liouville Gleichung in eine für analytische Berechnungen praktikable Form zu bringen. Vergleicht man die wahre Erdrotation mit einer theoretischen gleichförmigen Rotation, fällt auf, dass die Abweichungen vom idealisierten Anfangszustand, also Tageslängenschwankungen und Polbewegung, klein ausfallen. Die kleinen Abweichungen liefern die Begründung dafür, dass die Liouville Gleichung durch Ableitung linearisiert werden darf. Dazu werden zunächst in Gleichungen (2.6) und (2.7)

die Winkelgeschwindigkeit und der Trägheitstensor im Idealzustand, also  $\omega_0$  und  $I_0$  angegeben (Schindelegger et al., 2013, S. 189).  $\Omega$  beschreibt dabei die konstante mittlere Rotationsgeschwindigkeit der Erde,  $z$  die Figurenachse,  $C$  und  $A'$  bezeichnen das polare bzw. das mittlere äquatoriale Hauptträgheitsmoment der Erde.

$$\omega_0 = \Omega z = \Omega \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$I_0 = \begin{pmatrix} A' & 0 & 0 \\ 0 & A' & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Massenverlagerungen und Relativdrehimpulse von Erdkruste und Mantel führen zu Abweichungen der wahren Erdrotation von einem idealisierten konstanten Anfangszustand von Rotationsgeschwindigkeit und Lage der Körperachsen. Diese Änderungen werden durch kleine Zuschläge zu den Anfangswerten folgendermaßen angesetzt (Schindelegger et al., 2013, S.189 f) :

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t) = \Omega \begin{pmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ 1 + m_3(t) \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$I(t) = I_0 + \Delta I(t) = I_0 + \begin{pmatrix} \Delta I_{11}(t) & \Delta I_{12}(t) & \Delta I_{13}(t) \\ \Delta I_{21}(t) & \Delta I_{22}(t) & \Delta I_{23}(t) \\ \Delta I_{31}(t) & \Delta I_{32}(t) & \Delta I_{33}(t) \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Die  $m_i$  sind kleine dimensionslose Größen, die die Abweichung der momentanen Rotationsachse von idealer gleichförmiger Rotation beschreiben, wobei die ersten beiden Komponenten sich auf die Polbewegung beziehen und  $m_3$  die Schwankungen der Rotationsrate beschreibt. Die  $\Delta I_{ij}$  beschreiben kleine zeitabhängige Änderungen im Trägheitstensor aufgrund von Deformationen des Erdkörpers.

Nun werden die zeitabhängigen Änderungen von Rotationsvektor (2.8) und Trägheitstensor (2.9) in (2.5) eingesetzt. Terme zweiter Ordnung und Produkte und Ableitungen kleiner Größen werden vernachlässigt. Das Resultat ist die linearisierte Liouville Gleichung, die aufgespalten in ihre drei Komponenten in Gleichung (2.10) dargestellt ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Zeitabhängigkeit statt mit  $\frac{dx}{dt}$  mit  $\dot{x}$  angegeben (Moritz und Mueller, 1987, S. 124) .

$$\begin{aligned}
 A\Omega\dot{m}_1 + (C - A')\Omega^2 m_2 + \Omega\Delta\dot{I}_{13} - \Omega^2\Delta I_{23} + \dot{h}_1 - \Omega h_2 &= L_1 \\
 A\Omega\dot{m}_2 - (C - A')\Omega^2 m_1 + \Omega\Delta\dot{I}_{23} - \Omega^2\Delta I_{13} + \dot{h}_2 - \Omega h_1 &= L_2 \\
 C\Omega\dot{m}_3 + \Delta\dot{I}_{33}\Omega + \dot{h}_3 &= L_3
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

### 2.4.3. Anregungsfunktionen und Lösungen der Liouville Gleichung

Wird das Gleichungssystem (2.10) nach  $m_i$  umgeformt, erhält man drei inhomogene lineare Differentialgleichungen erster Ordnung, die sogenannten Anregungsfunktionen  $\psi_i$ , die in Gleichung (2.11) dargestellt sind (Barnes et al., 1983, S. 37).

$$\begin{aligned}
 -\frac{\dot{m}_2}{\sigma_E} + m_1 &= \frac{\Omega^2\Delta I_{13} + \Omega\Delta\dot{I}_{23} + \Omega h_1 + \dot{h}_2 - L_2}{\Omega^2(C - A')} = \psi_1 \\
 \frac{\dot{m}_1}{\sigma_E} + m_2 &= \frac{\Omega^2\Delta I_{23} - \Omega\Delta\dot{I}_{13} + \Omega h_2 - \dot{h}_1 - L_1}{\Omega^2(C - A')} = \psi_2 \\
 \dot{m}_3 &= \frac{-\Omega\Delta I_{33} - h_3 - L_3}{\Omega C} = \psi_3
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

$\psi_1$  und  $\psi_2$  charakterisieren die äquatorialen Komponenten der Abweichung der Rotationsachse vom idealisierten Zustand, also die Polbewegung,  $\psi_3$  die Tageslängenschwankung bzw. die axiale Komponente, die hier nicht weiter behandelt werden soll. Die rechte Seite von Gleichung (2.11), die  $\psi_i$ , werden als geophysikalische Anregungsfunktionen bezeichnet. Sie beschreiben also die Mechanismen, die für die Anregung der Polbewegung verantwortlich sind. Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Polbewegung der Rotationsachse, die sogenannte geodätische Anregung.  $\sigma_E = \frac{C-A'}{A'}\Omega$  bezeichnet die Eulerfrequenz. Diese ist die bereits erwähnte natürliche Frequenz, mit der die Achse eines festen rotierenden achsensymmetrischen Körpers sich ohne äußere Anregung kreisförmig bewegt, also einen sogenannten Wobble ausführt. Für die starre Erde wäre das eine Frequenz von etwa 304 Tagen in prograde Richtung.

Auf die Eulerfrequenz als Lösung der Gleichung führt das Umformen auf  $m_i$ , wenn der Relativdrehimpuls  $\mathbf{h}$  und dessen Ableitungen Null gesetzt werden und  $\Delta\mathbf{I}$  und  $\Delta\dot{\mathbf{I}}$  auf die Verformung der festen Erde mit elastischen Eigenschaften beschränkt werden. Die elastischen Eigenschaften der Erde sind wie erwähnt in den Deviationsmomenten des Trägheitstensors abgebildet und beinhalten sowohl Gezeitendeformation durch Sonne und Mond als auch Rotationsdeformation durch die Polbewegung. Später werden die geophysikalischen Fluide dann in Form von Relativdrehimpuls und Änderungen des Trägheitstensors berücksichtigt (Barnes et al., 1983).

Löst man die Liouville Gleichung für die elastische Erde, kommt man also zu folgenden beiden Fällen (Moritz und Mueller, 1987):

- Die homogene Lösung (ohne lunisolare äußere Kräfte,  $L$  wird also Null gesetzt) ergibt die freie Polbewegung der elastischen Erde, die eine kreisförmige Bewegung der Rotationsachse mit Eulerfrequenz in prograde Richtung ist.
- Die Partikulärlösung (mit externem Drehmoment) führt zur erzwungenen Polbewegung mit täglicher Periode in retrograde Richtung, ebenfalls eine kreisförmige Bewegung der Rotationsachse.

### 2.4.4. Drehimpulsfunktionen

Wie in Kapitel 2.3 erwähnt, sind die geophysikalischen Fluide, allen voran Atmosphäre und Ozeane, maßgeblich für die Anregung der Polbewegung und müssen deshalb auch in der mathematischen Formulierung berücksichtigt werden. Dazu gibt es im Allgemeinen zwei Ansätze, den Drehimpulsansatz (Angular Momentum Approach) und den Drehmomentansatz (Torque Approach). Ersterer basiert auf dem Prinzip der Drehimpulserhaltung in einem geschlossenen System, der zweite auf der direkten Berechnung von Drehmomenten, die auf einen Körper wirken (De Viron und Dehant, 1999). Die atmosphärischen Drehimpulsfunktionen werden im Englischen als Atmospheric Angular Momentum bezeichnet und deshalb oft mit AAM abgekürzt.

Für die vorliegende Arbeit wird der Ansatz über Drehimpulsfunktionen ausgewählt, der auf dem Prinzip der Drehimpulserhaltung im gesamten System bestehend aus Erde und geophysikalischen Fluiden basiert, solange keine externen Kräfte beispielsweise von Sonne und Mond auf das System wirken. Das bedeutet also, dass eine zeitliche Änderung des Drehimpulses in einem oder mehreren der geophysikalischen Fluide eine zeitliche Änderung des Drehimpulsvektors des Erdkörpers gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung zur Folge hat. Für die Atmosphäre sind die Auslöser der Drehimpulsänderungen Massenverlagerungen, beispielsweise Druckvariationen, oder Relativbewegungen von Massenelementen wie Windvariationen (Barnes et al., 1983). Die durch die Drehimpulsfunktionen dargestellte atmosphärische Anregung wird in einem anderen Koordinatensystem als die gemessene Polbewegung angegeben, die  $\chi_1$ -Achse verläuft durch den Meridian von Greenwich, wie auch die  $x_p$ -Achse des Polbewegungssystems, die  $\chi_2$ -Achse

zeigt im Gegensatz zur  $y_p$ -Achse aber  $90^\circ$  nach Osten, wie auch durch Abbildung 2.7 veranschaulicht wird.

Koordinatensystem der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen

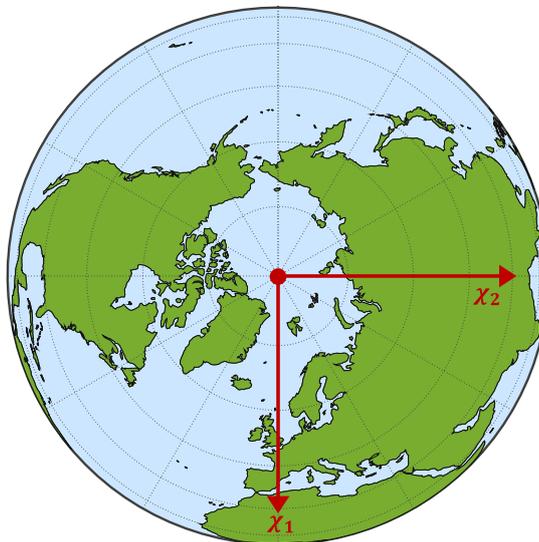


Abbildung 2.7: Koordinatensystem der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen

In den in Gleichung (2.11) angegebenen Anregungsfunktionen hat nur die dritte Komponente Drehimpulscharakter,  $\psi_1$  und  $\psi_2$  besitzen Drehmomentcharakter. Das Problem des Drehmomentcharakters ist, dass Relativdrehimpuls und Zuschläge zum Trägheitstensor in den Gleichungen für  $\psi_1$  und  $\psi_2$  auch mit ihren Ableitungen enthalten sind. Da Daten über diese Ableitungswerte weder durch Atmosphären- und Ozeanmodelle noch durch Beobachtungen in ausreichender Qualität bestimmbar sind, können die Anregungsfunktionen nicht direkt ausgewertet werden. Der nächste Schritt ist also der Übergang auf Drehimpulsfunktionen, die mit Beobachtungen oder Daten aus Fluidmodellen gelöst werden können (Schindelegger et al., 2013).

Die beiden äquatorialen Komponenten der Anregungsfunktionen werden weiters in komplexer Schreibweise zusammengefasst (Schindelegger et al., 2013, S. 191 f):

$$\hat{\psi} = \psi_1 + i\psi_2 = m + \frac{i}{\sigma_E} \dot{m} = \frac{\Omega^2 \Delta \hat{I} - i\Omega \Delta \dot{\hat{I}} + \Omega \hat{h} - i\dot{\hat{h}}}{\Omega^2(C - A')} = \chi - \frac{i}{\Omega} \dot{\chi} \quad (2.12)$$

$$\text{mit } \hat{m} = m_1 + im_2, \quad \hat{h} = h_1 + ih_2, \quad \Delta \hat{I} = \Delta I_{13} + i\Delta I_{23}.$$

Aus Gleichung (2.12) kann dann die Drehimpulsfunktion der äquatorialen Komponenten  $\hat{\chi}$  extrahiert und in einen Massenterm und einen Bewegungsterm aufgespalten werden, wie in Gleichung (2.13) gezeigt wird. Weil im Folgenden mit atmosphärischen Daten zur Auswertung der Drehimpulsfunktionen gearbeitet wird, wird der Massenterm auch als Druckterm (Pressure term), der Bewegungsterm auch als Windterm (Wind term) bezeichnet, wie in der Notation ersichtlich gemacht ist (Schindelegger, 2014, S. 19). Abbildung 2.8 veranschaulicht die Unterscheidung zwischen Druck- und Windterm.

$$\hat{\chi} = \chi_1 + i\chi_2 = \frac{\Omega\Delta\hat{I} + \hat{h}}{\Omega(C - A')} = \frac{1}{\Omega(C - A')}\Omega\Delta\hat{I} + \frac{1}{\Omega(C - A')}\hat{h} = \hat{\chi}_P + \hat{\chi}_W \quad (2.13)$$

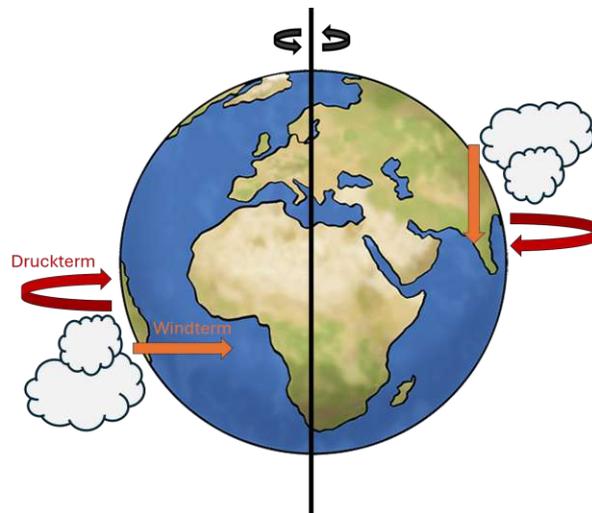


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung von Wind- und Druckterm bzw. Bewegungs- und Massenterm (Wind-, Matterterm); Der Windterm wird von atmosphärischen Luftbewegungen verursacht, der Druckterm von Variationen des Oberflächendrucks (basierend auf De Viron und Dehant (1999) und Staak (2022)).

#### 2.4.5. Effektive Drehimpulsfunktionen

Die bisher entwickelten Drehimpulsfunktionen gelten wie oben erwähnt für ein gleichförmig rotierendes, festes, abgeplattetes, achsensymmetrisches Erdmodell, das auf kleine Anregungen von geophysikalischen Fluiden reagiert. Für ein realistischeres Modell der Polbewegung, das den tatsächlich beobachteten Gegebenheiten besser entspricht, werden folgende Modellerweiterungen angebracht (Schindelegger et al., 2013):

- Rotationsdeformation der festen Erde: Love-Zahlen zur Beschreibung der Elastizität der Erde werden eingeführt
- Gleichgewichtstide der Ozeane: Ausgleichsbewegung der Ozeane als Antwort auf Massenverlagerungen (Dahlen, 1976)
- Relativedrehimpuls des Kerns: dem Modell wird ein flüssiger Erdkern hinzugefügt
- Auflastdeformation des Mantels aufgrund von Massenverlagerungen
- Anelastizität des Mantels: Reaktionszeit des Erdmantels auf Deformationen.

Das Hinzufügen eines flüssigen Kerns erweitert die Anregung der Polbewegung um eine zweite Eigenfrequenz, die sogenannte Free Core Nutation, die in Kapitel 2.2 bereits näher erläutert wurde. Die Modellerweiterungen für Auflastdeformation und Anelastizität des Mantels verändern auch die bisher für ein starres Erdmodell angenommene Eulerfrequenz  $\sigma_E$ , die damit zur komplexen Chandlerfrequenz  $\sigma_{CW}$  wird, wie Gleichung (2.14) zeigt (Brzeziński et al., 2002, S. 64). Damit wird die Eigenfrequenz des festen rotierenden Erdmodells durch die Eigenfrequenz eines Erdmodells mit verzögert-elastischem Verhalten abgelöst, was zu einer gedämpften Schwingung mit Dämpfungsfaktor  $Q_C = 179$  führt. Der theoretische Wert der Periode des Chandler Wobble von 425 Tagen liegt nahe an der tatsächlich aus weltraumgeodätischen Beobachtungen ermittelten Periode  $T_{CW}$  von 433 Tagen (Schindelegger, 2014, S. 21).

$$\sigma_{CW} = \frac{2\pi}{T_C} \left( 1 + \frac{i}{2Q_C} \right) \quad (2.14)$$

Die jeweiligen Beiträge der Modellerweiterungen werden als Skalierungsfaktoren an die Drehimpulsfunktionen angebracht, die Größenordnungen sind in Abbildung 2.9 aufgeschlüsselt. Durch diese Modellerweiterungen entstehen schließlich die sogenannten effektiven Drehimpulsfunktionen, wie Gleichung (2.15) zeigt (Schindelegger et al., 2013, S. 197).

$$\hat{\chi} = \frac{1.100 \Delta \hat{I}}{(C - A')} + \frac{1.608 \hat{h}}{\Omega(C - A')} = \hat{\chi}_P + \hat{\chi}_W \quad (2.15)$$

Die vereinfachenden Annahmen, die für die Modellerweiterungen des flüssigen Kerns und der Gleichgewichtstide angenommen wurden, gelten allerdings nur für

Perioden, die länger als ein Tag sind, sonst müssten Resonanzeffekte mitberücksichtigt werden, somit können die gesamten Drehimpulsfunktionen auch nur für solche Frequenzen ausgewertet werden (Schindelegger et al., 2013). Da die atmosphärische Anregung der Polbewegung Perioden von einem Jahr und halb-, drittel- und vierteljährliche periodische Schwankungen hervorruft, und die Berechnung auf monatlichen Daten basiert, sind die Annahmen in diesem Fall nicht einschränkend.

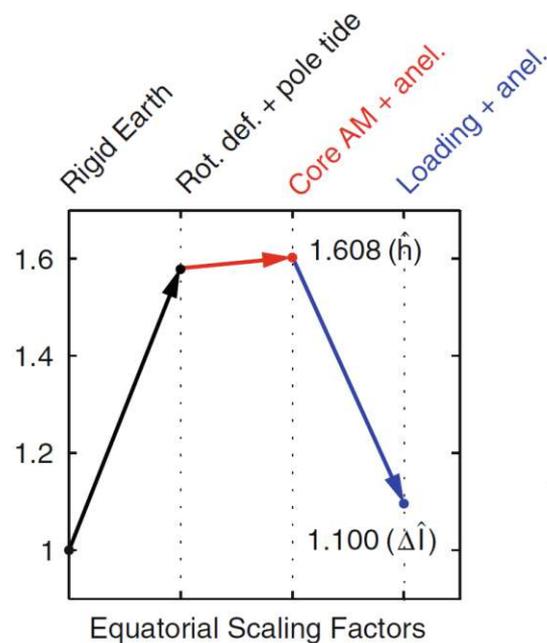


Abbildung 2.9: Beiträge zu den Skalierungsfaktoren der effektiven äquatorialen Drehimpulsfunktionen (Schindelegger et al., 2013)

#### 2.4.6. Evaluierung der effektiven atmosphärischen Drehimpulsfunktionen

Da sich die vorliegende Arbeit nur mit der Auswertung des atmosphärischen Beitrags zur Polbewegung beschäftigt, werden im Folgenden auch nur die atmosphärischen Drehimpulsfunktionen weiterentwickelt und für die tatsächliche Auswertung vorbereitet. Die Drehimpulsfunktionen sollen also so umgeschrieben werden, dass sie von Output-Parametern aus globalen Zirkulationsmodellen abhängen und direkt mit meteorologischen Daten ausgewertet werden können.

Wie bereits erwähnt, werden Terme des Trägheitstensorinkrements  $\Delta \mathbf{I}$  auch als Massen- oder Druckterme bezeichnet, Terme, die den Relatvdrehimpuls  $\mathbf{h}$  enthalten als Bewegungs- oder Windterme. Der Druckterm wird also zunächst zum

Volumenintegral über die atmosphärische Dichteverteilung  $\hat{H}_p$  umgeschrieben, der Windterm wird zum Volumenintegral  $\hat{H}_W$  über die globalen Windfelder. In einem zweiten Schritt erfolgt der Übergang von den bisherigen kartesischen Koordinaten zu sphärischen Koordinaten mit Längen  $\lambda$  und Co-Breiten  $\theta$ . Aufgrund ihrer geringen Ausdehnung im Vergleich zur gesamten Erde wird die Atmosphäre in der sogenannten Thin Layer Approximation als Kugelschale mit Radius  $a$  mit konstanter Dicke und gleichbleibender Gravitationsbeschleunigung  $g$  modelliert (Schindelegger et al., 2013). Windterm und Druckterm werden für die analytische Auswertung zu Summen umgeschrieben, die diskrete Form der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen wird dann folgendermaßen angeschrieben (Schindelegger, 2014, S. 128):

$$\hat{H}_p \approx -\frac{a^4}{g} \sum_{\lambda} \sum_{\theta} p_s(\theta, \lambda) (\cos \lambda + i \sin \lambda) \cos \theta \sin^2 \theta d\theta d\lambda \quad (2.16)$$

$$\hat{H}_W \approx -\frac{a^3}{g} \sum_{\lambda} \sum_{\theta} \sum_{k=1}^{n_p} \frac{p_{k+1} - p_k}{2} (\cos \lambda + i \sin \lambda) \quad (2.17)$$

$$[(u_k(\theta, \lambda) + u_{k+1}(\theta, \lambda)) \cos \theta + i(v_k(\theta, \lambda) + v_{k+1}(\theta, \lambda))] \sin^2 \theta d\theta d\lambda$$

In Formeln (2.16) und (2.17) stehen  $u(\theta, \lambda)$  und  $v(\theta, \lambda)$  für die östlich bzw. nördlich gerichteten Windgeschwindigkeiten,  $p_s$  für den Oberflächendruck bzw.  $p_k$  für den Druck in der jeweiligen Atmosphärenschicht, deren Gesamtanzahl durch  $n_p$  angegeben ist. Die vertikale Summation über die Säule der Druckschichten erfolgt von der obersten ( $k = 1$ ) zur untersten Schicht, danach wird über die gesamte Erdoberfläche aufsummiert (Schindelegger, 2014).

Die errechneten Werte der geophysikalischen Anregung der Polbewegung können dann den beobachteten Werten der Polbewegung gegenübergestellt werden, um zu ermitteln, wie gut die Modelle die tatsächlichen Gegebenheiten erklären und welche Diskrepanzen bleiben. Die Unterschiede können von Annahmen und Vereinfachungen in den Modellen herrühren oder von zusätzlichen nicht modellierten Anregungsmechanismen.

### 2.4.7. Invertierte Barometer Hypothese als Korrektur für den atmosphärischen Druckterm

Da die Ozeane im Gegensatz zu den Landmassen auf Luftdruckveränderungen in Form von Heben oder Senken der Wasseroberfläche bei fallendem bzw. steigendem Luftdruck reagieren, wird diese Reaktion auch in der Auswertung der Anregung der Polbewegung als Korrektur mit der sogenannten Invertierten Barometer Hypothese berücksichtigt (J. Böhm et al., 2013). Veränderungen der Höhe des Wasserspiegels in den Ozeanen  $\eta$ , verursacht durch atmosphärische Druckveränderungen, können laut Gleichung (2.18) beschrieben werden. Die Invertierte Barometer Hypothese gilt aufgrund der Trägheit der Wassermassen nur für Zeiträume, die länger als fünf Tage sind und nur für große Wassertiefen (Wunsch und Stammer, 1997, S. 80).

$$\eta(t) = -\frac{dp_A(t)}{\rho_0 g} \quad (2.18)$$

Dabei ist  $dp_A$  die atmosphärische Druckänderung, angegeben in Millibar (mbar),  $g$  bezeichnet die Gravitationsbeschleunigung in  $m/s^2$  und  $\rho_0$  die Dichte des Wassers in  $g/cm^3$ . Werden diese Einheiten bei der Berechnung gewählt, entspricht eine atmosphärische Druckveränderung von 1 mbar ziemlich genau einer Veränderung von 1 cm der Höhe des Wasserspiegels.

Da über den Ozeanen also die Luftdruckschwankungen in Form von Änderungen der Höhe des Wasserspiegels kompensiert werden, wird über alle Zellen, die sich über den Ozeanen befinden, ein Mittelwert berechnet. Dieser Mittelwert wird dann allen Zellen, die sich über den Weltmeeren befinden, zugeschrieben und jede Ozeanzelle geht mit demselben Oberflächendruckwert in die Berechnung des Druckterms ein (Schindelegger et al., 2013, S. 202), dabei steht  $O$  für die Gesamtfläche der Ozeane.

$$\bar{p}_O = \frac{1}{O} \iint p_O dO \quad (2.19)$$

Wie stark die IB-Korrektur den Druckterm verändert, zeigt Abbildung 2.10. Die in den Fenstern a und b gezeigten Druckterme sind für  $\chi_1$  und  $\chi_2$  in etwa gleich groß und hätten umgerechnet von Radiant (rad) in Millibogensekunden (mas) etwa eine Amplitude von 60 bis 80 mas. Nach der IB-Korrektur unterscheiden sich die Amplituden in  $\chi_1$ - und  $\chi_2$ -Richtung stärker voneinander, in  $\chi_1$ -Richtung ergibt sich eine Amplitude von etwa 15 bis 20 mas, in Richtung  $\chi_2$  von etwa 40 mas.

Durch die Anbringung der IB-Korrektur wird also die  $\chi_1$ -Komponente der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen stärker verkleinert als die  $\chi_2$ -Komponente. Das

liegt daran, dass die  $\chi_2$ -Achse des Koordinatensystems, in dem die atmosphärische Anregung angegeben wird, einen Bereich der Erdoberfläche abdeckt, der von wesentlich mehr Landmassen bedeckt ist als der Bereich, den die  $\chi_1$ -Achse abdeckt. Die Ozeanflächen im Bereich der  $\chi_1$ -Achse sind somit viel größer als die im Bereich der  $\chi_2$ -Achse und der ausgleichende Effekt der Ozeane auf den Oberflächendruck fällt deutlich stärker ins Gewicht (Nastula und Salstein, 1999).

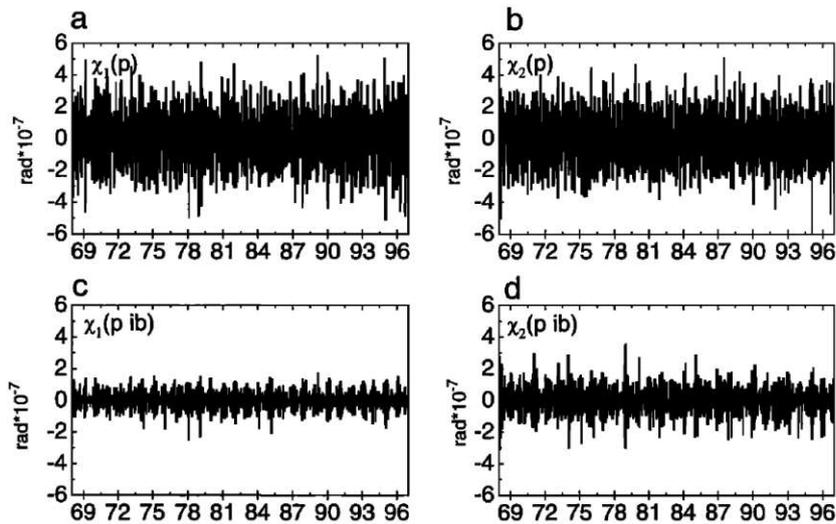


Abbildung 2.10: Druckterm der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen ohne (a,b) und mit (c,d) IB-Korrektur;

Die Zeitreihen basieren auf meteorologischen Daten des National Center for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) für die Jahre 1969-1996 (Nastula und Salstein, 1999).

#### 2.4.8. Alternative Berechnung über Drehmomentfunktionen

Ein physikalisch und analytisch gleichwertiger Ansatz zu den Drehimpulsfunktionen, die auf Drehimpulserhaltung im System Erde und geophysikalische Fluide basieren, ist eine Modellierung über Drehmomente. Atmosphäre und Ozeane wirken bei dieser Berechnung als externe Drehmomente auf den Erdkörper und verändern dessen Drehimpuls. Die drei Hauptkräfte dafür sind Reibung durch Wind an der Erdoberfläche, Druckunterschiede, die aufgrund der Topographie entstehen und gravitative Anziehung von Massen (De Viron und Dehant, 1999). Diese sind in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt.

Die oben beschriebenen Drehimpulsfunktionen sind Mittelungsfunktionen, in denen sich also einerseits Fehler in den zugrundeliegenden Daten weniger auswir-

ken, andererseits kann aber nur das Vorhandensein von Drehimpulsänderungen detektiert werden, nicht aber wo die Drehimpulsänderung erfolgt. Drehmomentfunktionen sind weniger genau und präzise als Drehimpulsfunktionen, mit ihrer Hilfe können aber Aussagen getätigt werden, wo der Drehimpulsaustausch zwischen Fluiden und Erde stattfindet. Somit sind die hier behandelten Drehimpulsfunktionen nach derzeitigem Forschungsstand besser geeignet, um die atmosphärische Anregung der Polbewegung zu untersuchen, Drehmomentfunktionen können aber parallel wichtige tiefergehende Informationen liefern (Schindelegger et al., 2013). Abhängig von den zugrundeliegenden Daten und den verschiedenen geophysikalischen Fluiden, die bei der Berechnung der Anregung der Polbewegung mitberücksichtigt werden sollen, wird von Wahr (1982) auch ein kombinierter Ansatz von Drehimpuls- und Drehmomentfunktionen zur Berechnung vorgeschlagen.

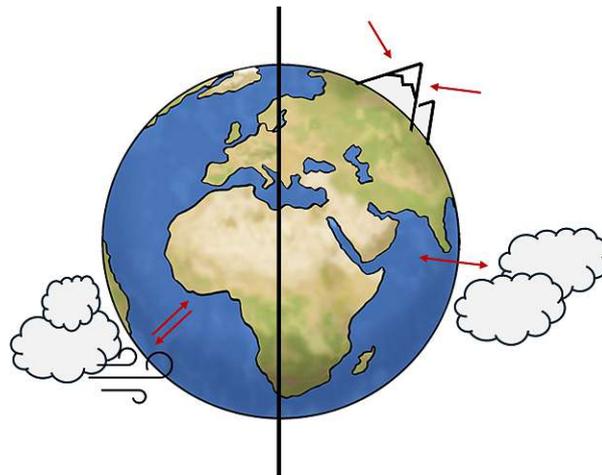


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der auf die Erde wirkenden Drehmomente: Reibung durch Wind, Druckgradienten an Topographie und Gravitation (basierend auf (De Viron und Dehant, 1999; Staak, 2022))

### 2.5. Coupled Model Intercomparison Project, Scenario Model Intercomparison Project

Nach einem kurzen allgemeinen Überblick über Klimamodellierung folgen Informationen zu den Projekten, aus denen die in der Arbeit verwendeten Daten für die Berechnung der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen stammen.

### 2.5.1. Klimamodelle

Aufgabe des globalen Klimasystems ist es grundsätzlich, Wärme der Sonnenstrahlung vom Äquator weg zu den Polen zu transportieren. Das Klimasystem besteht aus vielen Subsystemen, wie Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre. Eine wesentliche Frage, die Klimamodelle beantworten sollen, ist, wie viel Wärme im Erdsystem verbleibt und wie bzw. wohin diese transportiert wird. Klimamodelle sollen dieses Zusammenspiel global und für Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft simulieren. In sogenannten General Circulation Models (GCMs) werden wesentliche Eigenschaften und Mechanismen eines Subsystems, beispielsweise der Atmosphäre, basierend auf theoretischen Konzepten und Gleichungen nachgebildet und rasterisiert über die gesamte Erdoberfläche und in mehreren Schichten aufgebaut dargestellt, Abbildung 2.12 zeigt dieses Prinzip. Werden mehrere Modelle von Subsystemen gekoppelt und wird der Energieaustausch zwischen den Systemen berücksichtigt, spricht man von Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) oder, wenn noch mehr Subsysteme berücksichtigt werden von Earth System Models (ESMs) oder Integrated Assessment Models (IAMs). Die aktuelle Herausforderung neben der Simplifizierung und Parametrisierung der hochkomplexen physikalischen Vorgänge, die das Klima beeinflussen, ist also die Schaffung von Standards und Rahmenbedingungen, sodass verschiedene Modelle (kleinerer Prozesse) miteinander kombiniert werden können (Edwards, 2011).

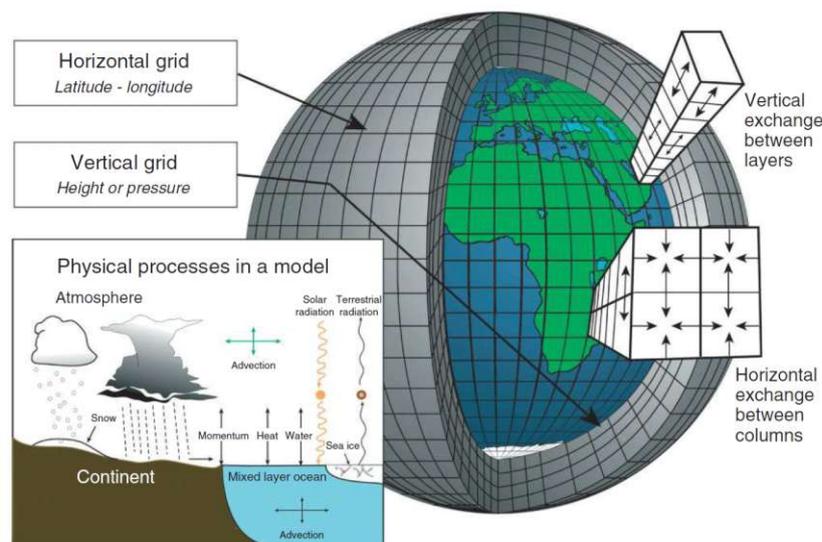


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung eines Klimamodells (Edwards, 2011)

Modell	Land	Jahr der Veröffentlichung	räuml. Auflösung
CAMS-CSM1-0	China	2016	100 km
CNRM-ESM2-1	Frankreich	2017	250 km
CanESM5-1	Kanada	2019	500 km
EC-Earth3-Veg	Europa	2019	100 km
FGOALS-g3	China	2017	250 km
GISS-E2-1-H	USA	2019	250 km
IPSL-CM6A-LR	Frankreich	2017	250 km
MIROC-ES2L	Japan	2018	500 km
MPI-ESM1-2-LR	Deutschland	2017	250 km
MRI-ESM2-0	Japan	2017	100 km
UKESM1-0-LL	Vereinigtes Königreich	2018	250 km

Tabelle 2.1: Verwendete Klimamodelle (Boucher et al., 2018; EC-Earth-Consortium, 2019; Li, 2019; NASA Goddard Institute for Space Studies, 2018; Rong, 2019; Seferian, 2018; Swart et al., 2019; Tachiiri et al., 2019; Tang et al., 2019; Wieners et al., 2019; Yukimoto et al., 2019)

Die Modelle, die im Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) verwendet werden, sind Atmosphären- und Ozeanmodelle, die zum Teil auch mit Landoberflächenmodellen erweitert werden, um zukünftige Parameter der Atmosphäre zu prognostizieren und zu untersuchen, auf welche Weise sich die atmosphärischen Eigenschaften mit zukünftigem (steigendem) Treibhausgasausstoß verändern (Salstein, 2020). Für die Berechnungen der vorliegenden Arbeit werden aus über 120 Modellen, die Teil des CMIP Projekts sind, elf Modelle ausgewählt, die für alle fünf ausgewählten Klimaszenarien Daten für Oberflächendruck und Wind bereitstellen (Taylor et al., 2022). Diese sind in Tabelle 2.1 aufgelistet, die räumliche Auflösung bezieht sich in diesem Fall auf die atmosphärischen Outputparameter. In der vorliegenden Arbeit sind das Druck- und Winddaten, mit denen die in Kapitel 3 beschriebenen effektiven Drehimpulsfunktionen gespeist werden, aus denen dann die atmosphärische Anregung der Polbewegung errechnet bzw. prädiziert wird.

### 2.5.2. Coupled Model Intercomparison Project

Das Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) ist Teil des World Climate Research Programme (WCRP) und startete 1995 unter dem Namen Working Group on Coupled Modelling (WGCM). CMIP wird seither kontinuierlich weiterentwickelt und befindet sich derzeit in Phase 6 (CMIP6), Phase 7 befindet sich bereits

in Entwicklung. Die Hauptziele von CMIP sind vergangene und zukünftige Klima-  
veränderungen und vor allem den momentan stattfindenden Klimawandel besser  
zu verstehen, also sowohl die natürlichen als auch die anthropogenen Mechanis-  
men zu untersuchen und zu modellieren. Unterschiedliche Klimamodelle werden  
untereinander und mit Beobachtungen verglichen, um die einzelnen Modelle zu  
evaluieren und zu verbessern. Vergleich und Evaluierung von Klimamodellen sind  
wichtig, da jedes Modell andere Annahmen und Vereinfachungen über das reale  
und unendlich komplexe System Erde trifft. Klimamodelle werden anhand histo-  
rischer Daten und für unterschiedliche zeitliche und räumliche Auflösungen ge-  
testet. CMIP arbeitet auch an Algorithmen, um Modell-Outputdaten und syste-  
matische Modellfehler und Biases besser zu verstehen. Neben der Koordination  
der Entwicklung von Klimamodellen ist ein weiteres wichtiges Ziel von CMIP, die  
Outputdaten der Modelle in einem standardisierten Format der Öffentlichkeit zur  
Verfügung zu stellen (Eyring et al., 2016).

### 2.5.3. Scenario Model Intercomparison Project und Klimaszenarien

Ein Inhalt von CMIP6 ist das Scenario Model Intercomparison Project (Scenario  
MIP), das für unterschiedliche Szenarien Prognosen für klimarelevante Parameter  
wie die Temperatur für das 21. Jahrhundert errechnet. Die klimarelevanten Para-  
meter werden aus verschiedenen getesteten und evaluierten Modellen errechnet  
und dienen unter anderem auch als Datengrundlage für die Berichte des Inter-  
governmental Panel on Climate Change (IPCC). Veröffentlicht und zugänglich ge-  
macht werden die Modell-Outputdaten durch die Earth System Grid Federation  
(ESGF). Die Szenarien beinhalten unterschiedliche zukünftige sozioökonomische  
Entwicklungen der Gesellschaft, sogenannte 'Shared Socioeconomic Pathways' (SS-  
Ps). Je nach Szenario werden unterschiedliche Gesellschaftsentwicklungen, Treib-  
hausgasemissionen, Landnutzungen und Klimaschutzmaßnahmen angenommen,  
mit denen dann die Klimamodelle gespeist werden (O'Neill et al., 2016). Die Sze-  
narien werden einerseits aufgrund der sozioökonomischen Entwicklung (1 bis 5),  
andererseits durch den Strahlungsantrieb (in  $\text{Wm}^{-2}$ ), den sie im Jahr 2100 er-  
reichen, unterschieden und bezeichnet. Der Vorhersagezeitraum startet 2015 und  
läuft bis 2100, aufgeteilt in die Zeitabschnitte near term: 2021–2040, mid term:  
2041–2060 und long term: 2061–2100. Die prädierten Werte werden auf die Re-  
ferenzperiode 1850–1900 (bezeichnet als historic scenario, historisches Szenario)  
bezogen. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten fünf unterschiedlichen SS-  
Ps sind ident mit denen, die im aktuellen IPCC Klimabericht verwendet wurden

und werden im Folgenden kurz beschrieben (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023a; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b; O’Neill et al., 2016).

### **SSP1-1.9 - Sustainability**

- optimistische Annahme für Gesellschaftsentwicklung: hohe Investitionen in Bildung und Gesundheit, schnelles Wirtschaftswachstum, gut funktionierende öffentliche und internationale Einrichtungen
- nachhaltiges Wirtschaftswachstum und sehr niedrige Treibhausgasemissionen, die bis etwa 2050 auf netto null sinken, gefolgt von einem netto Minusbetrag von CO<sub>2</sub>-Emissionen
- geringe globale Erwärmung unter 1.5°C im Vergleich zu 1850–1900

### **SSP1-2.6 - Sustainability**

- optimistische Annahme für Gesellschaftsentwicklung: hohe Investitionen in Bildung und Gesundheit, schnelles Wirtschaftswachstum, gut funktionierende öffentliche und internationale Einrichtungen
- niedrige Treibhausgasemissionen, die bis etwa 2050 auf netto null sinken, gefolgt von einem geringen netto Minusbetrag von CO<sub>2</sub>-Emissionen
- geringe Erderwärmung bis zu 2°C

### **SSP2-4.5 - Middle of the road**

- Mittelweg der sozioökonomischen Entwicklung: Muster der historischen Gesellschaftsentwicklung setzt sich weiter fort
- Treibhausgasemissionen bleiben unverändert bis etwa 2050 und sinken dann
- mittlere Erderwärmung bis zu 3°C

### SSP3-7.0 - Regional rivalry

- pessimistischere Annahme für Gesellschaftsentwicklung: wenig Investition in Bildung und Gesundheit, schnelles Bevölkerungswachstum, steigende soziale Ungleichheiten und somit stärkere Anfälligkeit für Auswirkungen des Klimawandels
- großteils auf fossilen Brennstoffen basierende Wirtschaft, hohe Treibhausgasemissionen, die sich bis 2100 ausgehend vom jetzigen Ausstoß verdoppeln
- starke globale Erwärmung bis zu 4°C

### SSP5-8.5 - Fossil-fueled development

- optimistische Annahme für Gesellschaftsentwicklung: hohe Investitionen in Bildung und Gesundheit, schnelles Wirtschaftswachstum, gut funktionierende öffentliche und internationale Einrichtungen
- energieintensive und auf fossilen Brennstoffen basierende Wirtschaft, sehr hohe Treibhausgasemissionen, die sich bis 2050 verdoppeln
- starke globale Erwärmung bis zu 5°C

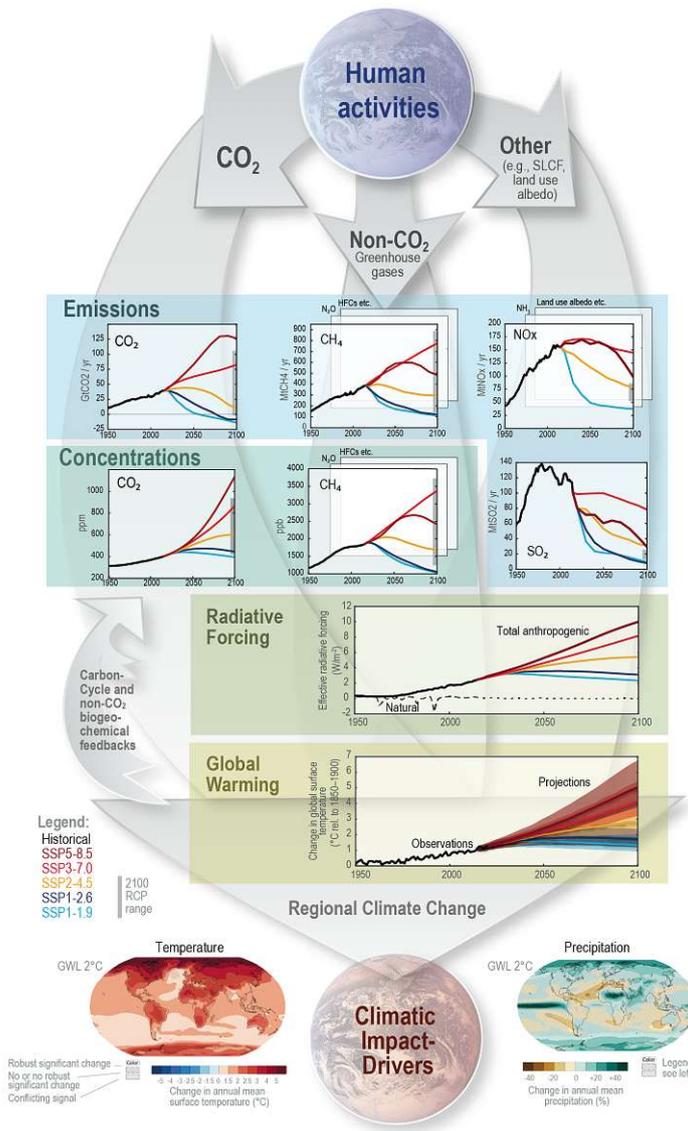


Abbildung 2.13: Kausalkette des Klimawandels für die 5 beschriebenen SSP-Entwicklungsszenarien: anthropogene Treibhausgasemissionen bewirken veränderte Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre, die wiederum die Energieflüsse der Erde verändern und somit zu weniger Wärmeabstrahlung und in der Folge zur Erwärmung des Systems und zu regional sehr unterschiedlichen Auswirkungen wie Temperatur- und Niederschlagsveränderungen auf der Erde führen; im Diagramm verwendete Abkürzungen: SLCF: short-lived climate forcers, GWL: global warming level, RCP: representative concentration pathway (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b)

## 3. Berechnung und Auswertung

Das folgende Kapitel widmet sich der praktischen Auswertung der in Kapitel 2.4 vorgestellten Gleichungen mit für das 21. Jahrhundert prognostizierten Wind- und Oberflächendruckdaten für die vorgestellten Klimaszenarien und -modelle. Im ersten Abschnitt werden die eingespeisten Daten aus dem CMIP6 Projekt genauer vorgestellt, danach wird die mit Matlab durchgeführte Berechnung beschrieben.

### 3.1. Datengrundlage

Die Inputparameter für die Auswertung der Drehimpulsfunktionen stammen aus im Rahmen des CMIP6 Projekts gesammelten und in einheitliches Format gebrachten Daten und liegen im NetCDF-Format vor. Die Referenzen der CMIP6 Modelloutputs der Wind- und Oberflächendruckdaten, die für die Berechnungen der vorliegenden Arbeit herangezogen werden, sind in Anhang B aufgelistet. Für jedes der fünf Klimaszenarien und jedes der 11 ausgewählten Modelle gibt es also Files mit den prognostizierten Druck- und Winddaten. Die Eckdaten der verwendeten Klimamodelle und Klimaszenarien wurden bereits in Tabelle 2.1 bzw. Kapitel 2.5 beschrieben. Die für den Bewegungsterm notwendigen Daten der Windgeschwindigkeiten sind für nordwärts und ostwärts gerichtete Komponenten in getrennten Dateien gegeben und liegen in folgenden Dimensionen vor:

- horizontales Grid: Auflösung  $64 \times 128$  bis  $256 \times 512$  (Breitengrade, Längengrade ( $^{\circ}$ )), variabel pro Modell
- 19 vertikale Druckschichten (Pa)
- monatliche Auflösung von Jänner 2015 bis Dezember 2100 (1032 Zeitpunkte).

Weil die Daten des Modells CAMS-CSM1-0 nur bis Dezember 2099 reichen, werden alle Datenreihen auf diesen Zeitraum beschränkt und entsprechend gekürzt (1020 Zeitpunkte). Die Windgeschwindigkeiten liegen in der Einheit m/s vor.

Die Daten des Oberflächendrucks, die für den Massenterm benötigt werden, sind in der Einheit Pascal gegeben und liegen in folgenden Dimensionen vor:

- horizontales Grid: Auflösung  $64 \times 128$  bis  $256 \times 512$  (Breitengrade, Längengrade), variabel pro Modell
- monatliche Auflösung von Jänner 2015 bis Dezember 2100 (1032 Zeitpunkte), weil die Daten des Modells CAMS-CSM1-0 nur bis Dezember 2099 reichen, werden alle Datenreihen auf diesen Zeitraum beschränkt und entsprechend gekürzt (1020 Zeitpunkte)

Neben den Dateien mit den Windgeschwindigkeits- und Oberflächendruckwerten werden auch noch für jedes der Klimamodelle Dateien mit Zellgrößen der einzelnen Gitterzellen und Angaben, welcher Prozentsatz jeder Zelle mit Land bedeckt ist, verwendet.

### 3.2. Auswertung mit Matlab

Aufbauend auf den Formeln (2.16) und (2.17) werden basierend auf den beschriebenen CMIP netCDF-Dateien der nordwärts und ostwärts gerichteten Windgeschwindigkeiten  $v$ ,  $u$  und des Oberflächendrucks  $p$  in Matlab die äquatorialen Anregungsfunktionen der Polbewegung ausgewertet. Wie erwähnt beinhaltet die Polbewegung nur die beiden äquatorialen Komponenten des zeitabhängigen Vektors der Erdrotationsachse, die dritte axiale Komponente wird in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt. Die  $\chi_1$ - und  $\chi_2$ -Komponente der äquatorialen Anregung werden ebenso wie Wind- und Druckterm getrennt voneinander berechnet. Somit ergeben sich die folgenden vier Formeln: Gleichung (3.1) beschreibt die  $\chi_1$ -Komponente des atmosphärischen Windterms, (3.2) die Komponente in  $\chi_2$ -Richtung des Windterms, (3.3) und (3.4) zeigen die erste bzw. zweite Komponente des atmosphärischen Druckterms der Anregung der Polbewegung (Schindelegger, 2014, S. 128).

$$H_1^W \approx -\frac{R^3}{g} \sum_{\lambda} \sum_{\theta} \sum_{k=1}^{n_p} \frac{p_{k+1} - p_k}{2} [\cos(\theta) \cos(\lambda) (u_k(\theta, \lambda) + u_{k+1}(\theta, \lambda)) - \sin(\lambda) (v_k(\theta, \lambda) + v_{k+1}(\theta, \lambda))] \sin(\theta) d\theta d\lambda \quad (3.1)$$

$$H_2^W \approx -\frac{R^3}{g} \sum_{\lambda} \sum_{\theta} \sum_{k=1}^{n_p} \frac{p_{k+1} - p_k}{2} [\cos(\theta) \sin(\lambda) (u_k(\theta, \lambda) + u_{k+1}(\theta, \lambda)) + \cos(\lambda) (v_k(\theta, \lambda) + v_{k+1}(\theta, \lambda))] \sin(\theta) d\theta d\lambda \quad (3.2)$$

$$H_1^P \approx -\frac{R^4}{g} \sum_{\theta} \sum_{\lambda} p^{\text{IB}}(\theta, \lambda) \cos(\theta) \sin^2(\theta) \cos(\lambda) d\theta d\lambda \quad (3.3)$$

$$H_2^P \approx -\frac{R^4}{g} \sum_{\theta} \sum_{\lambda} p^{\text{IB}}(\theta, \lambda) \cos(\theta) \sin^2(\theta) \sin(\lambda) d\theta d\lambda \quad (3.4)$$

In den obigen Formeln bezeichnen  $\lambda$  und  $\theta$  die Längen und Co-Breiten der Gitterzellen des horizontalen Netzes, in dem die Datenpunkte vorliegen,  $p_k$  bezeichnet den atmosphärischen Druck in den  $n_p$  unterschiedlichen Atmosphärenschichten. Längen- und Breitengrade sowie die Druckniveaus sind wie die Zeitpunkte in den netCDF-Dateien für die Windgeschwindigkeiten und Oberflächendruckwerte enthalten und können direkt ausgelesen werden. Die  $u_k$ -Werte bezeichnen die Windgeschwindigkeiten in Ost-West-Richtung, die  $v_k$ -Werte die Geschwindigkeiten in Nord-Süd-Richtung.

Die in Kapitel 2.4.7 beschriebene Korrektur der atmosphärischen Druckwerte über den Ozeanen wird ebenfalls in den Berechnungen berücksichtigt. Der Oberflächendruck über den Landmassen, der über die netCDF-Dateien eingelesen wird, bleibt unverändert. Der Druck über den Gitterzellen, die über den Ozeanen liegen, wird jedoch zu einem einheitlichen Druck, gemittelt über die gesamten Meeresoberflächen, korrigiert. Für die Entscheidung, welche der Zellen über Wasser oder über Land liegt, wird der Prozentsatz der Landabdeckung herangezogen, der für jede Gitterzelle aus einer netCDF-Datei für jedes der Klimamodelle ausgelesen werden kann. Sobald mehr als die Hälfte der Fläche einer Zelle kein Land ist, wird sie als Ozean definiert. Die endgültige Druckverteilung setzt sich dann also zusammen aus dem gegebenen Oberflächendruck über den Land-Gitterzellen und dem Mittel des Drucks über alle Meeresflächen, der jeder Gitterzelle, die über den Ozeanen liegt, zugeschrieben wird.

Für das Oberflächenelement  $R^2 \sin(\theta) d\theta d\lambda$  wird die für jede Zelle gegebene Zellengröße eingesetzt. Die vertikale Summation über jeder der Gitterzellen in Gleichungen (3.1) und (3.2) wird von der obersten ( $k = 1$ ) zur untersten atmosphärischen Schicht ( $k = n_p$ ) durchgeführt. Folgende Konstanten werden in den Formeln benötigt:

- Gravitationsbeschleunigung  $g = 9,80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$
- mittlerer Erdradius  $R = 6,371 \cdot 10^6 \text{ (m)}$
- mittleres äquatoriales Hauptträgheitsmoment der Erde  
 $C = 8,0365 \cdot 10^{37} \text{ (kgm}^2\text{)}$

- axiales Hauptträgheitsmoment der Erde  $A = 8,0102 \cdot 10^{37}$  (kgm<sup>2</sup>)
- mittlere Winkelgeschwindigkeit der Erde  $\Omega = 7,292115 \cdot 10^{-5}$  (rad/s)

Die Formeln (3.1) und (3.2) bzw. (3.3) und (3.4) werden jeweils über drei Schleifen für alle elf Klimamodelle, alle fünf Klimaszenarien und alle 1020 Monate zwischen 2015 und 2100 ausgewertet. Danach werden die Komponenten der Wind- und Druckterme der Drehimpulsfunktionen laut Formel (2.15) zu den effektiven Drehimpulsfunktionen umgerechnet. Gleichung 3.5 zeigt dann die endgültigen Zeitreihen der äquatorialen Drehimpulsfunktionen, die im Folgenden genauer untersucht und ausgewertet werden (Schuh und S. Böhm, 2020, S. 197).

$$\begin{aligned} \chi_1^W &= \frac{1.608 H_1^W}{(C-A)\Omega} & \chi_2^W &= \frac{1.608 H_2^W}{(C-A)\Omega} \\ \chi_1^P &= \frac{1.100 H_1^P}{(C-A)\Omega} & \chi_2^P &= \frac{1.100 H_2^P}{(C-A)\Omega} \\ \chi_1 &= \chi_1^W + \chi_1^P & \chi_2 &= \chi_2^W + \chi_2^P \end{aligned} \quad (3.5)$$

Die Einheit der Massen- bzw. Bewegungsterme  $H_1^W$ ,  $H_2^W$ ,  $H_1^P$  und  $H_2^P$  ist kg/m<sup>2</sup>. Nach der Umrechnung zu den effektiven Drehimpulsfunktionen ändert sich die Einheit zu Radiant (rad), die dann auch einfach zu Millibogensekunden (mas) umgerechnet werden kann. Sowohl die Anregungsfunktionen  $\chi_1^W$ ,  $\chi_2^W$ ,  $\chi_1^P$  und  $\chi_2^P$  alleine als auch die aufsummierten Terme  $\chi_1$  und  $\chi_2$  werden im Weiteren untersucht.

#### 3.2.1. Vergleich der Modelle und Szenarien und Evaluation der Trends

Für jedes der fünf Klimaszenarien werden die atmosphärischen Drehimpulsfunktionen mit Druck- und Winddaten aus elf Klimamodellen ausgewertet, das führt insgesamt zu 55 Zeitreihen für jede der beiden Richtungen  $\chi_1$  und  $\chi_2$ , die nun näher analysiert und untereinander verglichen werden sollen. Weil die Zeitreihen der Polbewegung durch Summation entstanden sind, die sich ja aus einer ursprünglichen Integration ergibt, sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle entsprechend der unbekanntenen Integrationskonstanten zueinander jeweils um einen konstanten Offset versetzt. Um die verschiedenen Modelle vergleichbar zu machen, wird von den effektiven Drehimpulsfunktionen der konstante Anteil,

also der Mittelwert jeder Zeitreihe, abgezogen. Um die fünf Klimaszenarien untereinander bestmöglich zu vergleichen und aussagekräftige Prognosen zu erzielen, wird für jedes der Szenarien ein Mittelwert über alle elf Modelle ausgewertet, der sogenannte Multi-Model-Mean (MMM). Weiters wird auch der Trend der Drehimpulsfunktionen für jedes Szenario untersucht. Dafür wird jeweils eine Gerade in die Zeitreihen eingerechnet.

Um die Zeitreihen der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen untereinander zu vergleichen, werden die Analysewerte der Korrelationskoeffizienten oder Root Mean Square Error (RMSE) bzw. in manchen Fällen die Standardabweichung der Differenz zweier Zeitreihen verwendet. Für die Korrelation zwischen zwei Ergebnissen wird die Matlabfunktion 'corr()' herangezogen, für den Root Mean Square Error die Matlabfunktion 'rmse()', für die Standardabweichung der Differenz die Matlabfunktion 'std()'. Nach J. Cohen und J. W. Cohen (1988) kann die Stärke der Korrelation durch den Korrelationskoeffizienten  $r$  wie folgt charakterisiert werden:

- $0,1 < r < 0,3$  schwache Korrelation
- $0,3 < r < 0,5$  mittlere Korrelation
- $r > 0,5$  starke Korrelation.

#### 3.2.2. Fast Fourier Transformation und Ausgleich der Amplitude der jährlichen Schwingung

Um die Hauptfrequenzen und die zugehörigen Amplitudengrößen der atmosphärischen Anregung der Polbewegung herauszufinden, werden die Multi-Model-Mean Ergebnisse aller fünf Szenarien einer Fast Fourier Transformation (FFT) unterzogen. Dafür werden die Zeitreihen, die nach der Berechnung ja als jeweils ein Vektor für die beiden Komponenten  $\chi_1$  und  $\chi_2$  vorliegen, zu einem komplexen Vektor zusammengefasst und nach der Euler'schen Formel durch jeweils Amplitude und Phase einer prograden und einer retrograden Komponente umgeschrieben, wie in Gleichung (3.6) gezeigt ist. Diese Umformung bietet auch den Vorteil, dass sie von der Lage des Koordinatensystems unabhängig ist. Die Überlagerung zweier kreisförmiger Schwingungen in pro- und retrograder Richtung führt zu einer Schwingung, die dieselbe Schwingungsrichtung aufweist wie die kreisförmige Schwingung mit der größeren Amplitude. Die resultierende Schwingung hat eine elliptische Form und ist aus der Ursprungslage je nach Phasenverschiebung der beiden

ursprünglichen kreisförmigen Schwingungen verkippt. Der Zusammenhang ist in Abbildung 3.1 skizziert.

Um die Annahme zu überprüfen, ob sich die Amplitude der jährlichen Schwingung mit der Veränderung der atmosphärischen Zusammensetzung durch Treibhausgasausstoß ebenfalls ändert, werden die Zeitreihen der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen in fünf-Jahres-Intervallen, die jeweils um zwei Jahre verschoben werden, ausgeglichen. Um die Amplitude, die als Unbekannte ausgeglichen werden soll, explizit auszudrücken, wird ebenfalls die in Gleichung (3.6) gezeigte Schreibweise verwendet (Gross, 2003, S. 6).

$$\hat{\chi}(t) = \chi_1(t) + i\chi_2(t) \tag{3.6}$$

$$\hat{\chi}(t) = A_p e^{i\alpha_p} e^{i\sigma(t-t_0)} + A_r e^{i\alpha_r} e^{-i\sigma(t-t_0)}$$

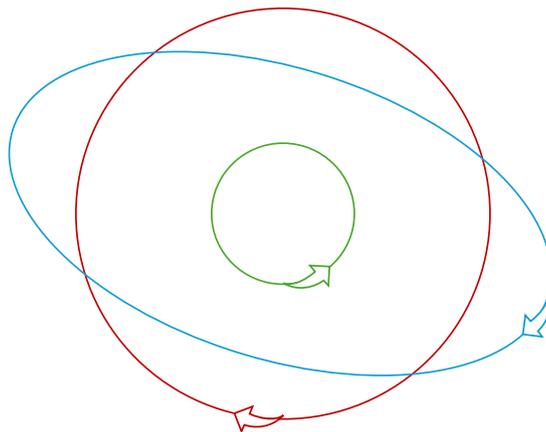


Abbildung 3.1: Überlagerung einer prograden und einer retrograden kreisförmigen Schwingung zu einer elliptischen Schwingung

In obiger Formel (3.6) gilt die Beziehung  $\sigma = 2\pi f_1(t - t_0)$ , wobei  $t_0$  dem 01.2015 entspricht und  $t$  dem jeweiligen Monat zwischen Jänner 2015 und Dezember 2099.  $f_1 = \frac{1}{365,2422}$  bezeichnet die Grundfrequenz der jährlichen Schwingung. Gleichung (3.6) kann folgendermaßen zu Formel (3.7) umgeschrieben werden:

$$\hat{\chi}(t) = A_p [\cos(\alpha_p) + i \sin(\alpha_p)] [\cos(\sigma) + i \sin(\sigma)] + A_r [\cos(\alpha_r) + i \sin(\alpha_r)] [\cos(\sigma) - i \sin(\sigma)] \tag{3.7}$$

Nach weiterem Ausmultiplizieren und Zusammenfassen der folgenden Terme

$$A_p \cos(\alpha_p) = A_p^c, \quad A_p \sin(\alpha_p) = A_p^s, \quad A_r \cos(\alpha_r) = A_r^c, \quad A_r \sin(\alpha_r) = A_r^s$$

bilden die Gleichungen (3.8) und (3.9) das funktionale Modell des Ausgleichs der Amplitude der jährlichen Schwingung.

$$\chi_1 = A_p^c \cos(\sigma) - A_p^s \sin(\sigma) + A_r^c \cos(\sigma) + A_r^s \sin(\sigma) \quad (3.8)$$

$$\chi_2 = A_p^c \sin(\sigma) + A_p^s \cos(\sigma) - A_r^c \sin(\sigma) + A_r^s \cos(\sigma) \quad (3.9)$$

Für den vermittelnden Ausgleich werden als Beobachtungsvektor die beiden Zeitreihen für  $\chi_1$  und  $\chi_2$  zu einem einzigen Vektor aneinandergehängt. Der Ausgleich wird über ein Zeitintervall von jeweils fünf Jahren, das immer um zwei Jahre verschoben wird, ausgewertet. Die Designmatrix ist ebenfalls eine zusammengehängte Matrix, sie besteht aus den Ableitungen des ersten Teils des funktionalen Modells (3.8) nach den vier Unbekannten, gefolgt von den Ableitungen des zweiten Teils des funktionalen Modells (3.9). Der Ausgleich wird für jedes Modell in jedem Szenario extra berechnet, die ausgeglichenen Unbekannten werden danach erst zu Multi-Model-Mean Variablen für jedes der fünf Klimaszenarien gemittelt. Die schlussendlich gewünschten prograden und retrograden Amplituden für jedes Szenario entstehen laut Gleichung (3.10).

$$A_p = \sqrt{A_p^s{}^2 + A_p^c{}^2} \quad A_r = \sqrt{A_r^s{}^2 + A_r^c{}^2} \quad (3.10)$$

Die Veränderungen der Amplituden über das 21. Jahrhundert werden zum Vergleich auch mithilfe eines Wavelet Skalogramms geplottet, dafür wird die Matlab-funktion 'cwt()' herangezogen.

### 3.3. Validierung und Vergleich mit GFZ Referenzdaten

Zur Überprüfung der Plausibilität der berechneten Drehimpulsfunktionen werden diese mit vom International Earth Rotation Service zur Verfügung gestellten Daten verglichen. Die vom IERS veröffentlichten Daten stammen vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) und sind effektive atmosphärische Drehimpulsfunktionen, die auf dreistündlichen vom ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) beobachteten Wetterdaten basieren. Die GFZ Daten sind also auch errechnete Werte, die aber auf tatsächlich gemessenen Daten basieren. Die Da-

ten werden über die Homepage des International Earth Rotation and Reference System Service heruntergeladen, die detaillierte Referenz ist in Anhang B zu finden. Der überlappende Zeitraum der beiden Datensätze zwischen Jänner 2015 und August 2023 wird zur Kontrolle der berechneten Polbewegungsanregung herangezogen. Weil die IERS Daten alle drei Stunden Werte für die effektiven Drehimpulsfunktionen zur Verfügung stellen, werden die Daten vor dem Vergleich zu monatlichen Zeitintervallen zusammengefasst, indem für jedes Monat der Mittelwert bestimmt wird. Die Charakteristiken der GFZ Zeitreihen werden sowohl für die  $\chi_1$ - und die  $\chi_2$ -Komponente getrennt untersucht, als auch in kombinierter Form. Zum Vergleich der Referenzdaten und der in der vorliegenden Arbeit berechneten Ergebnisse werden wie bereits erwähnt die Parameter Korrelation und Root Mean Square Error herangezogen.

## 4. Ergebnisse

Die Polbewegung ist, wie zu Beginn erwähnt, der äquatoriale Anteil der Bewegung der Erdachse. Die berechneten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen, die die atmosphärische Anregung der Polbewegung darstellen, können in den beiden äquatorialen Komponenten  $\chi_1$  und  $\chi_2$  angegeben werden. Das Koordinatensystem, in dem die atmosphärische Anregung angegeben wird, unterscheidet sich von dem in Kapitel 2.1 erwähnten System, in dem die gesamte Polbewegung angegeben wird. Im System der gesamten Polbewegung weist die x-Achse durch den Meridian von Greenwich, die y-Achse weist  $90^\circ$  dazu nach Westen. Die atmosphärische Anregung wird in den Achsen  $\chi_1$  und  $\chi_2$  angegeben, wobei die  $\chi_1$ -Achse ebenfalls durch den Meridian von Greenwich verläuft, die  $\chi_2$ -Achse zeigt aber  $90^\circ$  dazu nach Osten (Nastula und Salstein, 1999). Eine weitere gebräuchliche Art, die zweidimensionale äquatoriale Komponente der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen anzugeben, ist die Aufspaltung in einen prograden und einen retrograden Anteil. Durch die Umformung mit der Euler'schen Formel wird der komplexe äquatoriale Anteil  $\hat{\chi} = \chi_1 + i \chi_2$  dann mit den Variablen Amplitude und Phase der Schwingung, jeweils für die prograde und die retrograde Richtung, angegeben (Gross, 2003). Der Zusammenhang zwischen den beiden Darstellungsformen ist in Abschnitt 3.2.2 gegeben.

Die Auswertung des atmosphärischen Drehimpulses (atmospheric angular momentum (AAM)) für die fünf Klimaszenarien und jeweils elf Klimamodelle führt zu insgesamt 110 Zeitreihen, da der AAM immer für die Komponenten  $\chi_1$  und  $\chi_2$  getrennt voneinander berechnet werden. Das Ergebnis einer ausgewählten AAM Schwingung für Klimaszenario SSP2-4.5 und Klimamodell FGOALS-g3 ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Auf Basis solcher AAM Zeitreihen aller Szenarien und Modelle werden die weiteren Analysen durchgeführt.

## 4 ERGEBNISSE

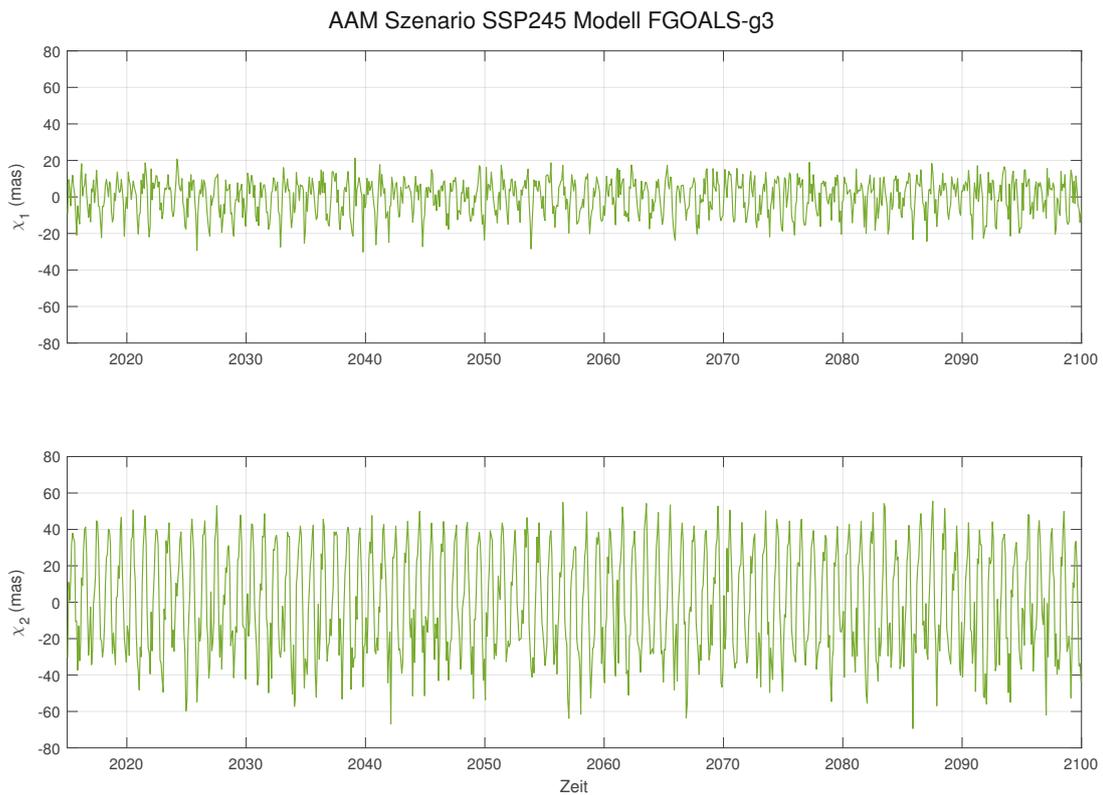


Abbildung 4.1: Atmosphärischer Drehimpuls für Szenario SSP2-4.5 und Modell FGOALS-g3

Die Ergebnisse der ausgewerteten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen der einzelnen Klimamodelle und Klimaszenarien werden im Folgenden präsentiert: Zuerst wird der Unterschied der Ergebnisse zwischen den beiden Komponenten  $\chi_1$  und  $\chi_2$  näher untersucht, für jedes Klimaszenario werden auch die Zeitreihen der elf Modelle miteinander verglichen. Mit Mittelwert-Zeitreihen aus den Ergebnissen der elf Klimamodelle wird dann die wahrscheinlichste atmosphärische Anregung für jedes der fünf Klimaszenarien untersucht und die Ergebnisse der Szenarien werden miteinander verglichen. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Entwicklung der Amplitudengröße über das 21. Jahrhundert für jedes der Klimaszenarien gelegt. Neben der Analyse des Gesamtterms der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen werden Druck- und Windterm und ihre jeweilige Entwicklung auch getrennt voneinander untersucht. Der letzte Punkt der Ergebnisse ist der Vergleich der berechneten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen mit Referenzdaten des Deutschen GeoForschungsZentrum.

## 4.1. Vergleich der Richtungen $\chi_1$ und $\chi_2$ und Vergleich der Klimamodelle

Im folgenden Abschnitt sollen die Zeitreihen der AAMs mit den unterschiedlichen Inputdaten der elf Klimamodelle untersucht und analysiert werden. Für jedes der fünf Klimaszenarien wird dann aus den Ergebnissen für jedes einzelne Modell ein Mittel pro Szenario berechnet.

In den folgenden Abbildungen ist entweder der Zeitraum 2015 bis 2025 dargestellt oder 2090–2100, da bei der Überlagerung von mehreren Kurven in der Abbildung der ganzen Zeitreihe nicht mehr genug zu erkennen wäre. In den zehnjährigen Zeitintervallen sind die jährlichen Schwingungen gut zu erkennen und die einzelnen Kurven klar voneinander unterscheidbar. Abbildung 4.2 zeigt die Zeitreihe der atmosphärischen Anregung für jedes der elf Modelle für Szenario SSP1-1.9 in den ersten zehn Jahren des Betrachtungszeitraums, die letzten zehn Jahre sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Für Szenario SSP5-8.5 sind die Ergebnisse aller Modelle und der Multi-Model-Mean für 2015 bis 2025 in Abbildung 4.4 dargestellt, die Ergebnisse der einzelnen Modelle und des Modellmittelwertes der Jahre 2090–2100 in Abbildung 4.5. Die in den Abbildungen in Schwarz dargestellte Linie zeigt den Mittelwert über alle elf Modellergebnisse für das jeweilige Klimaszenario.

### 4.1.1. Vergleich der Richtungen $\chi_1$ und $\chi_2$

Laut Nastula und Salstein (1999) ist der Anteil des Druckterms am Gesamtterm der äquatorialen atmosphärischen Drehimpulsfunktionen stärker als der des Windterms. Weiters ist aufgrund der angebrachten IB-Korrektur (beschrieben in Kapitel 2.4.7) der Druckterm in  $\chi_1$ -Richtung stärker gedämpft als in Richtung  $\chi_2$ . Bei der Berechnung des Druckterms der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen wird zwischen Gitterzellen über Land und Zellen über Ozeanen unterschieden. Für alle Ozeanzellen wird ein mittlerer Druck berechnet, weil angenommen wird, dass die Wassermassen durch Heben und Senken der Wasseroberfläche die Druckunterschiede ausgleichen. Somit wird angenommen, dass die Druckunterschiede über Landmassen einen größeren Einfluss auf den gesamten Druckterm haben und deshalb auch der Gesamtterm in Richtung der  $\chi_2$ -Achse stärker ausgeprägt ist. Da die  $\chi_2$ -Achse deutlich mehr über Landmassen gelagert ist als die  $\chi_1$ -Achse, wirkt sich die IB-Korrektur in Richtung  $\chi_1$  deutlich stärker dämpfend aus. Anhand der Multi-Model-Mean Zeitreihen in den Abbildungen 4.2 bis 4.5 kann genau das analysiert

werden. In Richtung  $\chi_1$  weist die Amplitude des Gesamtterms einen Wert von etwa 10 Millibogensekunden (mas) auf, in Richtung  $\chi_2$  etwa 35 bis 40 mas. Außerdem sind in der  $\chi_1$ -Komponente neben der jährlichen Schwingung mehr zusätzliche hochfrequentere Schwingungen zu erkennen.

### 4.1.2. Vergleich der Klimamodelle

Die stärksten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Modelle weist Szenario SSP5-8.5 auf, die Differenzen nehmen im Zeitabschnitt 2090–2100 im Vergleich zu 2015–2025 auch zu, wie beim Vergleich der Abbildungen 4.4 und 4.5 zu sehen ist. Besonders hervor stechen die Modelle UKESM1-0-LL, EC-Earth3-Veg und CNRM-ESM2-1, die auch schon beim Vergleich des Szenario SSSP2-4.5 mit den GFZ Referenzdaten zu den Modellen mit geringerer Übereinstimmung gezählt haben. Für Szenario SSP1-1.9 sind die Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Modelle generell kleiner als für SSP5-8.5. Weiters ist in den Abbildungen nicht klar zu erkennen, ob sich die Outputs der einzelnen Modelle für SSP1-1.9 in den späteren Zeitabschnitten stärker unterscheiden als am Beginn der Zeitreihe.

Für das mittlere Szenario SSP2-4.5 sind vergleichbare Plots wie die Abbildungen 4.2 und 4.3 in Anhang A.1 zu finden. Daraus wird ersichtlich, dass die Differenzen zwischen den Modellen für die Szenarien SSP2-4.5 und SSP3-7.0, wie bei Szenario SSP5-8.5 mit der Zeit größer werden, Szenario SSP1-2.6 verhält sich ähnlich wie SSP1-1.9, hier ist durch die Abbildungen alleine zu erkennen, dass die Ergebnisse der einzelnen Modelle weniger stark auseinanderdriften als bei den treibhausgasintensiveren Szenarien.

## 4 ERGEBNISSE

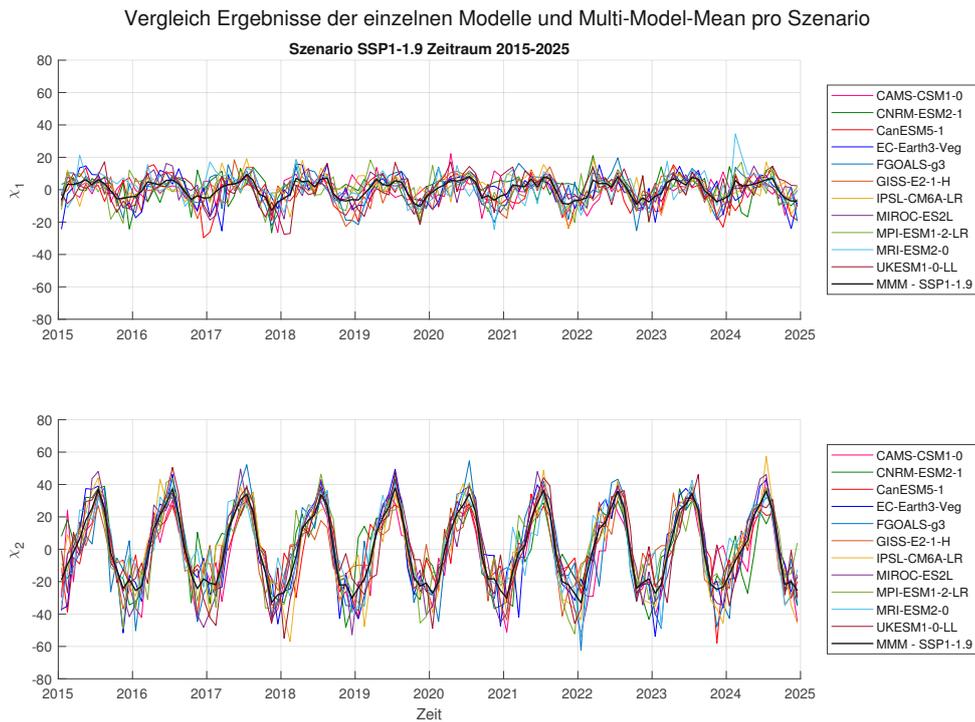


Abbildung 4.2: Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP1-1.9 im Zeitraum 2015–2025

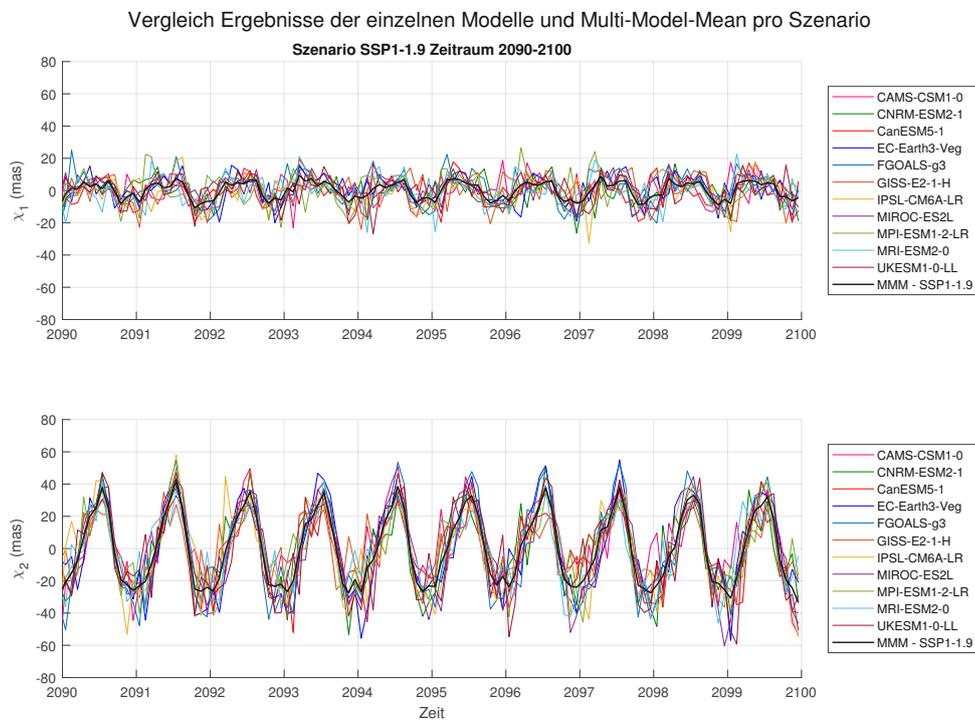


Abbildung 4.3: Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP1-1.9 im Zeitraum 2090–2100

## 4 ERGEBNISSE

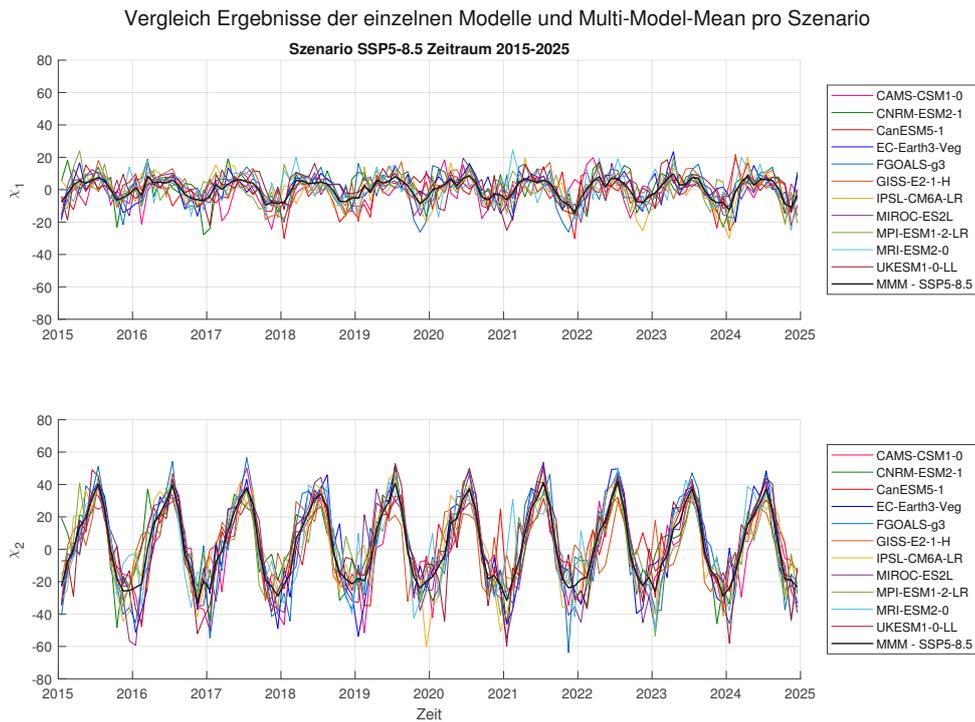


Abbildung 4.4: Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP5-8.5 im Zeitraum 2015–2025

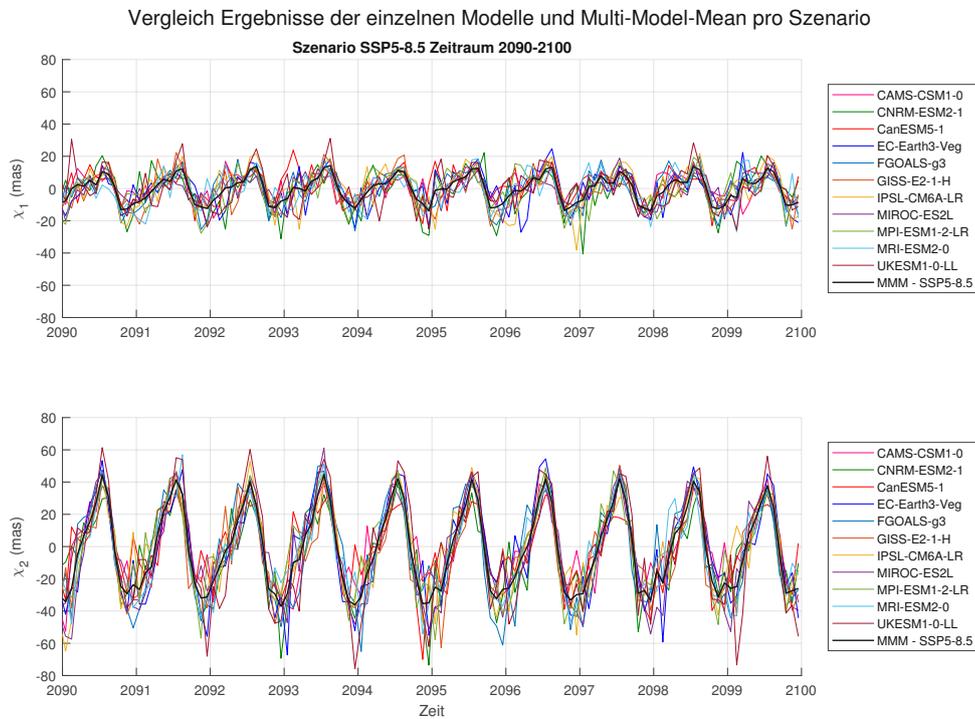


Abbildung 4.5: Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP5-8.5 im Zeitraum 2090–2100

	SSP1-1.9		SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
	$\chi_1$	$\chi_2$								
CAMS-CSM1-0	6,94	10,57	6,77	10,48	7,25	10,41	6,94	10,40	6,70	10,93
CNRM-ESM2-1	7,11	11,06	7,52	11,91	7,30	11,70	7,22	11,27	7,58	11,63
CanESM5-1	6,68	10,39	6,80	10,56	6,78	10,75	6,60	10,51	7,20	11,58
EC-Earth3-Veg	6,45	11,16	6,80	10,84	6,64	10,99	7,02	11,15	6,97	11,03
FGOALS-g3	6,66	11,34	6,52	11,67	6,35	11,69	6,48	11,64	6,75	11,98
GISS-E2-1-H	6,91	11,82	7,01	11,89	6,83	12,33	6,49	12,07	6,74	12,38
IPSL-CM6A-LR	6,62	10,64	6,77	10,76	7,02	11,20	6,96	11,23	7,02	10,93
MIROC-ES2L	5,68	10,35	5,66	10,51	5,90	10,39	6,05	9,89	6,07	10,42
MPI-ESM1-2-LR	7,16	10,42	6,87	9,97	6,90	10,44	6,85	10,43	7,22	10,32
MRI-ESM2-0	7,23	10,98	7,48	10,66	7,46	11,34	7,24	11,10	7,13	11,11
UKESM1-0-LL	7,76	12,01	8,05	12,20	7,71	12,27	7,78	11,99	7,96	12,34
<b>Mittel</b>	6,84	10,97	6,93	11,04	6,92	11,23	6,88	11,06	7,03	11,33

Tabelle 4.1: Standardabweichung der Differenzen zwischen Multi-Model-Mean und Output der einzelnen Modelle für jedes Szenario, gegeben in Millibogensekunden (mas)

In Tabelle 4.1 ist über den gesamten Zeitraum von 2015 bis 2100 die Standardabweichung der Differenz zwischen Multi-Model-Mean und den Ergebnissen der einzelnen Modelle angegeben. In der Tabelle ist auch die mittlere Standardabweichung der Differenz über alle Modelle gegeben. Die mittlere Standardabweichung der Differenz zwischen den Ergebnissen der einzelnen Modelle und dem Multi-Model-Mean jedes Szenarios wächst von Szenario SSP1-1.9 zu SSP5-8.5 stetig an. Vergleicht man die Werte für  $\chi_1$  und  $\chi_2$ , zeigt sich, dass die Standardabweichung der Differenz zwischen den einzelnen Modellen und dem Multi-Model-Mean für  $\chi_1$  geringer ist als in  $\chi_2$ . Vergleicht man jeweils die Standardabweichungen der Modelle zum Multi-Model-Mean untereinander, so weist für alle bis auf drei Fälle das Modell UKESM1-0-LL die höchste Standardabweichung der Differenz auf, die übrigen drei Fälle werden von Modell GISS-E2-1-H abgedeckt. Die geringste Standardabweichung der Differenz weist bis auf zwei Fälle das Modell MIROC-ES2L auf, die beiden verbleibenden niedrigsten Werte zeigt das Modell MPI-ESM1-2-LR.

	SSP1-1.9		SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
	$\chi_1$	$\chi_2$								
CAMS-CSM1-0	0,50	0,89	0,52	0,89	0,53	0,89	0,56	0,90	0,60	0,89
CNRM-ESM2-1	0,59	0,89	0,60	0,86	0,64	0,87	0,66	0,88	0,67	0,88
CanESM5-1	0,62	0,89	0,60	0,88	0,61	0,88	0,64	0,89	0,62	0,87
EC-Earth3-Veg	0,67	0,92	0,63	0,92	0,65	0,92	0,66	0,92	0,70	0,92
FGOALS-g3	0,73	0,92	0,75	0,93	0,77	0,93	0,76	0,92	0,77	0,92
GISS-E2-1-H	0,68	0,85	0,69	0,85	0,72	0,84	0,75	0,85	0,75	0,85
IPSL-CM6A-LR	0,67	0,91	0,67	0,91	0,70	0,92	0,70	0,91	0,76	0,92
MIROC-ES2L	0,63	0,93	0,61	0,93	0,64	0,93	0,67	0,94	0,69	0,93
MPI-ESM1-2-LR	0,59	0,89	0,58	0,90	0,64	0,89	0,64	0,90	0,67	0,90
MRI-ESM2-0	0,58	0,89	0,54	0,89	0,56	0,88	0,60	0,89	0,65	0,90
UKESM1-0-LL	0,59	0,90	0,57	0,89	0,63	0,90	0,65	0,91	0,66	0,92

Tabelle 4.2: Korrelationskoeffizienten zwischen Multi-Model-Mean und Output der einzelnen Modelle für jedes Szenario

Tabelle 4.2 zeigt die Korrelation zwischen Multi-Model-Mean jedes Szenarios und den Outputs der einzelnen Modelle für die atmosphärische Anregung der Polbewegung. Im Unterschied zu den Werten der Standardabweichung der Differenz ist die Korrelation zwischen Modelloutputs und Multi-Model-Mean in Richtung  $\chi_2$  höher als für  $\chi_1$ . Tendenziell steigt die Korrelation von Szenario SSP1-1.9 zu SSP5-8.5 für beide Richtungen an. Die stärksten Korrelationen weisen die Modelle FGOALS-g3 und MIROC-ES2L auf, die geringsten Korrelationen zwischen den Multi-Model-Means und den Modellergebnissen finden sich bei CAMS-CSM1-0 und GISS-E2-1-H.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die Ergebnisse der einzelnen Modelle teilweise in absoluten Zahlen zwar recht unterschiedlich sind, die Analyseparameter sich über den gesamten betrachteten Zeitraum jedoch nicht gravierend unterscheiden. Somit ist auch die Bildung eines Multi-Model-Means pro Szenario sehr sinnvoll, um eine möglichst gute Prognose der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen zu berechnen.

### 4.2. Vergleich der Klimaszenarien

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Multi-Model-Mean Zeitreihen für die fünf Klimaszenarien über das 21. Jahrhundert untersucht. Dabei werden die Hauptperioden der Schwingung der atmosphärischen Anregung untersucht, die säkularen Trends und die Entwicklung der Amplituden der AAM Schwingungen über das 21. Jahrhundert.

#### 4.2.1. Perioden

Um die Hauptperioden der MMM-AAM Zeitreihen zu untersuchen, werden die fünf Schwingungen einer Fast Fourier Transformation (FFT) unterzogen. Für die FFT und auch für den Ausgleich der Amplitude der jährlichen Schwingung werden die beiden Komponenten nicht mehr getrennt voneinander behandelt, sondern zu einer komplexen Schwingung  $\chi_1 + i \chi_2$  zusammengefasst und, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, mit Amplitude und Phase der prograden und der retrograden Komponente der Schwingung ausgedrückt. Da in der FFT keine zeitlichen Veränderungen verarbeitet werden, sind die abgebildeten Amplituden als Mittelwerte über das 21. Jahrhundert zu verstehen.

Das erstellte Frequenz- und Amplitudenspektrum, das in Abbildung 4.6 zu sehen ist, zeigt, dass die jährliche Schwingung der AAMs mit Abstand die am stärksten ausgeprägte ist. Im Spektrum sind auch halb- und dritteljährliche Schwingungen erkennbar, in retrograder Richtung auch noch vierteljährliche Perioden. Die jährliche Schwingung ist, wie in Abbildung 4.6 sichtbar ist, in prograder Richtung etwas stärker ausgeprägt, die halbjährliche Periode in retrograder Richtung. Die dritteljährliche Schwingung ist in beiden Richtungen etwa gleich stark ausgeprägt, die vierteljährliche Schwingung ist nur in retrograder Richtung sichtbar. Die Frequenzen sind für alle fünf betrachteten Klimaszenarien dieselben, die Amplituden steigen mit dem vermehrten Treibhausgasausstoß der Szenarien an und sind für SSP5-8.5 am höchsten, für SSP1-1.9 am niedrigsten.

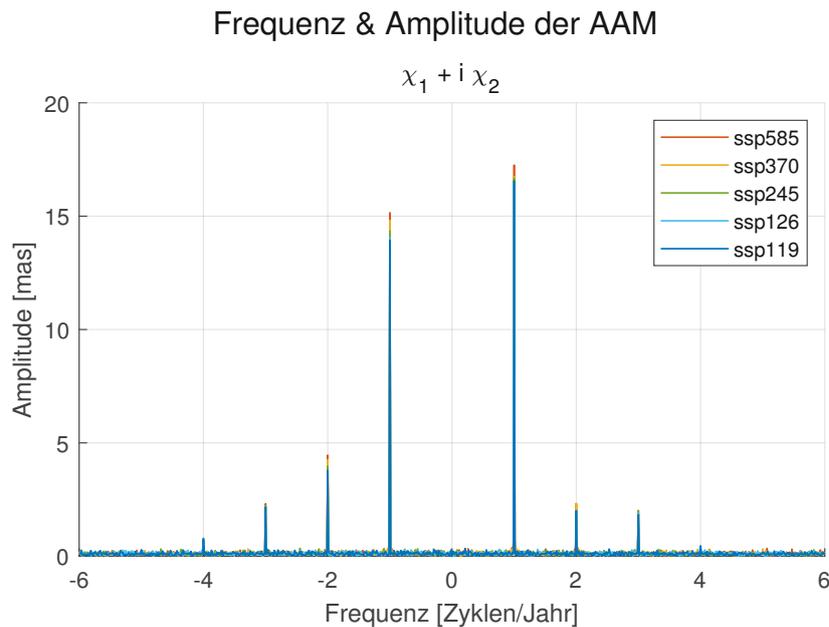


Abbildung 4.6: Frequenz- und Amplitudenspektrum der berechneten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen für die Multi-Model-Mean Ergebnisse aller fünf Klimaszenarien

#### 4.2.2. Multi-Model-Mean Vergleich der Szenarien

Dass die jährliche Schwingung den Hauptanteil der AAMs ausmacht, ist auch in der in Abbildung 4.7 gezeigten Zeitreihe über das 21. Jahrhundert der mittleren atmosphärischen Drehimpulsfunktionen für die beiden Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5 zu sehen. Beide Komponenten  $\chi_1$  und  $\chi_2$  des klimafreundlichsten (SSP1-1.9) und des treibhausgasreichsten (SSP5-8.5) Szenarios weisen eine sehr ausgeprägte jährliche Schwingung auf. In Abbildung 4.7, kann auch die Entwicklung der Amplituden über den gesamten betrachteten Zeitraum analysiert werden. Zu Beginn der Zeitreihe sind die Amplituden der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen in  $\chi_1$ - und  $\chi_2$ -Richtung für die Szenarien etwa gleich groß, ab ungefähr 2050 ist zu erkennen, dass die atmosphärische Anregung von Szenario SSP5-8.5 deutlich größer wird als die von Szenario SSP1-1.9. Um die Sichtbarkeit aller Kurven zu erhalten, aber trotzdem alle fünf Szenarien miteinander in einem Plot vergleichen zu können, ist in Abbildung 4.8 der Zeitabschnitt 2090–2100 mit den Multi-Model-Mean Kurven aller fünf Szenarien dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Szenarien SSP1-2.6, SSP2-4.5 und SSP3-7.0 zum größten Teil zwischen den Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5 verlaufen.

## 4 ERGEBNISSE

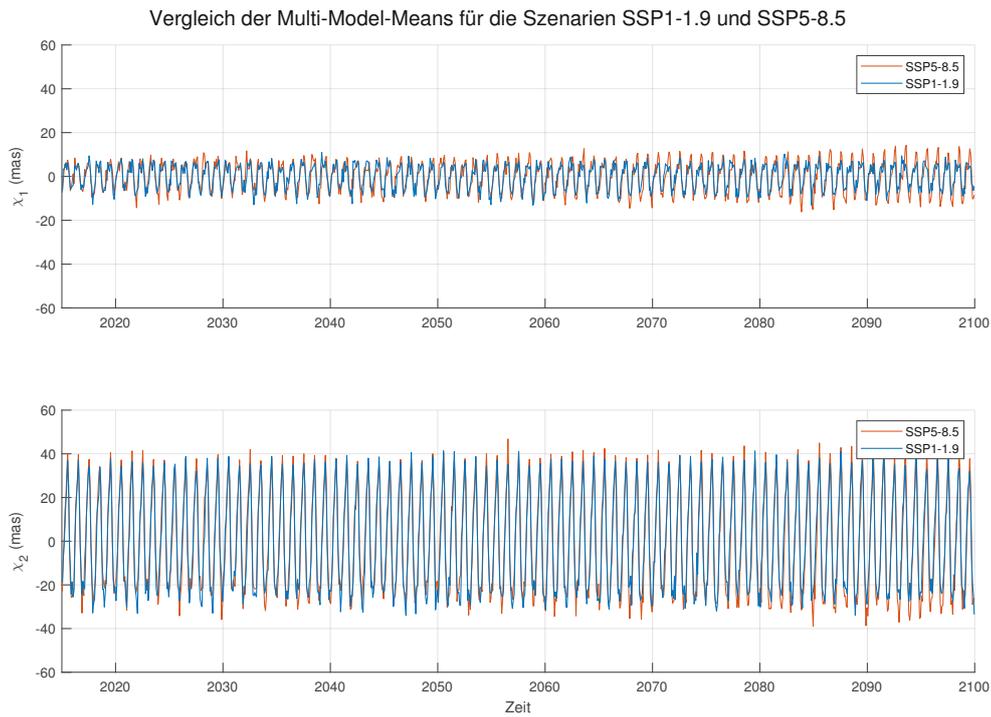


Abbildung 4.7: Atmosphärische Drehimpulsfunktionen über den gesamten Zeitraum 2015–2100, Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5

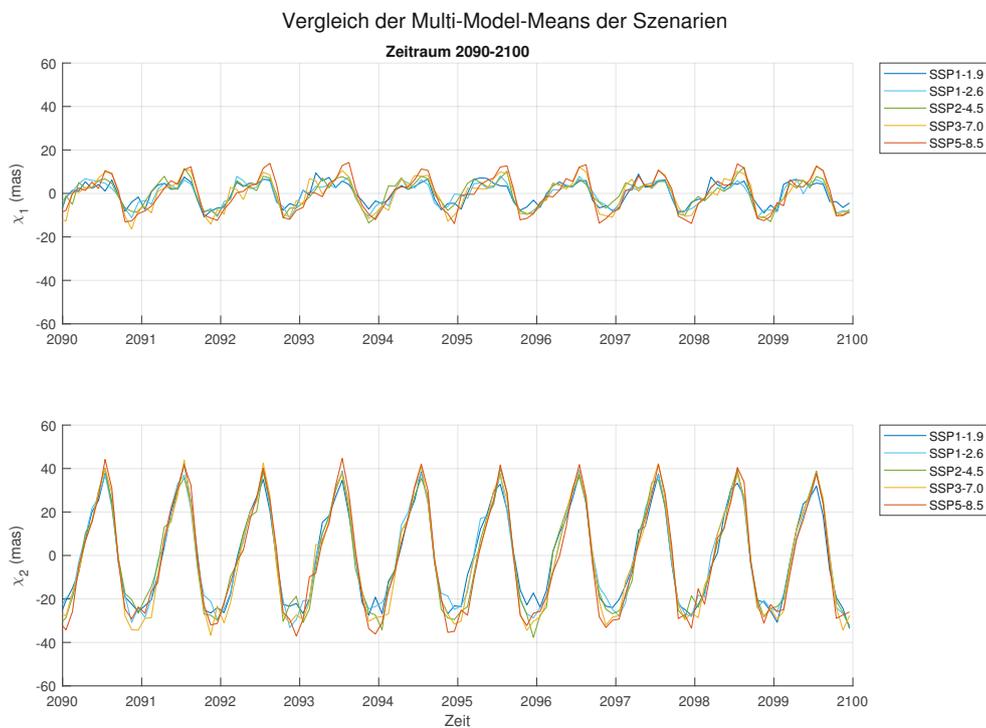


Abbildung 4.8: Multi-Model-Mean AAMs aller fünf Klimaszenarien für die Jahre 2090 bis 2100

	SSP1-1.9		SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
	$\chi_1$	$\chi_2$								
<b>SSP1-1.9</b>	1	1	0,85	0,98	0,86	0,98	0,84	0,98	0,84	0,97
<b>SSP1-2.6</b>			1	1	0,86	0,98	0,85	0,98	0,86	0,97
<b>SSP2-4.5</b>					1	1	0,86	0,98	0,87	0,98
<b>SSP3-7.0</b>							1	1	0,89	0,98
<b>SSP5-8.5</b>									1	1

Tabelle 4.3: Korrelationskoeffizienten zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen der fünf Szenarien untereinander

	SSP1-1.9		SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
	$\chi_1$	$\chi_2$								
<b>SSP1-1.9</b>	0	0	2,98	4,85	3,03	4,84	3,34	4,92	3,60	5,34
<b>SSP1-2.6</b>			0	0	3,00	4,86	3,19	5,00	3,41	5,31
<b>SSP2-4.5</b>					0	0	3,14	4,87	3,27	4,96
<b>SSP3-7.0</b>							0	0	3,03	4,89
<b>SSP5-8.5</b>									0	0

Tabelle 4.4: Root Mean Square Error zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen der fünf Szenarien untereinander, angegeben in Millibogensekunden (mas)

Um die MMM-AAM Ergebnisse analytisch miteinander zu vergleichen, werden Korrelationen und Root Means Square Error zwischen den Kurven der fünf Szenarien berechnet. Tabelle 4.3 gibt die Korrelationskoeffizienten über den gesamten untersuchten Zeitraum für alle Szenarien jeweils untereinander an, Tabelle 4.4 die RMSE Werte der Multi-Model-Means untereinander. Sowohl in  $\chi_1$ - als auch in  $\chi_2$ -Richtung sind die Korrelationen zwischen den Multi-Model-Means der fünf Szenarien sehr hoch, vor allem die  $\chi_2$ -Komponente hat beinahe eine Korrelation von eins, in Richtung  $\chi_1$  sind die Koeffizienten deutlich niedriger, fallen aber trotzdem in den Bereich von hoher Korrelation. Zwischen jeweils zwei Multi-Model-Means der Szenarien unterscheiden sich die Korrelationskoeffizienten kaum, die Ergebnisse der Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5 korrelieren also annähernd genauso stark wie die sozioökonomisch näher beieinanderliegenden Szenarien SSP1-1.9 und SSP1-2.6. Betrachtet man die RMSE Werte jeweils zwischen zwei Klimaszenarien, sind wieder die RMSE in Richtung  $\chi_1$  niedriger als die der Komponente  $\chi_2$ , wobei der Unterschied aber gering ausfällt. Bei den RMSE Werten ist sichtbar, dass die Fehler größer werden, je weiter die Klimaszenarien sozioökonomisch auseinander liegen, die Steigerung ist sichtbar, aber dennoch gering ausgeprägt.

#### 4.2.3. Säkulare Trends

Für die atmosphärischen Drehimpulsfunktionen werden auch die linearen Trends der Zeitserien ausgewertet, diese sind in Abbildung 4.9 zusammen mit der atmosphärischen Anregung des Szenarios SSP2-4.5 zu sehen. Die Trendgeraden aller fünf Szenarien liegen sehr nahe beieinander, in der Abbildung wirkt es sogar so, als würden sich alle Linien in einem Punkt schneiden, das ist aber bei der näheren Betrachtung des Zeitabschnitts um 2055 nicht der Fall.

In Tabelle 4.5 sind die Steigungs- und Abszissenwerte der fünf Trendgeraden gegeben. Alle Steigungswerte bis auf den der  $\chi_1$ -Komponente des Szenarios SSP1-1.9, der Null ergibt, sind negativ, allerdings sehr flach und weisen untereinander kaum Unterschiede auf, die stärkste Steigung besitzt sowohl in Richtung  $\chi_1$  als auch  $\chi_2$  Szenario SSP5-8.5, die schwächste Steigung weist Szenario SSP1-1.9 auf. Generell sind die Steigungen der Trendgeraden für die  $\chi_2$ -Komponente der atmosphärischen Anregung stärker ausgeprägt als für  $\chi_1$ . Diese niedrigen Steigungswerte der linearen Trends zeigen, dass es über das 21. Jahrhundert keine signifikante säkulare Poldrift gibt, die von der Atmosphäre angeregt wird.

	Steigung		Ordinatenschnitt	
	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_1$	$\chi_2$
<b>SSP1-1.9</b>	0,00	-0,01	2,68	16,38
<b>SSP1-2.6</b>	-0,01	-0,02	16,79	33,39
<b>SSP2-4.5</b>	-0,01	-0,03	11,35	54,67
<b>SSP3-7.0</b>	-0,01	-0,05	12,77	101,53
<b>SSP5-8.5</b>	-0,01	-0,05	26,88	101,07

Tabelle 4.5: Steigung und Ordinatenabschnitt der linearen Trends der Zeitserien pro Szenario, angegeben in Millibogensekunden (mas)

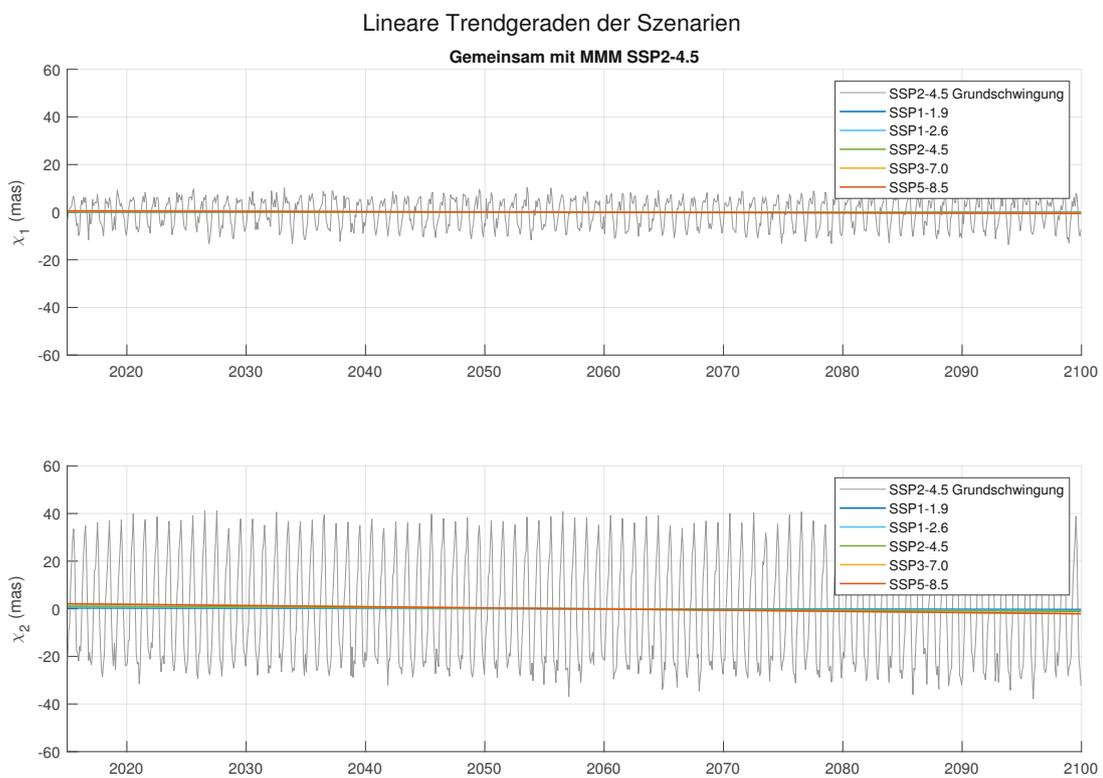


Abbildung 4.9: Lineare Trends der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen für die Klimaszenarien, im Hintergrund ist zur Veranschaulichung die Multi-Model-Mean Schwingung für SSP2-4.5 mitgeplottet

	$\chi_1$	$\chi_2$
<b>SSP1-1.9</b>	0,87	0,98
<b>SSP1-2.6</b>	0,84	0,98
<b>SSP2-4.5</b>	0,84	0,98
<b>SSP3-7.0</b>	0,80	0,98
<b>SSP5-8.5</b>	0,82	0,97

Tabelle 4.6: Korrelationskoeffizienten zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen zwischen den ersten und letzten 10 Jahren des untersuchten Zeitraums 2015–2100 für jedes Szenario

#### 4.2.4. Entwicklung der AAMs über das 21. Jahrhundert und Ausgleich der Amplitude der jährlichen Schwingung der Szenarien

Vergleicht man Abbildung 4.8 mit Abbildung 4.16, die die MMM AAMs für die Jahre 2015–2023 (im Vergleich mit den GFZ Referenzdaten) angibt, ist zu erkennen, dass sich die Szenarien in den letzten 10 Jahren des 21. Jahrhunderts untereinander stärker unterscheiden als in den frühen Jahren des 21. Jahrhunderts. Korrelationskoeffizienten und Root Mean Square Error zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen für die ersten und letzten 10 Jahre des untersuchten Zeitraums (2015–2025 und 2090–2100) sind in den beiden Tabellen 4.6 und 4.7 zu finden. Die Korrelation zwischen den ersten und den letzten jeweils zehn Jahren des untersuchten Zeitraums ist für beide Komponenten sehr hoch, für  $\chi_2$  sogar annähernd eins. Die niedrigsten Korrelationswerte, also die größten Veränderungen weisen die Szenarien SSP3-7.0 und SSP5-8.5 auf. Auch die RMSE Werte zwischen den Ergebnissen sind sehr gering, die mit etwas Abstand höchsten RMSE Werte weisen ebenfalls die Szenarien SSP3-7.0 und SSP5-8.5 auf. Die niedrigsten RMSE Werte weisen die Szenarien SSP1-1.9 und SSP2-4.5 auf, die höchste Korrelation in Richtung  $\chi_1$  zeigt ebenfalls Szenario SSP1-1.9, die Korrelationskoeffizienten in  $\chi_2$ -Richtung unterscheiden sich kaum und sind für alle fünf Szenarien sehr hoch.

Als letzter Punkt des Vergleichs der fünf Klimaszenarien wird die Entwicklung der Amplitude der AAMs über das 21. Jahrhundert ausgewertet. Um die Amplitude der jährlichen Schwingung ausgleichen zu können, wird die Schwingung der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen wie bereits erwähnt zu einer komplexen Schwingung umgeschrieben. In den folgenden Abbildungen sind also nicht die

	$\chi_1$	$\chi_2$
<b>SSP1-1.9</b>	2,61	4,8
<b>SSP1-2.6</b>	3,06	4,21
<b>SSP2-4.5</b>	3,32	5,11
<b>SSP3-7.0</b>	4,45	6,73
<b>SSP5-8.5</b>	4,62	7,49

Tabelle 4.7: Root Mean Square Error zwischen den Multi-Model-Mean Ergebnissen zwischen den ersten und letzten 10 Jahren des untersuchten Zeitraums 2015–2100 für jedes Szenario, angegeben in Millibogensekunden (mas)

beiden Komponenten  $\chi_1$  und  $\chi_2$  zu sehen, sondern der prograde und retrograde Anteil der gesamten komplexen Schwingung.

Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse des Ausgleichs der Amplitude der jährlichen Schwingung der atmosphärischen Anregung der Polbewegung für jedes der ausgewerteten fünf Klimaszenarien. Wie in Kapitel 3.2.2 erklärt, wird jeweils die Amplitude über ein Zeitfenster von fünf Jahren mit der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen, das Zeitfenster wird jeweils um 2 Jahre verschoben, somit sind eine Zeitreihe der ausgeglichenen Amplituden mit 41 Werten das Ergebnis, das hier geplottet ist. Bei der Analyse von Abbildung 4.10 fällt auf, dass die Absolutwerte der Amplituden in prograder Richtung generell größer sind als die in retrograder Richtung, wie auch in Abbildung 4.6 zu sehen ist. Die prograde Amplitude steigt für alle fünf Szenarien leicht an, am stärksten für SSP5-8.5, am geringsten für SSP1-1.9, die anderen Szenarien reihen sich geordnet dazwischen ein. In retrograder Richtung ist die Entwicklung der Amplituden deutlich unterschiedlicher. Für Szenario SSP1-1.9 stagniert die Amplitude, SSP1-2.6 liefert ein sehr ähnliches Bild mit leicht zunehmender Amplitude. SSP2-4.5 weist eine moderate Steigerung der Amplitudengröße auf, SSP3-7.0 und SSP5-8.5 eine starke Zunahme, die ab etwa 2050 auch nochmals zunimmt.

Die Entwicklung der Amplitude der AAMs wird auch für Druck- und Windterm getrennt voneinander vorgenommen, die Ergebnisse dafür sind in Abschnitt 4.3.2 beschrieben.

## 4 ERGEBNISSE

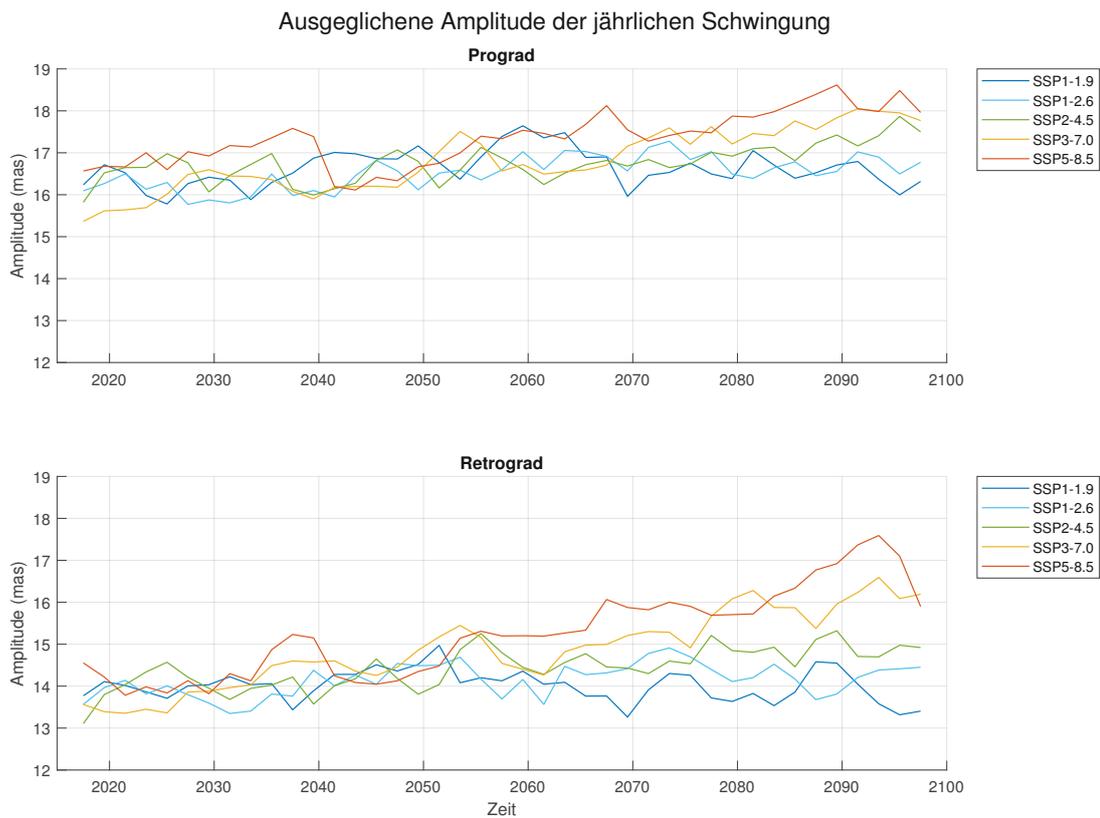


Abbildung 4.10: Multi-Model-Mean der ausgeglichenen Amplituden der jährlichen Schwingung für jedes Klimaszenario

Die Veränderung der Amplitude der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen über die Zeit kann auch als Wavelet Skalogramm, ebenfalls in prograden und retrograden Anteil der Schwingung aufgespalten, dargestellt werden, wie die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen. Abbildung 4.11 beschreibt dies für Szenario SSP1-1.9, Abbildung 4.12 für SSP5-8.5, die markant gelb gefärbten Bereiche in den Skalogrammen zeigen die Anteile der Schwingung der atmosphärischen Anregung mit jährlicher Periode, darüber in schwächerer Ausprägung sind in den Skalogrammen auch die halb-, drittel- und vierteljährlichen Anteile der Schwingungen zu sehen. Die Wavelet Skalogramme liefern dieselben Ergebnisse wie die Abbildungen 4.6 und 4.10. Die Amplitude der prograden Schwingung zeigt sowohl für Szenario SSP1-1.9 als auch für SSP5-8.5 sehr wenig Veränderung über die Zeit, nur für SSP5-8.5 ist eine leichte Vergrößerung sichtbar. Die retrograde Amplitude weist für Szenario SSP1-1.9 ebenfalls kaum Veränderung über die Zeit auf, für SSP5-8.5 ist der Anstieg der retrograden Amplitude sehr deutlich sichtbar. Für die Schwingungen mit kürzeren Perioden sind für Szenario SSP1-1.9 kaum Veränderungen feststellbar, für Szenario SSP5-8.5 kann im Skalogramm sowohl in prograder als auch in

retrograder Richtung ein leichter Anstieg der halbjährlich-periodischen Amplituden festgestellt werden. Die Wavelet Skalogramme für die Szenarien SSP1-2.6, SSP2-4.5 und SSP3-7.0 sind in Anhang A.2 zu finden.

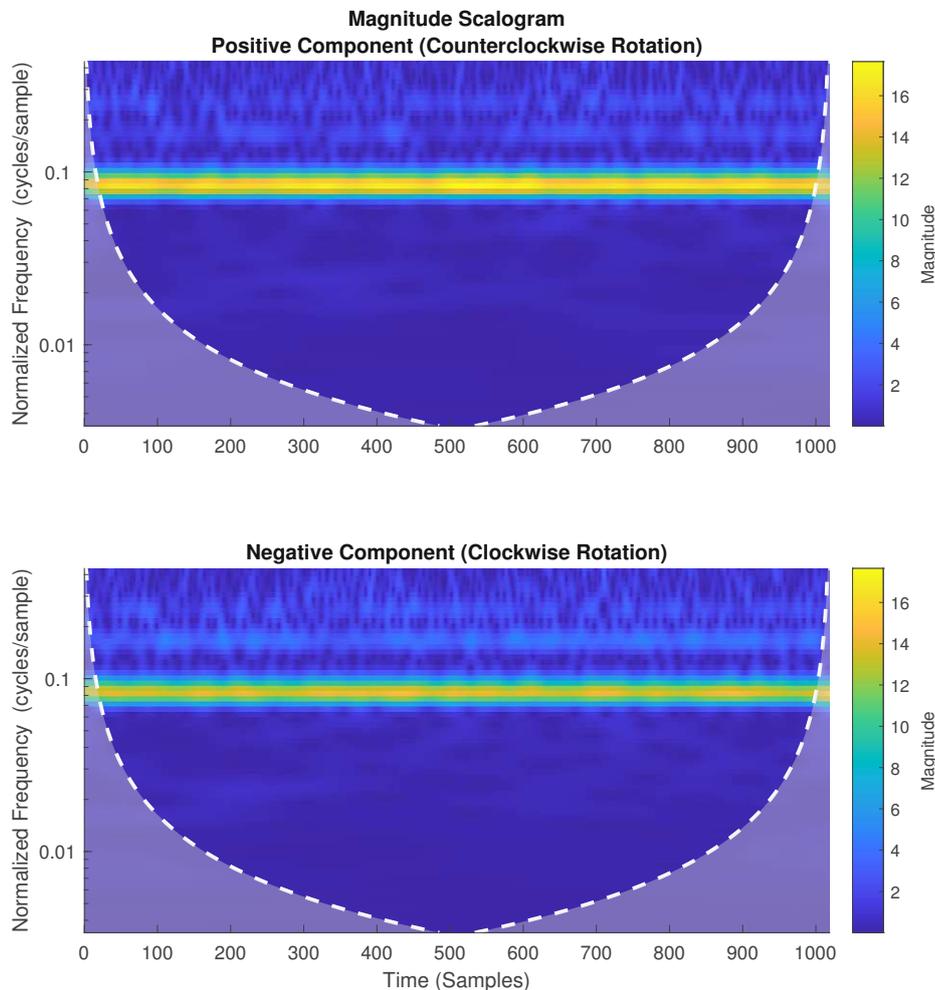


Abbildung 4.11: Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP1-1.9, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung;

Die oben dargestellten Amplituden mit Schwingungsrichtung gegen den Uhrzeigersinn (counterclockwise rotation) entsprechen der prograden Schwingungsrichtung, die Amplituden mit Schwingungsrichtung im Uhrzeigersinn (clockwise rotation) entsprechen dem retrograden Anteil der Anregungsschwingung.

Die y-Achse der Plots ist so zu lesen, dass die Frequenz in Zyklen pro Abtastung gegeben ist, da es sich um monatliche Daten handelt, hat die jährliche Schwingung also eine Frequenz von  $\frac{1}{12}$ , was gerundet 0,08 entspricht, die Magnitude zeigt die Amplitudengröße in Millibogensekunden (mas)

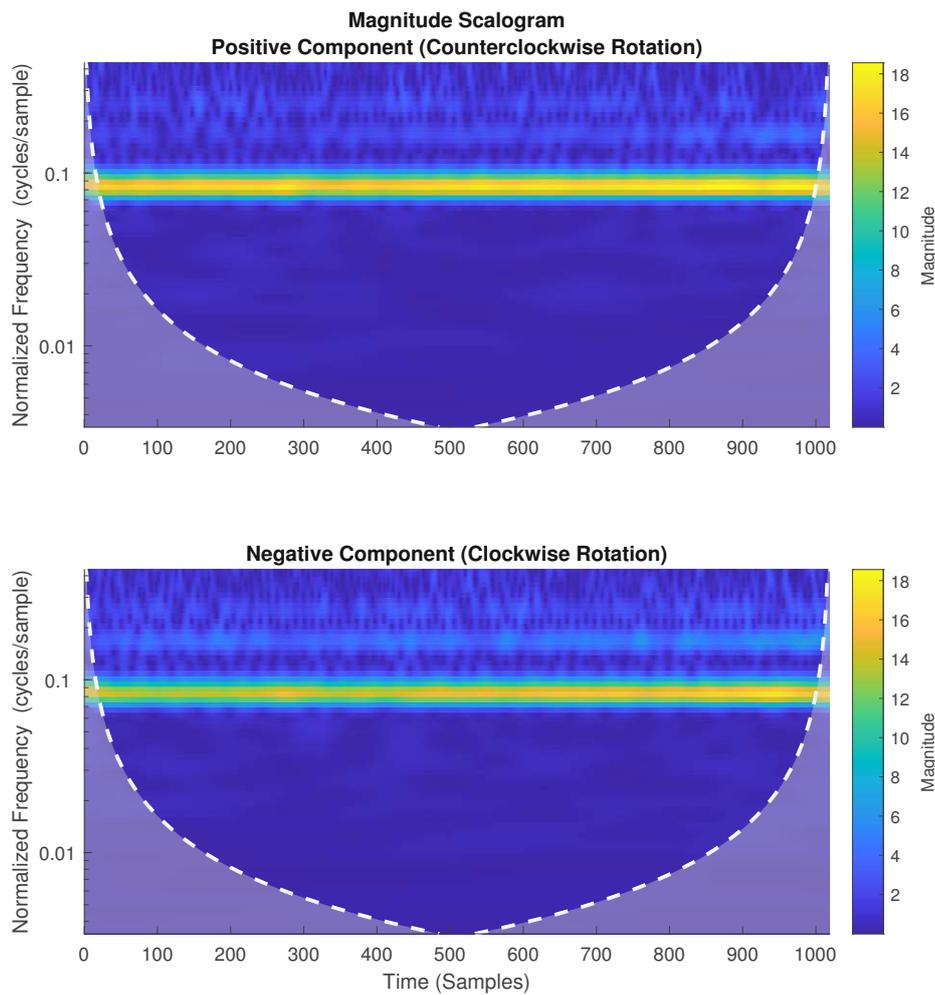


Abbildung 4.12: Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP5-8.5, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung; für die detaillierte Beschreibung der Achsen siehe Abbildung 4.11.

### 4.3. Vergleich von Druck- und Windterm

Bisher wurde für die Analysen immer der Gesamtterm der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen herangezogen. Im folgenden Abschnitt soll näher auf die Unterschiede der beiden Anteile, aus denen sich der Gesamtterm zusammensetzt, Wind- und Druckterm, eingegangen werden.

### 4.3.1. Multi-Model-Mean Vergleich von Druck- und Windterm getrennt

In den Abbildungen 4.13 und 4.14 sind die Komponenten der atmosphärischen Anregung weiters in Wind- und Druckterm aufgespalten. Zum Vergleich sind die Multi-Model-Means des Gesamtterms jedes Szenarios in Abbildung 4.8 zu sehen. Die Druckkomponente in Richtung  $\chi_1$  weist eine Amplitude von etwa 15 mas auf, in Richtung  $\chi_2$  etwa 40 mas. Der Windterm zeigt in Richtung  $\chi_1$  eine Amplitude von etwa 10 mas, in Richtung  $\chi_2$  etwa 5 mas. Sowohl Druckterm als auch Windterm weisen eine sehr ausgeprägte jährliche Periode der Schwingung auf, die beim Windterm in  $\chi_2$ -Richtung allerdings nur sehr schwach ausgeprägt ist. Beim Druckterm trifft wie bei der Gesamtschwingung zu, dass die Amplitude in  $\chi_2$ -Richtung größer ist als in Richtung  $\chi_1$ . Beim Windterm zeigt sich ein umgekehrtes Bild, dieser ist in Richtung  $\chi_1$  stärker ausgeprägt als in Richtung  $\chi_2$ .

In Richtung  $\chi_1$  sind Druckterm und Windterm etwa um  $180^\circ$  phasenverschoben, sodass der Druckterm durch den Windterm etwas abgeschwächt wird und der Gesamtterm damit eine kleinere Amplitude hat als der Druckterm alleine. Betrachtet man das für  $\chi_2$ , ist ersichtlich, dass die beiden Komponenten in etwa phasengleich verlaufen und die Amplitude des Gesamtterms leicht ansteigt im Vergleich zum Druckterm.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass für beide Richtungen  $\chi_1$  und  $\chi_2$  der Druckterm die ausschlaggebende Komponente ist und der Windterm nur eine untergeordnete, wenn auch nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Wie in Kapitel 4.4 noch weiter ausgeführt ist, wird der Windterm aufgrund seiner Unregelmäßigkeiten eher untermodelliert, die tatsächlichen Werte der atmosphärischen Anregungsfunktionen sind also wahrscheinlich in Richtung  $\chi_1$  etwas niedriger als die modellierten, in Richtung  $\chi_2$  etwas größer.

## 4 ERGEBNISSE

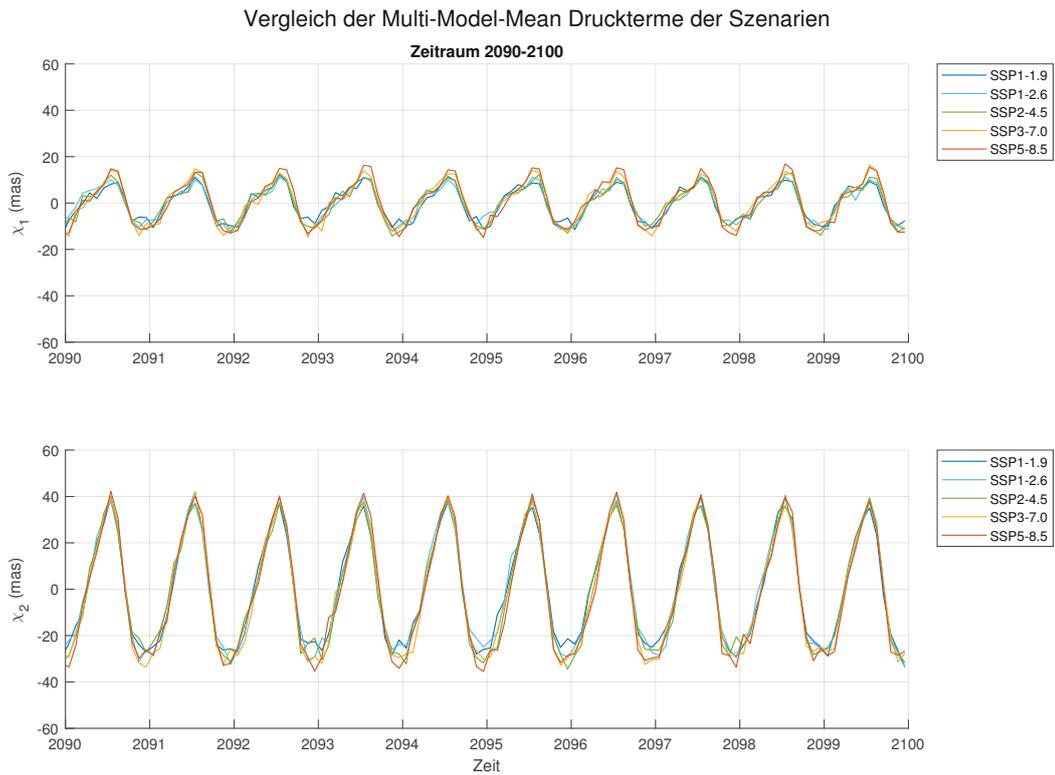


Abbildung 4.13: Druckterm für die letzten 10 Jahre Multi-Model-Mean

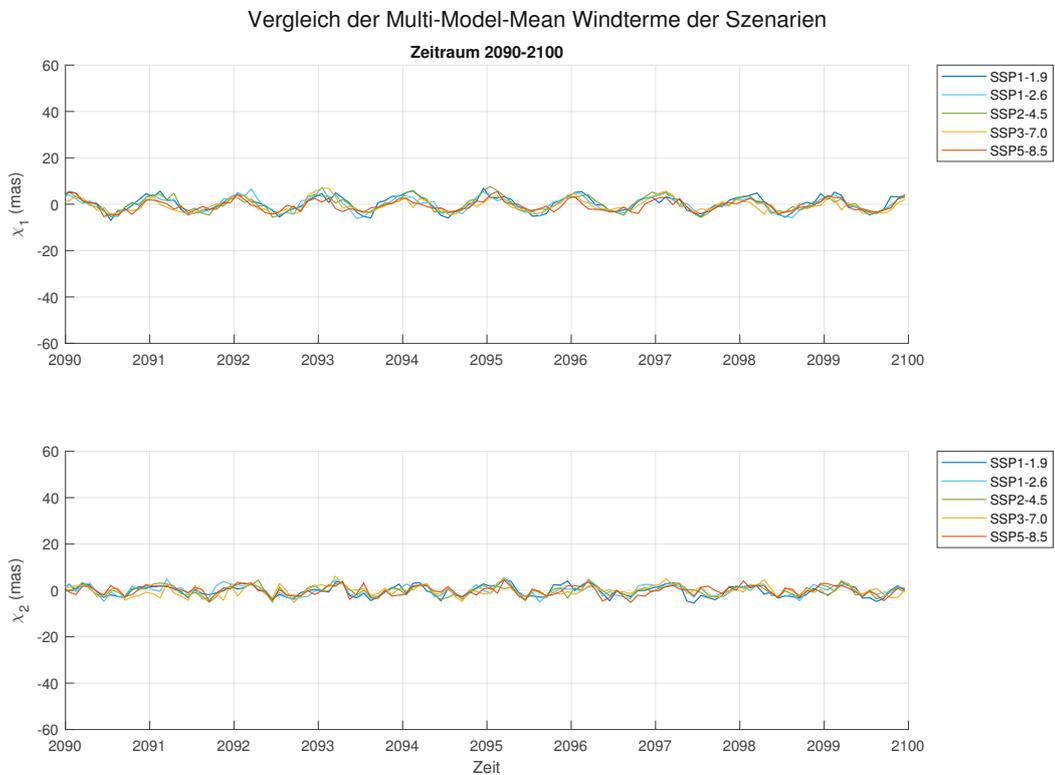


Abbildung 4.14: Windterm für die letzten 10 Jahre Multi-Model-Mean

### 4.3.2. Ausgleich der jährlichen Amplitude von Druck- und Windterm getrennt

Zuletzt soll die Veränderung der Amplitude der jährlichen Schwingung der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen auch für Druck- und Windterm getrennt voneinander untersucht werden. Die entsprechenden ausgeglichenen Amplitudenwerte für jedes der fünf Klimaszenarien sind wieder aufgespalten in prograden und retrograden Anteil in Abbildung 4.15 gegeben. Die Druckkomponente, die eine wesentlich größere Amplitude hat als die Windkomponente, verhält sich sowohl im prograden als auch im retrograden Anteil der Schwingung der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen sehr ähnlich wie die in Abbildung 4.10 gezeigten Multi-Model-Mean Gesamtterme. Bemerkenswert ist trotz des wesentlich geringeren Einflusses auf den Gesamtterm die Entwicklung der Windkomponente. Im prograden Anteil der Schwingung verändern sich die Amplituden der Szenarien SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5 und SSP3-7.0 kaum, die Amplitude für Szenario SSP5-8.5 fällt als einzige leicht. In retrograder Richtung bleibt die Amplitude für Szenario SSP1-1.9 über den gesamten Untersuchungszeitraum etwa gleich, für die Szenarien SSP1-2.6 und SSP2-4.5 fällt sie leicht, für SSP3-7.0 und SSP5-8.5 nimmt die Amplitude ab etwa 2050 deutlich ab.

## 4 ERGEBNISSE

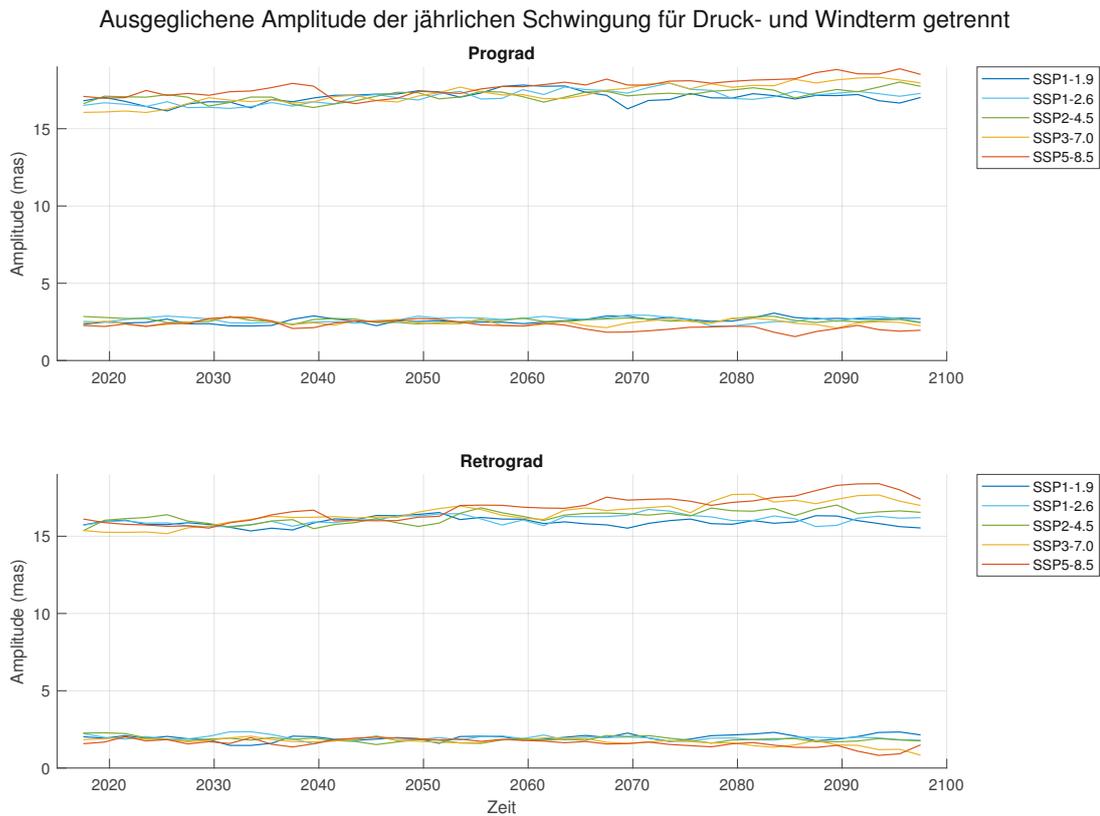


Abbildung 4.15: Multi-Model-Mean der ausgeglichenen Amplituden der jährlichen Schwingung für jedes Klimaszenario, Druck- und Windterm getrennt;

Die ausgeglichenen Amplituden des Druckterms sind jeweils die oberen fünf Kurven, die Amplituden des Windterms sind wesentlich kleiner. Zu beachten ist, dass die Skalierung der y-Achse sich von der Abbildung 4.10 unterscheidet und aufgrund des Windterms einen größeren Bereich abdeckt.

### 4.4. Vergleich der Ergebnisse mit GFZ Referenzdaten

Für den Beginn des untersuchten Zeitraums zwischen 2015 und 2023 werden die berechneten Werte der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen mit Referenzdaten des GFZ verglichen. Die Referenzdaten basieren, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, auf dreistündlichen ECMWF Daten. Um die Referenzdaten mit den berechneten Daten für die atmosphärischen Drehimpulsfunktionen vergleichbar zu machen, werden die GFZ Daten jeweils zu monatlichen Daten aufsummiert und gemittelt. Die Mittelung führt zu einer Glättung der ursprünglichen Referenzdaten. Zwischen den GFZ Daten und den berechneten Zeitreihen werden sowohl Root Mean Square Error als auch Korrelationskoeffizienten berechnet.

#### 4.4.1. Vergleich der Multi-Model-Means pro Szenario mit den Referenzdaten

Abbildung 4.16 zeigt die gemittelten Werte der elf Modelle für jedes der fünf Klimaszenarien verglichen mit den GFZ Referenzdaten,  $\chi_1$  und  $\chi_2$  werden getrennt voneinander abgebildet.

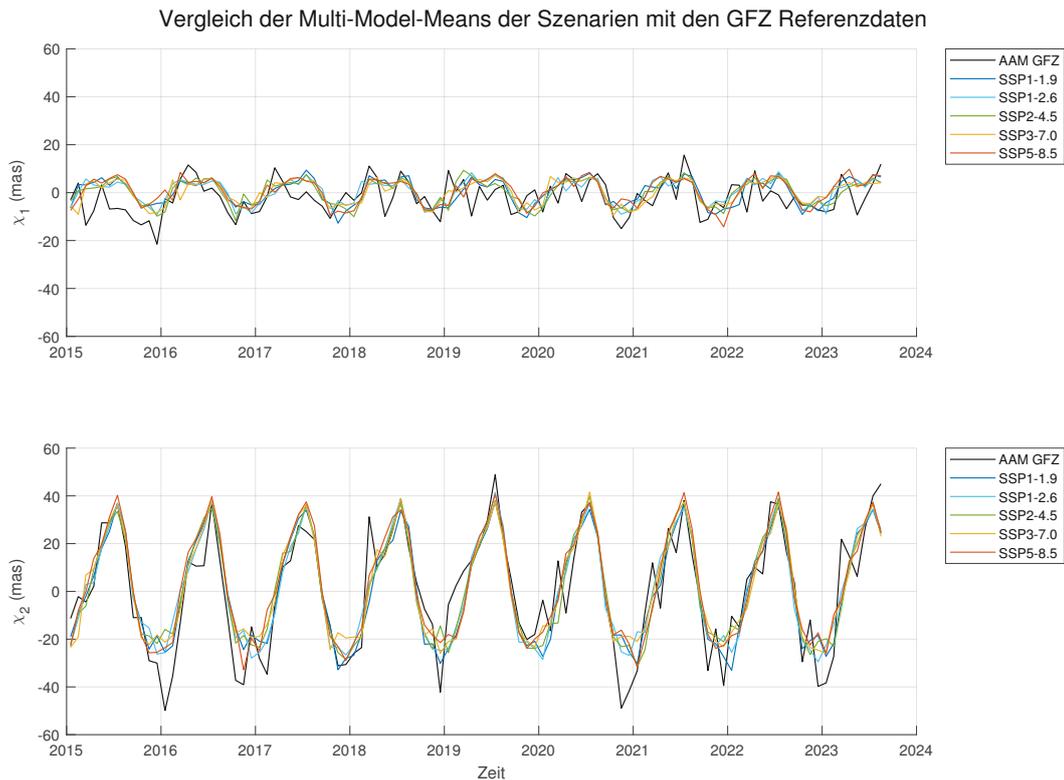


Abbildung 4.16: Vergleich der GFZ Referenzdaten mit dem Multi-Model-Mean für jedes Szenario

Trotz der Mittelung der dreistündlichen Daten zu monatlichen Mittelwerten der GFZ Daten zeigen die Multi-Model-Means für jedes der 5 Szenarien eine geglättete Zeitreihe. Die MMM der fünf Szenarien unterscheiden sich im Plot 4.16 nicht wesentlich voneinander, was aufgrund der Kürze der Zeitreihe und der Tatsache, dass sich zum Beginn des Zeitraums zwischen 2015 und 2100 die Szenarien auch noch nicht wesentlich voneinander unterscheiden, zu erwarten ist. Zieht man beispielsweise die Temperaturprognosen der fünf Klimaszenarien heran, so beginnen die Prognosen ab etwa 2040 deutlich auseinanderzudriften (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023a). Um die Unterschiede zwischen den Datenreihen systematisch zu analysieren, zeigen Tabellen 4.8 und 4.9 die Korrelationskoeffizienten und Root Mean Square Error (RMSE) zwischen den MMM-Datenreihen der

GFZ &	$\chi_1$ (mas)	$\chi_2$ (mas)
SSP1-1.9	0,46	0,89
SSP1-2.6	0,47	0,89
SSP2-4.5	0,53	0,88
SSP3-7.0	0,48	0,88
SSP5-8.5	0,42	0,89

Tabelle 4.8: Korrelationskoeffizienten zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi Model Mean Werten jedes Szenarios

GFZ &	$\chi_1$ (mas)	$\chi_2$ (mas)
SSP1-1.9	6,96	11,04
SSP1-2.6	6,89	11,29
SSP2-4.5	6,56	11,82
SSP3-7.0	6,77	11,94
SSP5-8.5	7,35	11,52

Tabelle 4.9: Root Mean Square Error in Millibogensekunden (mas) zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi Model Mean Werten jedes Szenarios

fünf Klimaszenarien und den GFZ Referenzdaten für die atmosphärische Anregung der Polbewegung.

Bei der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten zwischen den Referenzdaten und der gemittelten atmosphärischen Anregung für jedes Szenario fällt auf, dass die Korrelation für  $\chi_2$  deutlich höher ist als die der  $\chi_1$ -Werte. Das liegt daran, dass der atmosphärische Drehimpuls vor allem in  $\chi_2$ -Richtung stark vom Druckterm dominiert ist, der wiederum einer sehr regelmäßigen jährlichen Schwankung unterliegt.

Im Unterschied zur höheren Korrelation der  $\chi_2$ -Werte mit den Referenzdaten ist der RMSE zwischen GFZ und berechneten Daten aber für  $\chi_2$  höher als für  $\chi_1$ . Die MMM-Werte für  $\chi_2$  aller fünf Szenarien weisen außer der jährlichen Schwingung kaum Variationen auf, die GFZ Referenzdaten allerdings schon. Es wird also vermutet, dass der höhere RMSE aufgrund dieser intrasaisonalen Schwankungen für  $\chi_2$  größer ausfällt als für  $\chi_1$ , wo die intrasaisonalen Schwankungen auch für die Zeitreihen der MMM-Werte ausgeprägter sind.

Weiters wird evaluiert, welches der Szenarien am besten mit den Referenzdaten übereinstimmt. Sowohl visuell als auch in den Zahlen der Korrelationen und RMSE unterscheiden sich die Datenreihen der Szenarien zwischen 2015 und 2023 sehr wenig. Zieht man die Werte der Korrelationskoeffizienten heran, so passt in  $\chi_1$ -Richtung Szenario SSP2-4.5 am besten, in  $\chi_2$ -Richtung SSP1-1.9. Der RMSE zwischen Referenzdaten und MMM für  $\chi_1$  ist für Szenario SSP2-4.5 am niedrigsten, für  $\chi_2$  für Szenario SSP1-1.9, was für die höchste Übereinstimmung dieser Datenreihen steht. Für SSP5-8.5 in  $\chi_1$ -Richtung und SSP3-7.0 in  $\chi_2$ -Richtung sind die RMSE am höchsten. Die niedrigste Korrelation weist in  $\chi_1$ -Richtung SSP5-8.5 auf, in  $\chi_2$ -Richtung SSP2-4.5 und SSP3-7.0. Zu beachten ist, dass aber generell die Unterschiede zwischen den Szenarien für den betrachteten Zeitraum nicht besonders groß sind, da zwischen 2015 und 2023 alle Klimaentwicklungen noch nahe beieinander verlaufen.

#### 4.4.2. Vergleich der einzelnen Modell Outputs des Szenarios SSP2-4.5 mit den Referenzdaten

Ein weiterer Punkt des Vergleichs der berechneten Ergebnisse mit den Referenzdaten ist, die Outputs der einzelnen Modelle für ein Szenario mit den GFZ Daten zu vergleichen und so herauszufinden, welche der Klimamodelle am besten zum momentanen Ist-Zustand der atmosphärischen Anregung passen beziehungsweise zu analysieren, welche der Modelle durch Über- oder Untertreibungen hervorstechen. Da sich, wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben, für Klimaszenario SSP2-4.5 die Gesellschaftsentwicklung und damit die Entwicklung des Treibhausgasausstoßes in ähnlichem Muster wie bisher fortsetzt, wird für den Vergleich des Outputs der einzelnen Modelle mit den GFZ Vergleichsdaten dieses Szenario herangezogen. Alle fünf Szenarien liefern ein sehr ähnliches Bild. Abbildung 4.17 zeigt für  $\chi_1$  und  $\chi_2$  die atmosphärischen Drehimpulsfunktionen für jedes der elf Klimamodelle und Klimaszenario SSP2-4.5 "Middle of the Road" verglichen mit den GFZ Referenzdaten. Die Outputs der unterschiedlichen Modelle verglichen mit dem Multi-Model-Mean für jedes Klimaszenario werden weiter unten in Abschnitt 4.1 behandelt. Die Tabellen 4.10 und 4.11 zeigen wieder die Korrelationskoeffizienten und Root Mean Square Error zwischen dem Output der elf Klimamodelle verglichen mit den GFZ Referenzdaten, die Ergebnisse sind wiederum für  $\chi_1$  und  $\chi_2$  getrennt aufgeschlüsselt.

## 4 ERGEBNISSE

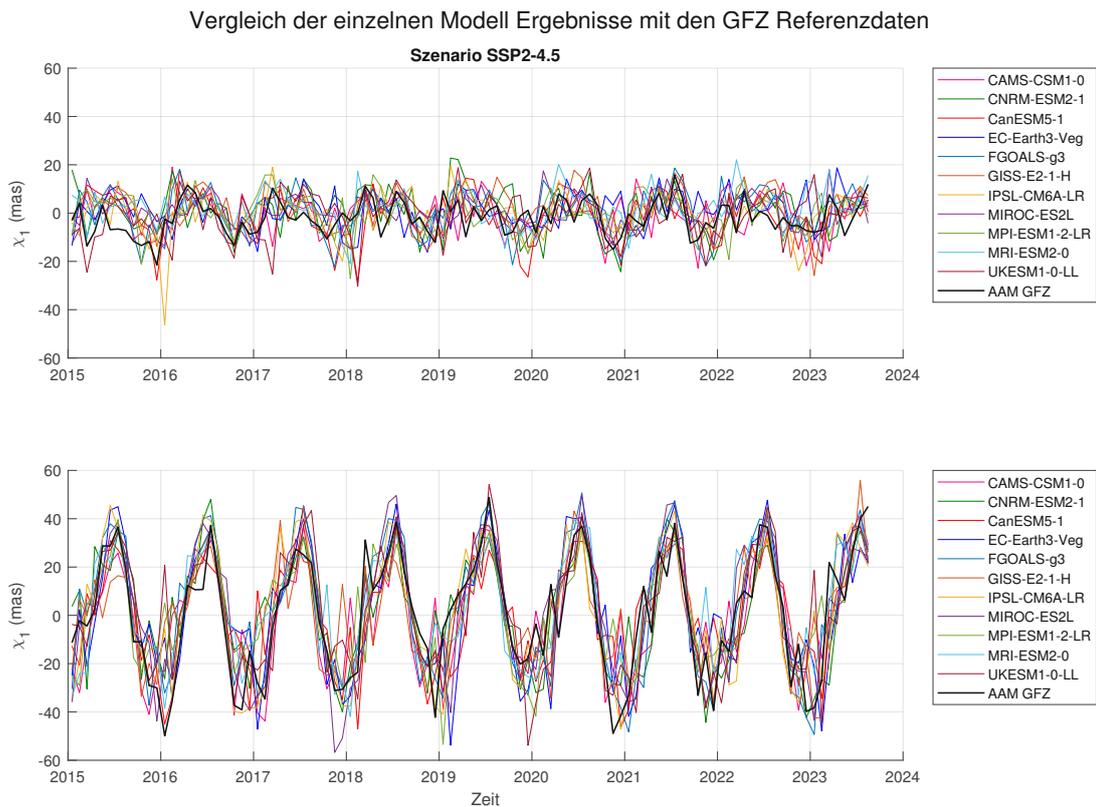


Abbildung 4.17: Vergleich der GFZ Referenzdaten mit dem Output der elf Klimamodelle für SSP2-4.5

Betrachtet man die höchsten Korrelationswerte mit den Referenzdaten für  $\chi_1$ , kommt man zu den Modellen CanESM5-1, GISS-E2-1-H und FGOALS-g3. Für  $\chi_2$  weisen IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L und FGOALS-g3 die höchsten Korrelationen auf. Analysiert man die RMSE Werte, ergeben sich mit den Modellen GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L und FGOALS-g3 für  $\chi_1$  die niedrigsten Werte und damit die beste Übereinstimmung. Für  $\chi_2$  haben die Modelle FGOALS-g3, MIROC-ES2L und IPSL-CM6A-LR die niedrigsten RMSE Werte verglichen mit den GFZ Daten.

Umgekehrt weisen für  $\chi_1$  die Modelle CAMS-CSM1-0, EC-Earth3-Veg und MPI-ESM1-2-LR die niedrigste Korrelation auf, für  $\chi_2$  die Modelle MPI-ESM1-2-LR, EC-Earth3-Veg, GISS-E2-1-H und UKESM1-0-LL. Für die RMSE Werte ergibt sich das folgende Bild: für  $\chi_1$  sind die Unterschiede zu den Referenzdaten für die Modelle CNRM-ESM2-1, UKESM1-0-LL und IPSL-CM6A-LR am größten, für  $\chi_2$  die Modelle EC-Earth3-Veg, MPI-ESM1-2-LR und UKESM1-0-LL. Dennoch soll erwähnt werden, dass die Übereinstimmung mit den Referenzdaten auch bei den Ergebnissen dieser Modelle relativ gut ist, die Zahlenwerte der Korrelationskoeffizienten und RMSE unterscheiden sich im Bereich  $10^{-2}$  bzw.  $10^1$ .

GFZ & SSP2-4.5 Model	$\chi_1$	$\chi_2$
CAMS-CSM1-0	0,21	0,78
CNRM-ESM2-1	0,26	0,76
CanESM5-1	0,42	0,77
EC-Earth3-Veg	0,22	0,75
FGOALS-g3	0,52	0,87
GISS-E2-1-H	0,45	0,75
IPSL-CM6A-LR	0,26	0,83
MIROC-ES2L	0,26	0,84
MPI-ESM1-2-LR	0,24	0,71
MRI-ESM2-0	0,29	0,80
UKESM1-0-LL	0,30	0,75

Tabelle 4.10: Korrelationskoeffizienten zwischen GFZ Vergleichsdaten und allen Modellwerten von SSP2-4.5

Wie beim Vergleich der Multi-Model-Mean Werte mit den GFZ Referenzdaten ist auch beim Vergleich der Outputs der unterschiedlichen Modelle sichtbar, dass die Werte in  $\chi_2$  Richtung besser zu den Referenzdaten passen als die in  $\chi_1$ -Richtung.

In Abbildung 4.17 ist außerdem ersichtlich, dass es im Vergleich zur Kurve der GFZ Referenzdaten sowohl nach oben als auch nach unten Ausschläge in den Ergebnissen der einzelnen Modelle gibt. Die Mittelbildung über alle Modelle für jedes der Klimaszenarien erweist sich also als sinnvoll, um eine möglichst wahrscheinliche Prognose der atmosphärischen Anregung der Polbewegung zu liefern.

#### 4.4.3. Vergleich der ausgeglichenen Amplitude der jährlichen Schwingung der Referenzdaten

Auch für die GFZ Referenzdaten wird der Ausgleich der Amplitude der jährlichen Schwingung durchgeführt. Aufgrund der Kürze der Zeitreihe wird aber das Zeitintervall von fünf Jahren für den Ausgleich auf zwei Jahre verkürzt und statt um zwei Jahre jeweils um ein Jahr verschoben. Insgesamt führt das zu jeweils sieben Werten für die ausgeglichenen Amplituden zwischen 2015 und 2023, die in Abbildung 4.18 geplottet sind.

## 4 ERGEBNISSE

GFZ & SSP2-4.5 Model	$\chi_1$	$\chi_2$
CAMS-CSM1-0	9,90	15,68
CNRM-ESM2-1	10,51	16,30
CanESM5-1	9,27	15,89
EC-Earth3-Veg	9,65	17,66
FGOALS-g3	8,77	14,14
GISS-E2-1-H	8,74	16,37
IPSL-CM6A-LR	10,10	14,83
MIROC-ES2L	8,77	14,53
MPI-ESM1-2-LR	9,82	17,51
MRI-ESM2-0	9,69	15,21
UKESM1-0-LL	10,33	17,37

Tabelle 4.11: RMSE in Millibogensekunden (mas) zwischen GFZ Vergleichsdaten und Modellwerten von SSP2-4.5

Ausgeglichene Amplitude der jährlichen Schwingung der Multi-Model-Means und der GFZ Referenzdaten

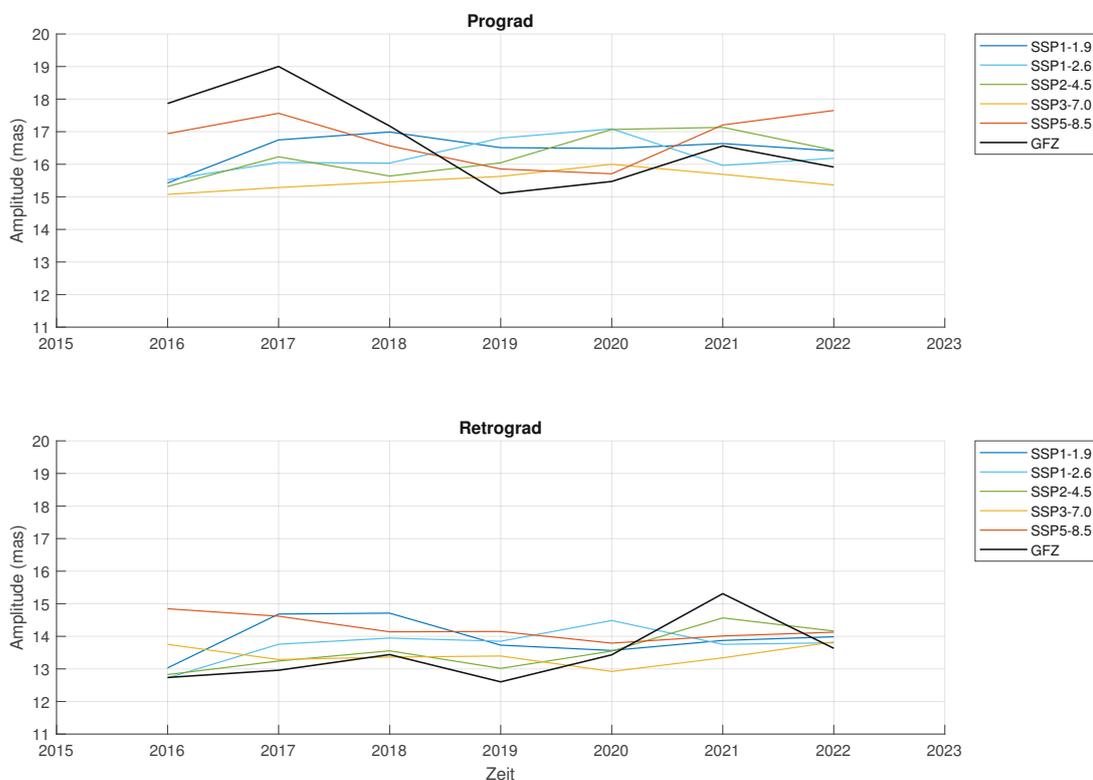


Abbildung 4.18: Ausgeglichene jährliche Amplitude der GFZ Referenzdaten

Vergleicht man die Amplitudenwerte der Multi-Model-Mean Zeitreihen jedes Szenarios, die für den Vergleich ebenfalls jeweils über zweijährige Intervalle ausgeglichen werden, mit denen der GFZ Referenzdaten, ist zu erkennen, dass die Amplitudenwerte sehr ähnlich zueinander sind. Sowohl für den prograden als auch für den retrograden Schwingungsanteil weisen die GFZ Daten eine stärkere Variation auf und liegen in beiden Komponenten sowohl etwas über als auch unter den MMM-Amplituden. Der glattere Verlauf der MMM-Zeitreihen ist dadurch erklärbar, dass die MMMs aus der Mittelung von jeweils elf Zeitreihen entstehen.

#### 4.4.4. Vergleich von Multi-Model-Mean pro Szenario, Wind- und Druckterm getrennt, mit den Referenzdaten

Als Nächstes werden Wind- und Druckterm getrennt voneinander mit den GFZ Referenzdaten verglichen, wie die Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigen.

Bei der visuellen Betrachtung der Abbildungen fällt auf, dass die Druckterme, die wieder eine stark ausgeprägte jährliche Schwingung aufweisen, in beide Richtungen sehr gut zu den Referenzdaten passen, während für den Windterm auffällt, dass die Multi-Model-Means aller fünf Szenarien im Vergleich zur Referenzdatenkurve deutlich geglätteter aussehen. Die Glättung der Windterme kann dadurch erklärt werden, dass aufgrund der schwachen Ausprägung einer periodischen Hauptschwingung die gegenseitige Dämpfung der Outputs der einzelnen Modelle durch Mittelung viel stärker ist. In der Kurve der GFZ Daten ist eine Schwingung mit jährlicher Periode im Windterm kaum zu erkennen, erst in den Multi-Model-Mean Kurven ist diese erkennbar.

Betrachtet man die Korrelationen der Druck- und Windterme mit den GFZ Daten, fällt auf, dass die mit Abstand höchste Übereinstimmung der Druckterm in  $\chi_2$ -Richtung aufweist. Die niedrigste Korrelation zeigt sich beim Windterm in  $\chi_2$ -Richtung. Richtung  $\chi_1$  sind die Unterschiede weniger stark ausgeprägt, der Windterm weist aber ebenfalls die stärkere Korrelation auf. Untereinander unterscheiden sich die Korrelationen der Szenarien kaum voneinander, was wiederum auf den Vergleichszeitraum zurückzuführen ist. Vergleicht man die Korrelationskoeffizienten von Wind- und Druckterm mit denen des oben betrachteten Gesamtterms, ist zu sehen, dass die Koeffizienten des Gesamtterms in  $\chi_1$  Richtung deutlich niedriger sind als sowohl die des Druck- als auch des Windterms. In  $\chi_2$ -Richtung liegt die Korrelation des Gesamtterms für jedes der Szenarien zwischen der des Druck- und des Windterms, jedoch näher bei den Werten des Druckterms, da dieser vor allem in  $\chi_2$ -Richtung den größten Anteil an der atmosphärischen Anregung hat.

## 4 ERGEBNISSE

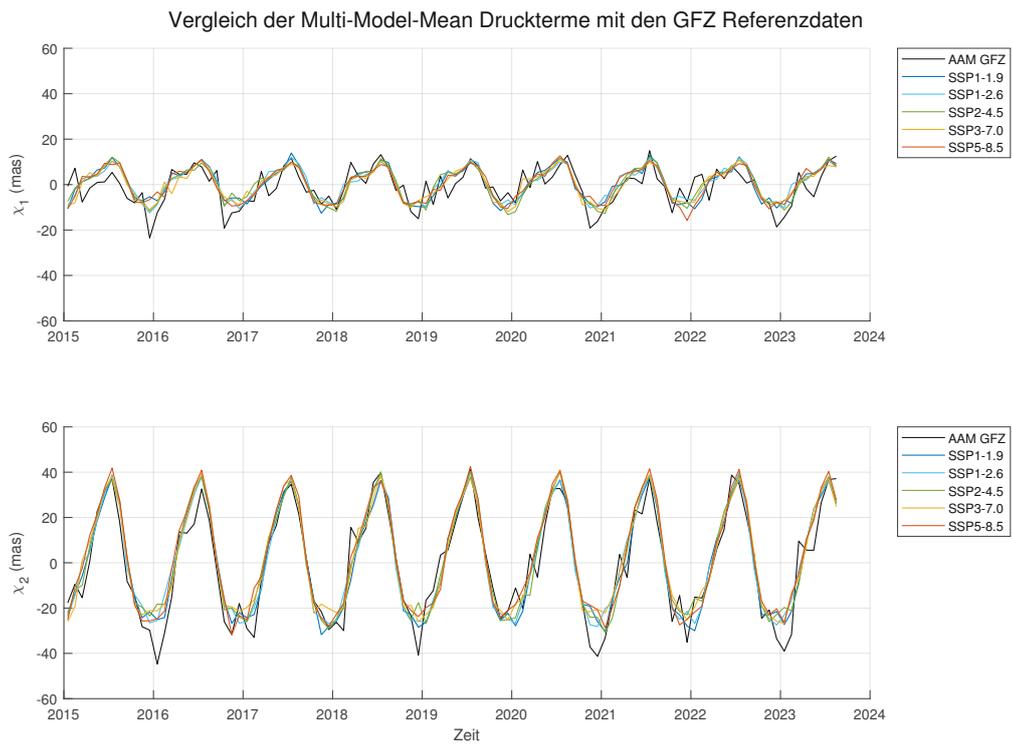


Abbildung 4.19: Vergleich des Multi-Model-Mean Druckterms jedes Szenarios mit den Referenzdaten

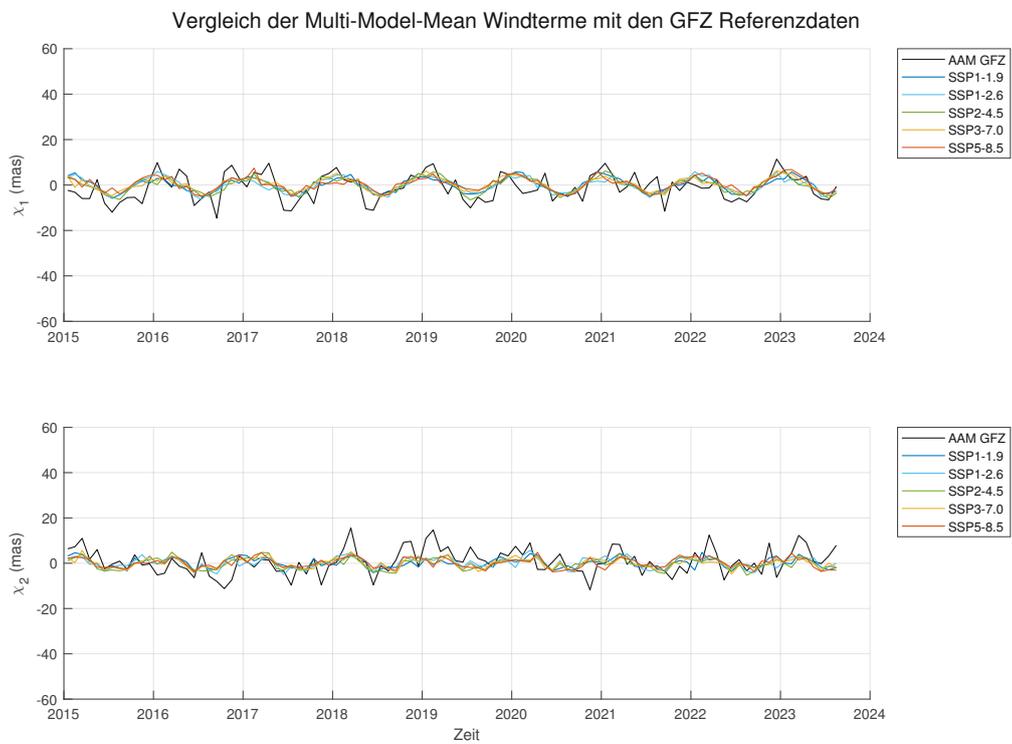


Abbildung 4.20: Vergleich des Multi-Model-Mean Windterms jedes Szenarios mit den Referenzdaten

GFZ&	$\chi_1$ Druck	$\chi_2$ Druck	$\chi_1$ Wind	$\chi_2$ Wind
SSP1-1.9	0,72	0,95	0,57	0,40
SSP1-2.6	0,74	0,94	0,58	0,47
SSP2-4.5	0,75	0,94	0,61	0,37
SSP3-7.0	0,73	0,94	0,68	0,35
SSP5-8.5	0,70	0,95	0,54	0,28

Tabelle 4.12: Korrelationskoeffizienten zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi-Model-Mean von jedem Szenario für Druckterm und Windterm getrennt

GFZ&	$\chi_1$ Druck	$\chi_2$ Druck	$\chi_1$ Wind	$\chi_2$ Wind
SSP1-1.9	5,89	7,81	4,89	5,21
SSP1-2.6	5,65	8,17	4,82	5,02
SSP2-4.5	5,56	8,41	4,67	5,34
SSP3-7.0	5,71	8,59	4,55	5,34
SSP5-8.5	6,03	8,45	5,08	5,50

Tabelle 4.13: Root Mean Square Error zwischen GFZ Vergleichsdaten und Multi-Model-Mean von jedem Szenario für Druckterm und Windterm getrennt, angegeben in Millibogensekunden (mas)

Bei der Analyse der Root Mean Square Error fällt auf, dass die Druckwerte in  $\chi_2$ -Richtung die höchsten mittleren Fehler aufweisen. Sowohl in  $\chi_1$ - als auch in  $\chi_2$ -Richtung sind die RMSE Werte des Windterms im Vergleich zu den Referenzdaten etwas kleiner als jene des Druckterms. In beiden Richtungen und für alle Szenarien ist der RMSE des Gesamtterms höher als der der einzelnen Komponenten, der Sprung ist allerdings in Richtung  $\chi_1$  um einiges deutlicher ausgeprägt als in  $\chi_2$ -Richtung.

Aus Abbildungen 4.19 und 4.20 kann auch abgeleitet werden, dass der Druckterm in beide Richtungen sehr genau mit den berechneten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen dargestellt werden kann, beim Windterm tritt eher eine Untermodellierung ein, die in  $\chi_2$ -Richtung deutlicher ausgeprägt ist.

Zusammenfassend kann aber klar gesagt werden, dass sowohl Wind- und Druckterm der berechneten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen getrennt als auch zusammengefasst sehr gut mit den aus ECMWF Wetterdaten berechneten Refe-

## 4 ERGEBNISSE

---

renzwerten des GFZ zusammenpassen. Werden die Outputs der einzelnen Modelle untereinander verglichen, sind diese mitunter sehr unterschiedlich, somit wird aber auch die Bildung von Multi-Model-Mean Werten pro Szenario gerechtfertigt, da es im Vergleich mit den Referenzdaten sowohl zu Über- als auch zu Untermodellierungen kommt und somit ein Mittelwert aus den Outputs der jeweils elf Modelle die Referenzdaten sehr gut repräsentiert.

## 5. Fazit

Der folgende Abschnitt dient als Zusammenfassung und Ausblick der Arbeit. Nach einer Kurzfassung der Datenauswertung folgen die wichtigsten Ergebnisse gefolgt von der Evaluierung der Hypothese. Zu guter Letzt werden Ansätze zur Verbesserung und zur möglichen zukünftigen Forschung diskutiert.

### 5.1. Zusammenfassung der Auswertung

Die atmosphärische Anregung der Polbewegung wird mit Drehimpulsfunktionen modelliert. Die eigentlichen Volumenintegrale der Drehimpulsfunktionen werden diskretisiert und mit aus dem Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) zur Verfügung gestellten Daten zu Oberflächendruck und Windgeschwindigkeiten ausgewertet. Insgesamt werden für das 21. Jahrhundert prognostizierte Wind- und Druckdaten von elf unterschiedlichen Klimamodellen für jeweils fünf unterschiedliche Klimaszenarien in die Untersuchungen einbezogen. Die berechneten Zeitreihen der atmosphärischen Anregung der Polbewegung werden dann untereinander verglichen und aus den Ergebnissen der elf Modelle wird für jedes der Klimaszenarien ein Multi-Model-Mean (MMM) berechnet. Die MMM-Schwingungen werden weiter nach der Veränderung ihrer Amplitude über das 21. Jahrhundert analysiert. Alle Ergebnisse werden außerdem zur Validierung mit Referenzdaten verglichen.

### 5.2. Wichtigste Ergebnisse

Der erste Punkt der Analysen ist der Vergleich der Ergebnisse der atmosphärischen Drehimpulsfunktionen (Atmospheric Angular Momentum (AAM)) zwischen den beiden Richtungen  $\chi_1$  und  $\chi_2$ . Hier ist zu erkennen, dass die  $\chi_1$  Komponente der atmosphärischen Anregung durch die IB-Korrektur stärker gedämpft ist als in  $\chi_2$  Richtung. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass die  $\chi_2$  Komponente eine stärkere Ausprägung der jährlichen Schwingung aufweist als die  $\chi_1$  Komponente.

Beim Vergleich der Multi-Model-Mean Zeitreihen mit den Ergebnissen, die die einzelnen Klimamodelle vor der Mittelung liefern, ist die Tendenz zu erkennen, dass die einzelnen Zeitreihen stärker auseinanderdriften, je extremer die Klimaänderungen des Szenarios angenommen werden. Weiters zeigt sich auch, dass die einzelnen Zeitreihen der Modelle für alle Szenarien stärker auseinanderdriften, je weiter das 21. Jahrhundert fortschreitet.

Der Vergleich der aus allen Modell-Einzelergebnissen für jedes Szenario berechneten MMMs ergibt, dass die stärkste Ausprägung der atmosphärischen Anregung eine Schwingung mit jährlicher Periode ist. Die gemittelten Zeitreihen jedes Szenarios zeigen untereinander vor allem in der Entwicklung ihrer Amplitude über das 21. Jahrhundert Unterschiede. Eine Verstärkung der Amplitude ist für das klimafreundlichste Szenario kaum zu erkennen, je mehr Treibhausgasemissionen angenommen werden, desto stärker steigt die Amplitude an.

Die genauere Untersuchung von Druck- und Windterm getrennt voneinander ergibt, dass der Druckterm die atmosphärische Anregung deutlich mehr beeinflusst als der Windterm. Außerdem ist der Anstieg der Amplituden beim Druckterm deutlich zu erkennen, beim Windterm kaum, hier sinkt die Amplitude sogar für manche Szenarien.

Der ausführliche Vergleich der berechneten atmosphärischen Anregung mit den atmosphärischen Drehimpulsfunktionen vom Deutschen GeoForschungsZentrum wird für die Jahre 2015–2023 vorgenommen. Die berechneten Ergebnisse stimmen in allen Analysen sehr gut mit den Referenzdaten überein. Da die Klimaszenarien erst ab etwa 2050 in ihrer Entwicklung auseinanderdriften, kann für den kurzen und am Beginn des 21. Jahrhunderts liegenden Zeitraum, in dem die berechneten AAM-Zeitserien mit den Referenzdaten verglichen werden, keine Aussage getroffen werden, welche der Simulationen am besten zur momentanen Wirklichkeit passt. Die MMM-Zeitserien unterscheiden sich untereinander im Vergleichszeitraum kaum, passen aber mit den GFZ Daten sehr gut zusammen.

### 5.3. Evaluierung der Hypothese

Die Annahme, dass sich mit vermehrtem Treibhausgasausstoß die atmosphärische Anregung der Polbewegung verstärkt, hat sich mit den Ergebnissen bestätigt. Die Vergrößerung der Amplituden der MMM-Werte der fünf Klimaszenarien ist umso stärker, je treibhausgasintensiver die sozioökonomische Entwicklung eines Szenarios angenommen wird. Die Verstärkung der Amplitude ist aber fast zur Gänze auf die Verstärkung des Druckanteils an den atmosphärischen Drehimpulsfunktionen zurückzuführen, der Windterm weist generell eine sehr viel kleinere Amplitude als der Druckterm auf und verändert sich über das 21. Jahrhundert für alle fünf Szenarien nur sehr schwach.

## 5.4. Mögliche zukünftige Forschung

Die in der vorliegenden Arbeit berechnete zukünftige atmosphärische Anregung der Polbewegung kann um weitere Klimamodelle und um verschiedene Realisierungen der einzelnen Modelle erweitert werden, um die MMM-Zeitreihen der fünf Klimaszenarien weiter zu untermauern.

Mit der Hinzunahme des Drehmomentansatzes können regionale Unterschiede in der Anregung genauer untersucht werden. In solchen Gebieten, die besonders zur Polbewegung beitragen, können dann die zukünftige Entwicklung und die Veränderung mit dem Klimawandel gezielt genauer untersucht werden.

Um die Polbewegung und ihre Anregungsmechanismen noch besser zu modellieren und Prognosen für die Veränderung der Anregung mit dem Klimawandel zu berechnen, ist ein wichtiger Faktor, auch die ozeanische Anregung mit einzubeziehnen. Neben der atmosphärischen Anregung spielen die Wassermassen in den Ozeanen eine große Rolle, die ebenfalls durch den Klimawandel vielen Veränderungen unterworfen sind.

# A. Anhang

## A.1. ad Kapitel 4.1.2

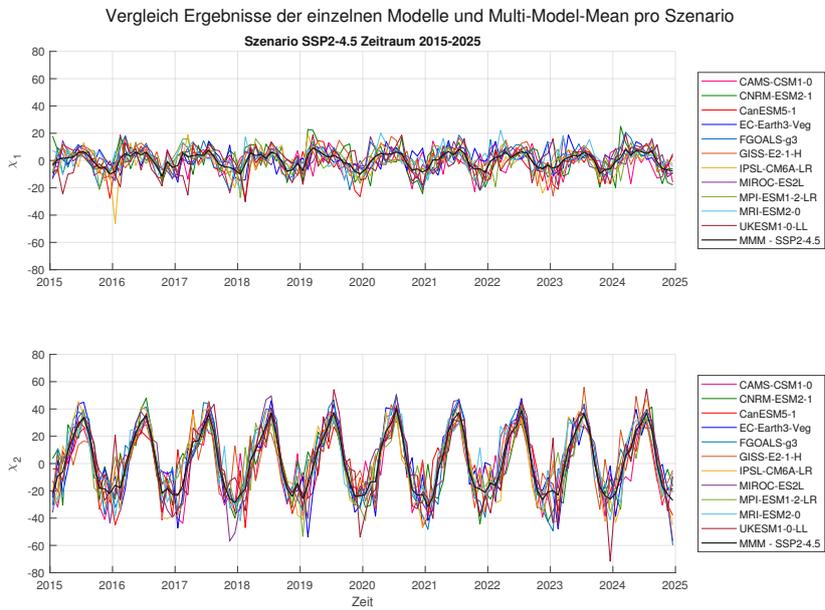


Abbildung A.1: Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP2-4.5 im Zeitraum 2015-2025

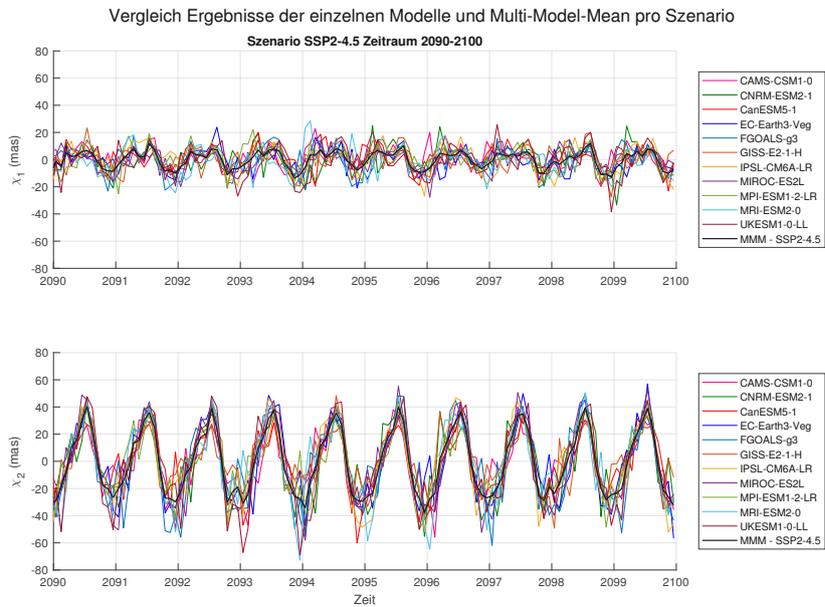


Abbildung A.2: Vergleich der Outputs der einzelnen Modelle mit dem Multi-Model-Mean für Szenario SSP2-4.5 im Zeitraum 2090-2100

## A.2. ad Kapitel 4.2.4:

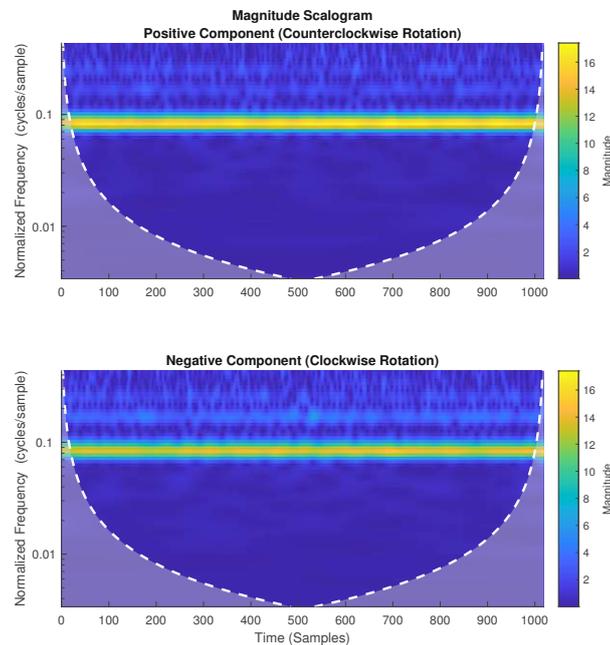


Abbildung A.3: Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP1-2.6, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung;

Die oben dargestellten Amplituden mit Schwingungsrichtung gegen den Uhrzeigersinn (counterclockwise rotation) entsprechen der prograden Schwingungsrichtung, die Amplituden mit Schwingungsrichtung im Uhrzeigersinn (clockwise rotation) entsprechen dem retrograden Anteil der Anregungsschwingung.

Die y-Achse der Plots ist so zu lesen, dass die Frequenz in Zyklen pro Abtastung gegeben ist, da es sich um monatliche Daten handelt hat die jährliche Schwingung also eine Frequenz von  $\frac{1}{12}$ , was gerundet 0,08 entspricht, die Magnitude zeigt die Amplitudengröße in Millibogensekunden (mas)

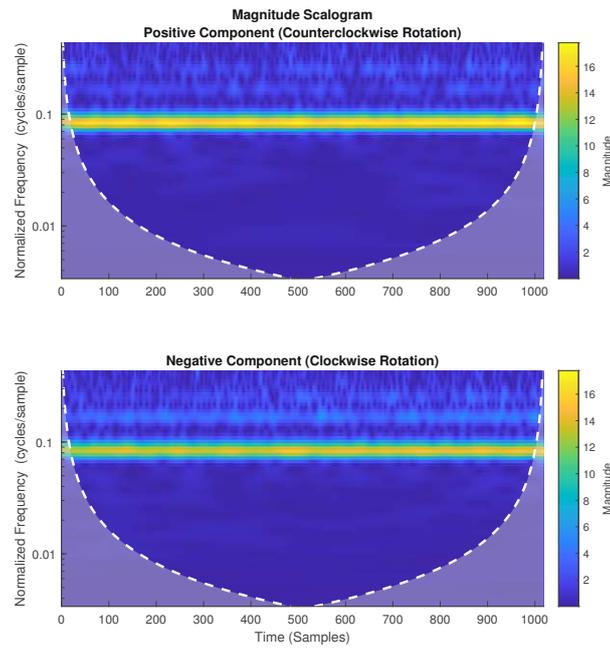


Abbildung A.4: Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP2-4.5, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung.

Für die detaillierte Beschreibung der Achsen siehe Abbildung A.3.

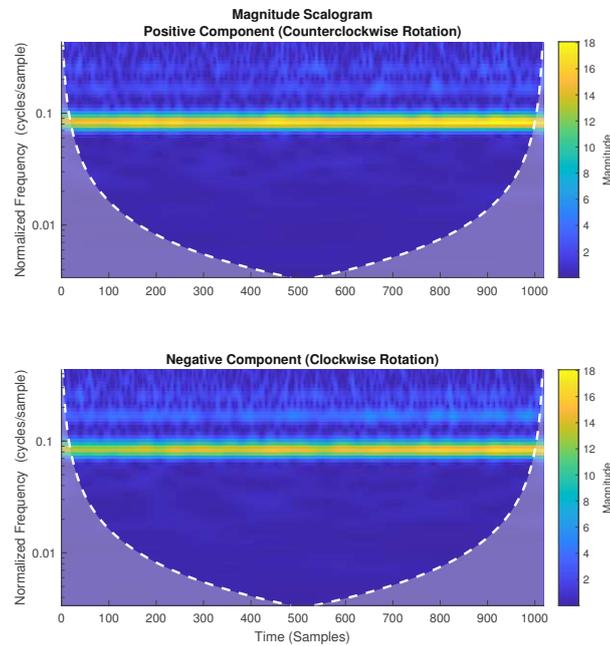


Abbildung A.5: Wavelet Skalogramm der atmosphärischen Drehimpulsfunktion für SSP3-7.0, dargestellt als prograder und retrograder Anteil der Schwingung.

Für die detaillierte Beschreibung der Achsen siehe Abbildung A.3.

## B. Referenzen der GFZ Validierungsdaten und der verwendeten CMIP6 Modell-Outputs

### Referenzdaten des Deutschen Geoforschungszentrum:

International Earth Rotation and Reference System Service. (2013). IERS Geophysical fluids data. <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/GeophysicalFluidsData/geoFluids.html>

### Modell CAMS-CSM1-0:

Rong, Xinyao (2019). CAMS CAMS-CSM1.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190708. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11045>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11046>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11047>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11048>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11052>

### Modell CNRM-ESM2-1

Voltaire, Aurore (2019). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190328. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4182>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4186>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4191>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4199>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4226>

### Modell CanESM5-1

Swart, Neil Cameron; Cole, Jason N.S.; Kharin, Viatcheslav V.; Lazare, Mike; Scinocca, John F.; Gillett, Nathan P.; Anstey, James; Arora, Vivek; Christian, James R.; Jiao, Yanjun; Lee, Warren G.; Majaess, Fouad; Saenko, Oleg A.; Seiler, Christian; Seinen, Clint; Shao, Andrew; Solheim, Larry; von Salzen, Knut; Yang, Duo; Winter, Barbara; Sigmond, Michael (2019). CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190429. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3682>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3683>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3685>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3690>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3696>

### **Modell EC-Earth3-Veg**

EC-Earth Consortium (EC-Earth) (2020). EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20201201. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4873>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4877>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4883>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4887>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4915>

### **Modell FGOALS-g3**

Li, Lijuan (2019). CAS FGOALS-g3 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20191029. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3462>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3465>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3469>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3480>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3503>

### **Modell GISS-E2-1-H**

NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS) (2020). NASA-GISS GISS-E2.1G model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20200115. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7407>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7410>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7415>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7426>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7460>

### **Modell IPSL-CM6A-LR**

Boucher, Olivier; Denvil, Sébastien; Levavasseur, Guillaume; Cozic, Anne; Caubel, Arnaud; Foujols, Marie-Alice; Meurdesoif, Yann; Cadule, Patricia; Devilliers, Marion; Dupont, Elliott; Lurton, Thibaut (2019). IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190410. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5261>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5262>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5264>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5265>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5271>

### **Modell MIROC-ES2L**

Tachiiri, Kaoru; Abe, Manabu; Hajima, Tomohiro; Arakawa, Osamu; Suzuki, Tatsuo; Komuro, Yoshiki; Oguchi, Koji; Watanabe, Michio; Yamamoto, Akitomo; Tatebe, Hiroaki; Noguchi, Maki A.; Ohgaito, Rumi; Ito, Akinori; Yamazaki, Dai; Ito, Akihiko; Takata, Kumiko; Watanabe, Shingo; Kawamiya, Michio (2019). MIROC MIROC-ES2L model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20201222. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5740>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5742>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5745>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5751>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5770>

### **Modell MPI-ESM1-2-LR**

Milinski, Sebastian; Li, Hongmei; Brune, Sebastian; Wachsmann, Fabian; Wieners, Karl-Hermann; Giorgetta, Marco; Jungclaus, Johann; Reick, Christian; Esch, Monika; Gayler, Veronika; Haak, Helmuth; de Vrese, Philipp; Raddatz, Thomas; Mauritsen, Thorsten; von Storch, Jin-Song; Behrens, Jörg; Brovkin, Victor; Claussen, Martin; Crueger, Traute; Fast, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohegger, Cathy; Jahns, Thomas; Kloster, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Meraner, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Nabel, Julia; Notz, Dirk; Peters-von Gehlen, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Rast, Sebastian; Schmidt, Hauke; Schnur, Reiner; Schulzweida, Uwe; Six, Katharina; Stevens,

Bjorn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich (2019). MPI-M MPI-ESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190815. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6688>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6690>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6693>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6695>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6705>

**Modell MRI-ESM2-0** Yukimoto, Seiji; Koshiro, Tsuyoshi; Kawai, Hideaki; Oshima, Naga; Yoshida, Kohei; Urakawa, Shogo; Tsujino, Hiroyuki; Deushi, Makoto; Tanaka, Taichu; Hosaka, Masahiro; Yoshimura, Hiromasa; Shindo, Eiki; Mizuta, Ryo; Ishii, Masayoshi; Obata, Atsushi; Adachi, Yukimasa (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190603. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6908>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6909>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6910>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6915>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6929>

### **Modell UKESM1-0-LL**

Good, Peter; Sellar, Alistair; Tang, Yongming; Rumbold, Steve; Ellis, Rich; Kelley, Douglas; Kuhlbrodt, Till (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp119, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Version 20190830. Earth System Grid Federation.

SSP1-1.9: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6329>

SSP1-2.6: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6333>

SSP2-4.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6339>

SSP3-7.0: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6347>

SSP5-8.5: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6405>

## Referenzen

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., & Chanard, K. (2023). ITRF2020: An augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*, 97(5), 47.
- Barnes, R. T., Hide, R., White, A. A., & Wilson, C. A. (1983). Atmospheric Angular Momentum Fluctuations, Length-of-Day Changes and Polar Motion. *Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 387(1792), 31–73. <https://doi.org/10.1098/rspa.1983.0050>
- Böhm, J., Salstein, D. A., Alizadeh, M. M., & Wijaya, D. D. (2013). Geodetic and Atmospheric Background. In *Atmospheric Effects in Space Geodesy* (S. 1–33). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36932-2>
- Böhm, S. (2010). Der Einfluss der Gezeiten auf die Erdrotation. *Vermessung & Geo-information*, 2, 116–123.
- Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M.-A., Meurdesoif, Y., Cadule, P., Devilliers, M., Ghattas, J., Lebas, N., Lurton, T., Mellul, L., Musat, I., Mignot, J., & Cheruy, F. (2018). IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1534>
- Brzeziński, A., Bizouard, C., & Petrov, S. D. (2002). Influence of the atmosphere on earth rotation: What new can be learned from the recent atmospheric angular momentum estimates? *Surveys in Geophysics*, 23(1), 33–69. <https://doi.org/10.1023/A:1014847319391>
- Charlot, P., Jacobs, C. S., Gordon, D., Lambert, S., de Witt, A., Böhm, J., Fey, A. L., Heinkelmann, R., Skurikhina, E., Titov, O., Arias, E. F., Bolotin, S., Bourda, G., Ma, C., Malkin, Z., Nothnagel, A., Mayer, D., MacMillan, D. S., Nilsson, T., & Gaume, R. (2020). The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry. *Astron Astrophys*, 644, A159. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038368>
- Cohen, J., & Cohen, J. W. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed.). Erlbaum.

## REFERENZEN

---

- Dahlen, F. A. (1976). The Passive Influence of the Oceans upon the Rotation of the Earth. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 46(2), 363–406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb04163.x>
- De Viron, O., & Dehant, V. (1999). Earth's rotation and high frequency equatorial angular momentum budget of the atmosphere. *Surveys in Geophysics*, 20(6), 441–462. <https://doi.org/10.1023/A:1006723924421>
- EC-Earth-Consortium. (2019). EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.727>
- Edwards, P. N. (2011). History of climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 128–139. <https://doi.org/10.1002/wcc.95>
- Euler, L. (1765). *Theoria motus corporum rigidorum*. [http://www.wilbourhall.org/pdfs/euler/Theoria\\_motus\\_corporum\\_solidorum\\_seu\\_rig.pdf](http://www.wilbourhall.org/pdfs/euler/Theoria_motus_corporum_solidorum_seu_rig.pdf)
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Gross, R. S. (2003). Atmospheric and oceanic excitation of the Earth's wobbles during 1980–2000. *Journal of Geophysical Research*, 108(B8). <https://doi.org/10.1029/2002jb002143>
- Gross, R. S. (2007). 3.09 - Earth Rotation Variations - Long Period. *Treatise on Geophysics: Volume 1-10, 1-10*, 239–294. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00057-2>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023a). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (S. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

## REFERENZEN

---

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023b). Technical Summary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (S. 35–144). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Li, L. (2019). CAS FGOALS-g3 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp370. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3480>
- Meehl, G., Boer, G., Covey, C., Latif, M., & Ronald, S. (2000). CMIP Coupled Model Intercomparison Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 313–318. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0313:TCMIPC>2.3.CO;2](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0313:TCMIPC>2.3.CO;2)
- Moritz, H., & Mueller, I. I. (1987). *Earth Rotation: Theory and Observation*. Ungar.
- Munk, W. H., & MacDonald, G. J. F. (1960). *The Rotation of the Earth - A Geophysical Discussion*. Cambridge University Press.
- NASA Goddard Institute for Space Studies. (2018). NASA-GISS GISS-E2.1H model output prepared for CMIP6 CMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1421>
- Nastula, J., & Salstein, D. A. (1999). Regional atmospheric angular momentum contributions to polar motion excitation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B4), 7347–7358. <https://doi.org/10.1029/1998jb900077>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Petit, G., & Luzum, B. (2010). IERS Conventions ( 2010 ). *Bureau International Des Poids Et Mesures Sevres (France)*, 1–179. <http://www.iers.org/TN36/>
- Rong, X. (2019). CAMS CAMS-CSM1.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11004>

## REFERENZEN

---

- Salstein, D. A. (2020). Atmospheric angular momentum related to Earth rotation studies: history and modern developments. In C. Bizouard (Hrsg.), *Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA era* (S. 209–213).
- Salstein, D. A., Kann, D. M., Miller, A. J., & Rosen, R. D. (1993). The sub-bureau for atmospheric angular momentum of the International Earth Rotation Service: a meteorological data center with geodetic applications. *Bulletin - American Meteorological Society*, 74(1), 67–80. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<0067:TSBFAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<0067:TSBFAA>2.0.CO;2)
- Schindelegger, M. (2014). Atmosphere-induced short period variations of Earth rotation, 165. <http://www.ub.tuwien.ac.at/diss/AC11325672.pdf>
- Schindelegger, M., Böhm, S., Böhm, J., & Schuh, H. (2013). Atmospheric Effects on Earth Rotation. In J. Böhm & Schuh (Hrsg.), *Atmospheric Effects in Space Geodesy* (S. 181–231). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36932-2>
- Schuh, H., & Böhm, S. (2020). Earth Rotation. In H. K. Gupta (Hrsg.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7>
- Seferian, R. (2018). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 CMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1391>
- Seo, K.-W., Ryu, D., Eom, J., Jeon, T., Kim, J.-S., Youm, K., Chen, J., & Wilson, C. R. (2023). Drift of Earth's Pole Confirms Groundwater Depletion as a Significant Contributor to Global Sea Level Rise 1993–2010. *Geophysical Research Letters*, 50(12), e2023GL103509. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023GL103509>
- Staak, A. (2022). Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ. <https://www.ufz.de/index.php?de=49487>
- Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Solheim, L., von Salzen, K., Yang,

## REFERENZEN

---

- D., ... Sigmond, M. (2019). CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1303>
- Tachiiri, K., Abe, M., Hajima, T., Arakawa, O., Suzuki, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Ito, A., Takata, K., Watanabe, S., & Kawamiya, M. (2019). MIROC MIROC-ES2L model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.936>
- Tang, Y., Rumbold, S., Ellis, R., Kelley, D., Mulcahy, J., Sellar, A., Walton, J., & Jones, C. (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6113>
- Taylor, K. E., Durack, P. J., Ames, S., & Stockhouse, M. (2022). CMIP6 Guidance for Data Users. <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/Guide/dataUsers.html>
- Wahr, J. M. (1982). The effects of the atmosphere and oceans on the Earth's wobble - I. Theory. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 70, 349–372.
- Wieners, K.-H., Giorgetta, M., Jungclaus, J., Reick, C., Esch, M., Bittner, M., Legutke, S., Schupfner, M., Wachsmann, F., Gayler, V., Haak, H., de Vrese, P., Raddatz, T., Mauritsen, T., von Storch, J.-S., Behrens, J., Brovkin, V., Clausen, M., Crueger, T., ... Roeckner, E. (2019). MPI-M MPI-ESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6595>
- Wunsch, C., & Stammer, D. (1997). Atmospheric loading and the oceanic “inverted barometer” effect. *Reviews of Geophysics*, 35(1), 79–107. <https://doi.org/10.1029/96RG03037>
- Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., & Adachi, Y. (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.621>