

Bachelorarbeit

Vergleich von CO₂-Satellitenmessungen mit globalen Modellen

Eingereicht von: Stephanie Freking
Matrikelnummer: 2598288
E- Mail: frest.nie@gmx.de

Studiengang: Physik B.Sc.
Erstgutachter: PD Dr. Annette Ladstätter-
Weissenmayer
Zweitgutachter: Prof. Dr. Justus Notholt
Abgabe: 22.09.2014

Zusammenfassung

Die CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre nimmt kontinuierlich zu. Dies liegt primär an der anthropogenen Emission. Diese Zunahme der CO₂-Konzentration in der Luft kann sehr genau mithilfe von Messnetzwerken, die jedoch keine globale Abdeckung besitzen, gemessen werden. Mit Modellen, die die Daten dieser Messnetzwerke assimilieren, kann für jeden Längen- und Breitengrad die vorhandene CO₂-Konzentration abgeschätzt werden. Um mithilfe von Klimamodellen gute Vorhersagen zu treffen, ist die Zuverlässigkeit der Modellierung eine Voraussetzung. Aus diesem Grund werden solche Modelle kontinuierlich angepasst und verbessert.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Werte des vertikal gemittelten CO₂-Mischungsverhältnis (XCO₂) dreier Modelle (MPI BGC JENA ANA96 v.3.4 (MPI), NOAA CarbonTracker v2011 (CT), LSCE MACC v2012 (LSCE)) und die Messungen des Spektrometers SCIAMACHY auf ENVISAT miteinander verglichen. Die dafür verwendeten Satellitendaten werden mit dem Auswertalgorithmus BESD analysiert. Der Vergleich wird für 17 Regionen über einen Messzeitraum von sieben Jahren vorgenommen.

Auf der Grundlage dieses Vergleiches befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Frage, welches der drei Modelle in seinen Daten am besten mit den Satellitenmessungen übereinstimmt. Dabei liegt der Fokus auf der Jahresgangamplitude, da diese sowohl Rückschlüsse auf die in der Biosphäre vermutete CO₂-Senke als auch Aufschlüsse über alle weiteren Quellen und Senken dieses Treibhausgases liefert.

Alle Datensätze zeigen, dass die Jahresgangamplitude auf der Nordhalbkugel in den untersuchten Gebieten mit zunehmendem Breitengrad steigt.

Es konnte kein Modell als das Modell identifiziert werden, welches in seinen Daten für alle Regionen und alle Zeiten am besten mit den Satellitendaten übereinstimmt.

Der Vergleich zeigt, dass alle drei Modelle die Jahresgangamplitude des Satelliten typischerweise im Mittel um 0.72 ppm unterschätzen.

Im Mittel weichen die Daten des LSCE-Modells mit (-0.39 ± 0.22) ppm innerhalb der 11 betrachteten Transcom-Regionen, die zusammen alle Landflächen der Erde umfassen, am wenigsten von den Satellitenmessungen ab.

Für die Regionen der Nord- und der Südhemisphäre mit einer Abweichung von (-0.72 ± 0.31) ppm und (0.19 ± 0.23) ppm stimmen die Daten des LSCE-Modells im Mittel am besten mit den Satellitendaten überein. Es zeigt sich jedoch, dass die Wahl des Modells, welches regional am besten mit den Satellitendaten übereinstimmt, von Region zu Region variiert.

Für die Transcom-Regionen und die Regionen der Nordhemisphäre hat das CT-Modell mit (-1.09 ± 0.11) ppm und (-1.48 ± 0.19) ppm im Mittel die größte Abweichung gegenüber den Daten des Satelliten.

Auf der Südhalbkugel stimmt das MPI-Modell mit (-0.58 ± 0.20) ppm im Mittel am schlechtesten mit den Satellitendaten überein.

Danksagung

Für seine ausgiebige Unterstützung und die Betreuung meiner Arbeit möchte ich in erster Linie meinem Betreuer, Dr. Maximilian Reuter, danken. Vielen Dank für die Zeit und Mühen, die Sie in meine Arbeit investiert haben.

Erheblich zu dieser Arbeit haben ebenfalls Herr Dr. Jens Heymann und Herr Dr. Michael Buchwitz beigetragen. Ohne ihre wertvollen Hinweise wäre diese Arbeit nicht in dieser Form zustande gekommen.

Vielen Dank für die Geduld und die Zeit, die Sie sich für meine Arbeit genommen haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Annette Ladstätter- Weissenmayer und Herrn Prof. Dr. Justus Notholt für die Übernahme der Begutachtung dieser Arbeit bedanken.

Ergänzend möchte ich mich bei Dr. Dhanyalekshmi K. Pillai, Michael Hilker und Dr. Oliver Schneising für ihre Zeit, Hilfsbereitschaft und sehr guten Ratschläge bedanken.

Des Weiteren danke ich meinen Eltern von Herzen, die mich während des gesamten Studiums in jeglicher Weise unterstützt haben und mir bei allen Problemen stets zur Seite standen. Ohne sie wäre ich vermutlich nicht so weit gekommen!

Abschließend geht ein Dank geht an all die Korrekturleser, von denen jeder die Arbeit durch seinen Beitrag verbesserte.

Vielen Dank an NOAA ESRL, die die CarbonTracker v2011- Daten auf der Internetseite <http://carbontracker.noaa.gov/> bereitstellten.

Bei dem Max Planck Institut für Biogeochemie in Jena möchte ich mich ebenfalls dafür bedanken, dass in dieser Arbeit die Daten des MPI BGC JENA ANA96 v.3.4- Modells verwendet werden konnten.

Ein weiterer Dank gilt Frederic Chevallier für die Bereitstellung der Daten des LSCE MACC v2012- Modells.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theoretischer Hintergrund	5
2.1	Der Treibhauseffekt	5
2.2	CO ₂ und der Kohlenstoffkreislauf	6
2.3	CO ₂ und Klimawandel	8
2.4	Messtechniken von CO ₂	9
2.4.1	Bodennahe Messungen	10
2.4.2	Satellitenmessungen	12
3	Satelliten- und Modelldaten	14
3.1	SCIAMACHY	14
3.1.1	Auswertungsalgorithmen	15
3.1.2	Der Auswertealgorithmus Bremen Optimal Estimation DOAS	15
3.2	Modelle zur Simulation von atmosphärischem CO ₂	17
3.2.1	Das LSCE MACC-Modell	17
3.2.2	Das MPI BGC JENA ANA96-Modell	19
3.2.3	Das CarbonTracker-Modell	20
4	Vergleichsmethode	23
4.1	Stand der Forschung	23
4.2	Datenbearbeitung	24
4.3	Berechnung der Amplitude des XCO ₂ - Jahresgang	25
5	Ergebnisse	31
5.1	Ergebnisse der XCO ₂ - Amplitudenberechnung	31
5.2	Abweichungen der Modell- von den Satellitendaten	38
6	Zusammenfassung	46
6.1	Ausblick	48
7	Anhang	49

Literaturverzeichnis	64
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	73

Kapitel 1

Einleitung

Kohlendioxid (CO_2) ist das wichtigste, von Menschen erzeugte, Treibhausgas in der Atmosphäre. Es trägt signifikant zur globalen Erwärmung bei, welche seit Beginn der Industrialisierung etwa 0.85°C beträgt (IPCC *et al.*, 2013). Seit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert ist die CO_2 -Konzentration um ca. 40% (IPCC *et al.*, 2013) gestiegen. Trotz der Wichtigkeit von CO_2 bestehen noch große Unsicherheiten bezüglich der Quellen und Senken von diesem Treibhausgas. So wird beispielsweise vermutet, dass eine bisher unberücksichtigte Senke (“missing sink“) existiert (Ciais *et al.*, 2014).

Um mithilfe von Klimamodellen zuverlässige Vorhersagen zu machen, ist es notwendig, dass alle Quellen und Senken sehr genau bekannt sind. Informationen über die Position und die Stärke dieser Quellen und Senken erhält man, indem an zahlreichen Messstationen, bestehend aus Flaschenmessungen, kontinuierlichen Messungen und Messungen auf hohen Messtürmen (*Tall Tower*), die CO_2 -Konzentration untersucht wird. Zusätzlich werden Flugzeugmessungen durchgeführt.

Die Genauigkeit dieser Messungen ist sehr hoch. Durch Modelle, die die Inversionstechnik nutzen, können die Unsicherheiten über die CO_2 -Quellen und Senken verringert werden. Dazu werden Annahmen der CO_2 -Flüsse gemacht und mithilfe eines Transportmodells wird die CO_2 -Konzentration simuliert. Die CO_2 -Flüsse werden dann solange angepasst, bis die modellierten CO_2 -Konzentrationen bestmöglich, unter Berücksichtigung von bestehendem a priori- Wissen mit den Messungen übereinstimmen.

In dieser Arbeit werden die Modelle LSCE MACC v2012 (LSCE) (Chevallier *et al.*, 2010), MPI BGC JENA ANA96 v3.4 (MPI) (Rödenbeck, 2005) und NOAA CarbonTracker v2011 (CT) (Peters *et al.*, 2007) betrachtet. Eine Beschränkung der Modelle stellt dabei die geringe Anzahl Messstationen und die schlechte globale Abdeckung dar.

Aus diesem Grund sind Satellitenmessungen, die das säulengemittelte Mischungsverhältnis von CO_2 in trockener Luft, XCO_2 genannt, messen, wie von SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographyY (SCIAMACHY) auf ENVIRONMENTAL SATellite (ENVISAT) (Burrows *et al.*, 1995); (Bovensmann *et al.*, 1999)) der europäischen Raumfahrtagentur ESA, von Fourier-Transform-Spektrometer TANSO auf GOSAT (Kuze *et al.*, 2009) und OCO-2 (Crisp *et al.*, 2004) von großer Bedeutung. Ihre Vorteile sind sowohl die große räumliche und zeitliche Abdeckung, als auch ihre hohe Sensitivität in den bodennahen Schichten, wo die Quellen und Senken von CO_2 lokalisiert sind.

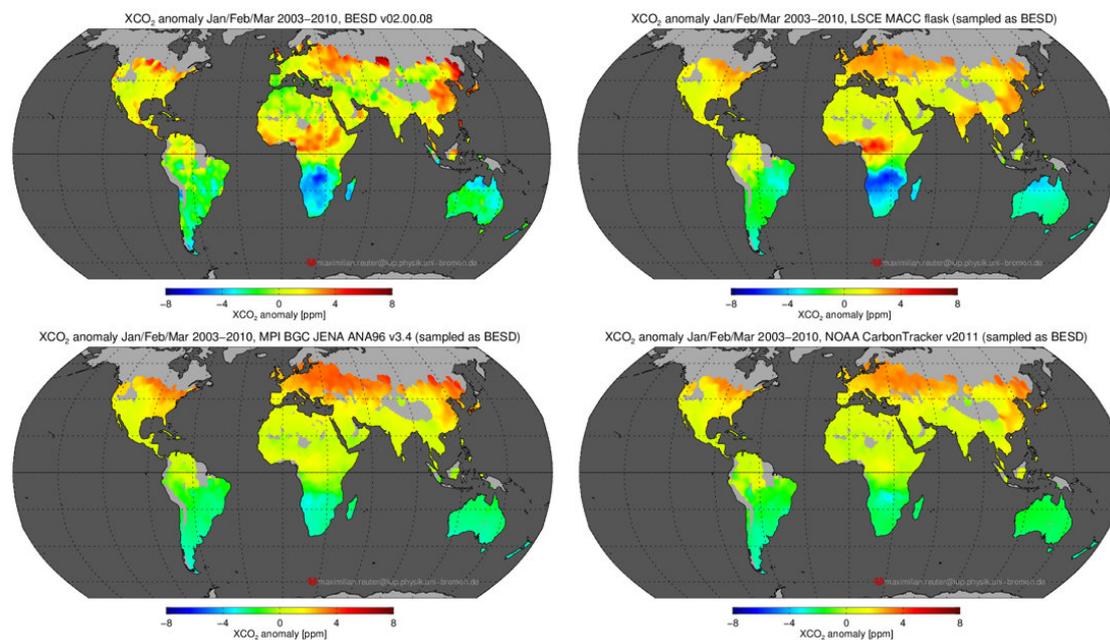


Abbildung 1.1: Globale Karten von XCO_2 - Anomalien basierend auf Satellitendaten (SCIAMACHY, BESD) und Modelldaten (LSCE, MPI, CT) gemittelt über die Monate Januar, Februar und März der Jahre 2003-2010 (Reuter, 2014)

Das Gitterspektrometer SCIAMACHY hat von Mitte 2002 bis 2012 an der Erde und der Erdatmosphäre reflektierte und gestreute solare Strahlung gemessen. Da SCIAMACHY zwischen 2002 und 2009 als einziges Satelliteninstrument mit Bodensensitivität die CO_2 -Konzentration aufgenommen hat, sind die Messdaten im Hinblick auf konsistente Langzeitdatensätze von unschätzbarem Wert. Neben SCIAMACHY gibt es seit 2009 GOSAT und seit dem 2.7.2014 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) im All.

Für die Auswertung der vom Satelliten aufgenommenen Spektren werden Algorithmen, wie beispielsweise BESD (Bremen Optimal Estimation DOAS)((Reuter *et al.*, 2010),(Reuter *et al.*, 2011)), verwendet. BESD ist ein Kernalgorithmus des GHG-CCI-Projekts und wird hinsichtlich der Genauigkeit des ausgewerteten XCO₂ kontinuierlich verbessert. Dabei handelt es sich um einen sogenannten “full physics“-Auswertalgorithmus. Das bedeutet, dass Streuung explizit berücksichtigt wird. BESD basiert auf *optimal estimation*, einem statistischen Verfahren, welches mithilfe von SCIATRAN, einem Strahlungstransportmodell, das XCO₂ aus den gemessenen Spektren ableitet.

In Abbildung 1.1 sind die XCO₂-Messwerte des Satelliten und die ebenso gesampleten Daten der drei Modelle LSCE, MPI und CT dargestellt. Die Daten von SCIAMACHY in Abbildung 1.1 stimmen nicht in allen Regionen mit den XCO₂-Modelldaten überein. Im Vergleich der Satellitendaten mit den Daten der Modelle wird deutlich, dass hier nicht erkennbar ist, welches Modell für alle Regionen am geringsten von den Satellitendaten abweicht. Hinzu kommt, dass je nach Region ein anderes Modell den Satellitenmessungen am ähnlichsten ist. Im Wesentlichen stimmen die vier Darstellungen der XCO₂-Anomalien in ihren Nord-Süd-Gefällen überein. Bei jedoch genauerer Betrachtung fällt beispielsweise für Südafrika auf, dass die modellierten Datensätze deutliche, regionale Diskrepanzen zur Messung aufweisen. Diese Differenzen sind jedoch nicht nur im Vergleich der Modelldatensätze mit den Satellitendaten, sondern ebenfalls in der gleichen Größenordnung im Vergleich der Modelle untereinander zu finden. Würden alle Modelle in ihren Daten übereinstimmen, würde dies ein Problem bei den Messungen des Satelliten bedeuten.

In einer anderen Studie wurden bereits SCIAMACHY-Daten mit denen des CT-Modells verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die Jahresgangamplituden der Satellitendaten um ca. 10-15% größer sind als die des Modells (Schneising *et al.*, 2014). Eine weitere Untersuchung zeigte, dass Modelle, die die biosphärischen Flüsse des Biosphärenmodells CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) verwenden, die Jahresgangamplitude des CO₂-Mischungsverhältnisses innerhalb der nördlichen mittleren Breitengrade unterschätzen (Keppel-Aleks *et al.*, 2012).

In diesem Zusammenhang sollen in dieser Arbeit die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Messung und Modell untersucht werden, wobei der Fokus auf der Untersuchung der XCO₂-Jahresgangamplitude in 17 Regionen liegen soll.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Grundlagen dieser Thematik dargelegt. Anschließend folgt die Beschreibung der Methode, die der Berechnung der Jahresgangamplitude zugrunde liegt. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden dann in dem darauffolgenden Kapitel diskutiert und schließlich zusammengefasst.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund

2.1 Der Treibhauseffekt

Der natürliche Treibhauseffekt erwärmt die Erdatmosphäre in Bodennähe auf eine Mitteltemperatur von 15°C und ermöglicht somit das Leben auf der Erde. Ohne diese Erwärmung würde die Mitteltemperatur der Erde bei ca. -18°C liegen. Der Temperaturunterschied findet seine Ursache in aufheizenden und abkühlenden Prozessen. Diese Prozesse werden anhand der folgenden Abbildung erläutert.

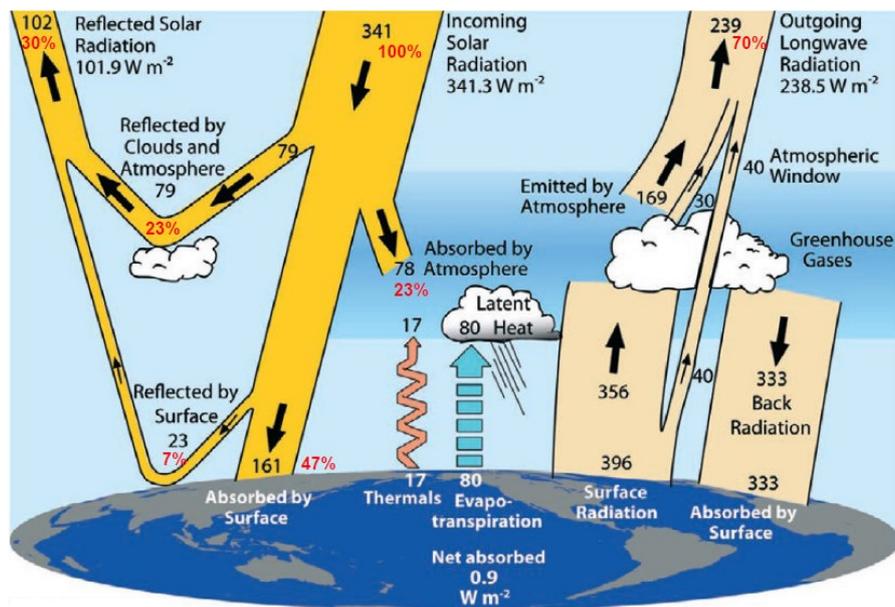


Abbildung 2.1: Der Strahlungshaushalt der Erde (Trenberth *et al.*, 2009)

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, gelangen im Mittel 341.3 W m^{-2} der solaren Strahlung zur Erde. Von dieser Strahlung werden 23% an Wolken und Aerosolen in der Atmosphäre

zurück ins All reflektiert. Weitere 23 % werden von der Atmosphäre absorbiert. Demnach gelangen lediglich 54 % zum Erdboden. Dort wird ein geringer Anteil von 7 % vom Erdboden reflektiert, während die verbleibenden 47 % absorbiert werden und somit zu der Erwärmung des Bodens und den bodennahen Atmosphärenschichten führen.

Um diese von der Sonnenstrahlung aufgenommene Wärme wieder abzugeben, emittiert die Erde Strahlung im infraroten Spektralbereich. Im Vergleich der Werte der einfallenden mit den der emittierten Strahlung (396 Wm^{-2}) wird deutlich, dass wesentlich mehr Strahlung emittiert als absorbiert wird. Diese Differenz wird durch die zusätzliche Absorption der Atmosphäre im infraroten Spektralbereich erklärt. Sie stellt ebenso wie die Erde einen thermischen Strahler dar, der die ihm zugeführte Energie teilweise zur Erde zurückstrahlt. Diese sogenannte "Gegenstrahlung" beträgt im globalen Mittel 333 Wm^{-2} . Folglich beträgt die Nettoemission der Erdoberfläche nur noch 63 Wm^{-2} .

Die "Gegenstrahlung" der Atmosphäre wird durch die enthaltenen Treibhausgase, größtenteils Wasserdampf und Kohlendioxid, bestimmt. Je größer die Konzentration dieser Treibhausgase in der Atmosphäre, desto mehr thermische Strahlung kann absorbiert werden und die Erdatmosphäre erwärmen.

40 Wm^{-2} der emittierten thermischen Strahlung können durch das atmosphärische Fenster ins All entweichen. Innerhalb dieses Fensters, welches im Spektralbereich zwischen $7.5 \mu\text{m}$ und $13 \mu\text{m}$ liegt, ist die Absorption durch die Hauptabsorber Wasserdampf und Kohlendioxid vernachlässigbar gering (Roedel, 2000). Der restliche Anteil dieser Strahlung trifft in der Atmosphäre auf die Treibhausgase.

Eine ausführlichere Darstellung des Treibhauseffektes kann dem Buch *Physik unserer Umwelt: die Atmosphäre* von Walter Roedel und Thomas Wagner (2000) entnommen werden.

2.2 CO₂ und der Kohlenstoffkreislauf

Das Kohlenstoffatom (C) geht auf der Erde verschiedene Verbindungen ein, wobei die in der Atmosphäre am häufigsten vorkommende das CO₂-Molekül darstellt. CO₂ wird nicht im eigentlichen Sinne abgebaut. Seine Konzentration wird durch die Austauschprozesse der einzelnen Reservoirs bestimmt.

Eine detaillierte Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufes ist z. B. im Roedel, sowie dem fünften IPCC-Report (2014) zu finden. Hier soll lediglich eine kurze Zusammenfassung gegeben werden.

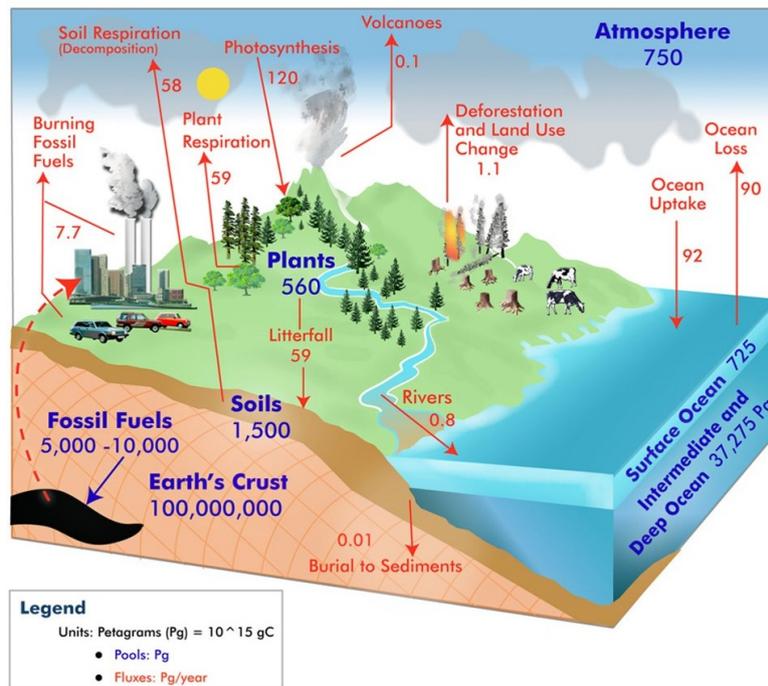


Abbildung 2.2: Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs. In rot sind die Kohlenstoff-Flüsse und in blau die Kohlenstoff-Reservoirs dargestellt (GlobeCarbonCycle-Project, 2010)

Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, bilden die Gesteine, die Pflanzen, der Boden, die fossilen Brennstoffe, die Atmosphäre sowie der Ozean Kohlenstoff-Reservoirs, zwischen denen CO₂-Moleküle ausgetauscht werden. Die Dauer dieser Austauschprozesse variiert je nach Reservoir. Während der Austausch der CO₂-Moleküle zwischen den Pflanzen, der Atmosphäre und dem Ozean relativ schnell verläuft, dauert dieser bei Prozessen, bei denen Sedimente oder Gesteine beteiligt sind, wesentlich länger.

Die Pflanzen und der Boden als Teil der Biosphäre stehen ebenfalls im direkten Kontakt mit der Atmosphäre. Von den Pflanzen werden durch die Photosynthese aus der Atmosphäre 120 Pg/Jahr assimiliert. Die Pflanzenatmung (Respiration) produziert 59 Pg/Jahr. Weitere 59 Pg/Jahr gelangen durch das Laub auf den Erdboden. Von dort gelangen 58 Pg/Jahr durch Bodenatmung wieder in die Atmosphäre. Die Stärke der einzelnen Komponenten ist regional starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Dies verursacht den Jahresgang in der CO₂-Konzentration. Nach dem Ergebnis der Addition dieser Flüsse verbleiben 3 Pg/Jahr in der Biosphäre, die demnach eine CO₂-Senke darstellt. Diese Flüsse sind neben den Austauschflüssen zwischen dem Ozean und der Atmosphäre die größten.

Aus der Biosphäre gelangen durch Flüsse 0.8 Pg/Jahr in den Ozean. Weitere 92 Pg/Jahr an Kohlenstoff-Atomen werden aus der Atmosphäre aufgenommen. Lediglich 90 Pg/Jahr

werden von dem Ozean wieder an die Atmosphäre abgegeben, was den Ozean ebenfalls zu einer Kohlenstoff-Senke macht. Die Kapazität des Ozeans als Kohlenstoff-Senke wird größtenteils durch seine Durchmischung bestimmt. Je tiefer seine homogene Grenzschicht liegt, desto mehr Kohlenstoff kann gespeichert werden. Zusätzlich lagert sich abgestorbene Biomasse auf dem Ozeangrund als Sediment an (*“biological pumping“*).

Der Fluss von Kohlenstoff bei Vulkanausbrüchen in die Atmosphäre beträgt 0.1 Pg/Jahr. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die bekanntermaßen seit dem Beginn der Industrialisierung kontinuierlich zunimmt, trägt derzeit 7.7 Pg/Jahr bei. Hinzu kommen 1.1 Pg/Jahr, die durch Landnutzungsänderungen und Abholzung der Wälder in die Atmosphäre gelangen. Demnach kann der anthropogene Einfluss hier auf 8.8 Pg/Jahr bemessen werden. Im folgenden Abschnitt werden der Einfluss und die Folgen einer erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre näher erläutert.

2.3 CO₂ und Klimawandel

Seit der Industrialisierung werden verstärkt Treibhausgase, vor allem CO₂, in die Atmosphäre emittiert, was eine Verstärkung des Treibhauseffektes zur Folge hat. Diese Verstärkung wird auch als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet. Anthropogene Quellen von CO₂ sind vor allem die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) sowie die Änderungen der Landnutzung, z. B. durch Rodung von Wäldern. Bedauerlicherweise ist das Wissen über die Quellen und Senken von CO₂ lückenhaft.

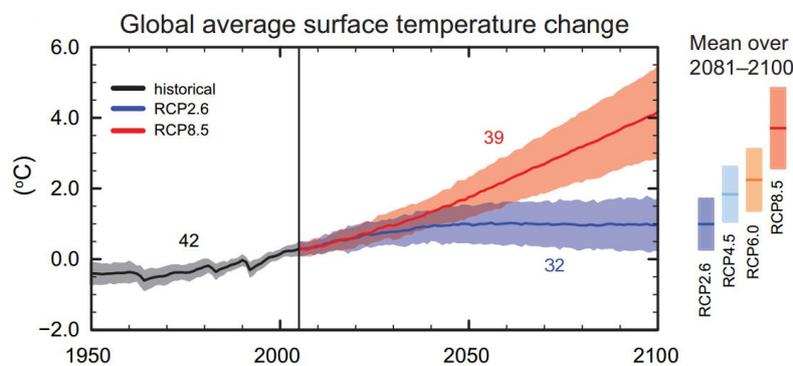


Abbildung 2.3: Die modellierte globale Bodenerwärmung. Die Simulationen beruhen auf verschiedenen Szenarien (IPCC *et al.*, 2013)

CO₂ hat als Treibhausgas, da es den Strahlungstransport beeinflusst, einen Einfluss auf das Klima. Die Änderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist somit ein Klimaantrieb. Die Wirkung dieses Klimaantriebes wird, abhängig von den internen Rückkopplungsmechanismen, entweder verstärkt oder abgeschwächt. Zu den wichtigsten atmosphärischen Rückkopplungsmechanismen zählen die Wasserdampf-Rückkopplung,

die Albedo-Rückkopplung, die Wolken-Rückkopplung sowie die Temperatur-Gradient-Rückkopplung. Um verlässliche Klimavorhersagen treffen zu können, müssen die Prozesse, die diese Rückkopplungsmechanismen verursachen, genau verstanden werden. Diese Vorhersagen beinhalten zudem verschiedene, in Abbildung 2.3 dargestellte, Szenarien, die zum Beispiel von dem Maß der Reduzierung der globalen CO₂-Emission abhängen. Jedes der gezeigten Szenarien beinhaltet eine bestimmte Annahme über die zukünftige CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Je mehr CO₂-Moleküle in der Atmosphäre vorhanden sind, desto größer ist der Anstieg der globalen Bodentemperatur.

Laut dem fünften Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)-Bericht ist die aktuelle Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre die höchste seit 800.000 Jahren. Die derzeitige CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hat im Vergleich mit der vor-industriellen CO₂-Konzentration um 40 % zugenommen. Auch der CO₂-Gehalt in den Ozeanen und Meeren ist gestiegen, was zu einer Erhöhung des pH-Wertes um 0.1 geführt hat. Wetterextreme werden in Zukunft zunehmen, und der Ozean wird sich weiter erwärmen, wodurch höchstwahrscheinlich eine Abschwächung des Golfstroms verursacht wird. Gleichzeitig wird der Meeresspiegel, abhängig von dem eintreffenden Szenario zwischen 26 cm und 82 cm ansteigen. Gerade in Europa wird die Zahl der Hochwasser an Flüssen und Küsten zunehmen.

Zwecks Abwendung dieser Entwicklungen gab es bereits zahlreiche Klimakonferenzen mit dem Ziel der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. Bisher jedoch mit mäßigem Erfolg. Um genauere Klimavorhersagen treffen zu können, müssen die Quellen und Senken von CO₂ genau bekannt sein. Dieses Ziel wird unter anderem durch präzise und akkurate Messung der atmosphärischen CO₂-Konzentration verfolgt. In dem folgenden Abschnitt werden mehrere Messtechniken dargestellt.

2.4 Messtechniken von CO₂

Um Informationen über die Quellen und Senken des CO₂-Moleküles zu erhalten, ist es notwendig, möglichst genaue Messverfahren anzuwenden.

Diese Messverfahren lassen sich in zwei grundlegende Gruppen unterteilen. Die in dem ersten folgenden Abschnitt beschriebenen Messtechniken messen die Konzentration der CO₂-Moleküle in der Atmosphäre.

Die Ergebnisse dieser Messungen werden teilweise von Modellen, die die atmosphärische CO₂-Konzentration simulieren, assimiliert. Diese Messungen weisen jedoch eine nur geringe räumliche Abdeckung auf. Satelliteninstrumente hingegen haben eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung und können, wenn sie eine hohe Sensitivität am Boden besitzen, Informationen über Quellen und Senken liefern. Genauer wird dies in dem zweiten Abschnitt und dem folgenden Kapitel beschrieben.

2.4.1 Bodennahe Messungen

In diesem Kapitel werden die drei Messverfahren der Flaschenmessungen, der kontinuierlichen Messungen und der *Tall Tower*- Messungen beschrieben. Jene drei Messwertquellen bilden ein globales Messnetzwerk, wie beispielsweise das der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Diese Messnetzwerke haben den Vorteil der hohen Genauigkeit ihrer Messungen. Ein Nachteil ist jedoch, dass teilweise große räumliche Distanzen zwischen den Messstationen liegen.

Flaschenmessungen

Seit 1958 werden Flaschenmessungen beispielsweise auf Mauna Loa durchgeführt, um Hintergrund- CO₂- Konzentrationen mit einer Genauigkeit von unter 0.2ppm zu messen. Diese Messungen, die von Charles David Keeling (“Keeling-Kurve“) aufgenommen wurden, gehen bis in das Jahr 1958 zurück.

Die an den Messstationen gesammelte Luft wird im Labor analysiert. Dies geschieht in periodischen Abständen täglich, wöchentlich oder zwei-wöchentlich.

Wie das Earth System Research Laboratory (ESRL) von NOAA auf deren Internetseite (http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/about/co2_measurements.html) erläutert, wird für die Messung die vorher gesammelte Luft in eine schmale, zylindrische Zelle gepumpt, die an beiden Enden durch Fenster abgeschlossen ist. Danach wird durch eines dieser Fenster Infrarotlicht transmittiert, welches so in die Zelle und somit zum Detektor am anderen Ende der Zelle gelangt. Da CO₂ Licht im infraroten Spektralbereich absorbiert, kann mithilfe des Intensitätsverlustes des Lichtes nach dem Passieren der Zelle auf die in der Zelle vorliegende CO₂-Konzentration geschlossen werden. Das Detektorsignal wird in Volt angegeben, woraus mithilfe einer vorher erstellten Kalibrierungskurve die CO₂-Konzentration ermittelt wird.

Für die Messung müssen die Temperatur, der Druck und die Durchflussrate genauestens überprüft werden. Daher werden regelmäßig Kalibrierungsmessungen mit Gasen durchgeführt, deren CO₂-Konzentrationen bekannt sind. Für jede dieser drei Kalibrierungsgase wird eine Spannungsmessung durchgeführt, die dann gemeinsam die Kalibrierungskurve liefern (ESRL, 2008).

Kontinuierliche Messungen

Die zeitliche Abdeckung der im Labor vorgenommenen Flaschenmessungen ist typischerweise relativ gering und bietet keine Möglichkeit, die täglichen CO₂-Konzentrationszyklen in der Atmosphäre aufzunehmen. Aus diesem Grund werden zusätzlich die im Folgenden beschriebenen kontinuierlichen Messungen durchgeführt.

An Messstationen, die kontinuierliche Messungen vornehmen, werden die CO₂-Konzentrationen direkt vor Ort gemessen. Nahezu jedes gasförmige Molekül hat ein spezifisches Absorptionsspektrum im nahinfraroten Spektralbereich. Aus der Stärke der Absorption

kann die Konzentration dieses Gases in der Atmosphäre bestimmt werden. Da jedoch konventionelle Infrarot-Spektrometer die sehr geringe Absorption der Spurengase nicht messen können, wird die "Cavity Ring- Down"- Spektroskopie (Picarro, 2014) angewendet, deren Sensitivität, durch den sehr langen Lichtweg von über 20 km, nicht auf wenige ppm begrenzt ist.

Ein Laserstrahl mit einer bestimmten Frequenz gelangt in die Zelle, in der die Luft-Probe mit dem entsprechenden Spurengas enthalten ist. In dieser Zelle befinden sich drei hochreflektierende Spiegel (Reflexionsrate: 99.999 %). Wird der Laser angeschaltet, beschneidet dessen Strahl ein die Zelle füllendes Dreieck. Ist die Intensität in der Zelle hoch genug (innerhalb einiger Microsekunden), wird der Laser ausgeschaltet. Das in der Zelle verbleibende Licht beginnt mit jeder Reflexion 0.001 % der eingestrahnten Intensität zu verlieren. Dies führt neben dem kontinuierlichen Intensitätsverlust zu einem exponentiellen Abfall der Intensität des Lichtes in der Zelle. Ist jedoch ein absorbierendes Gas in der Zelle, wird diesen zwei Ursachen des Intensitätsverlustes eine weitere hinzugefügt. Die Absorption des Gases beschleunigt den exponentiellen Intensitätsabfall. Die Zeiten, bei denen die Intensität die Null erreicht, werden für die Zelle mit und ohne Spurengas kontinuierlich miteinander verglichen. Die Konzentration des Gases in der Zelle kann dann aus der Differenz dieser Zeiten ermittelt werden.

Nähere Informationen über die "Cavity Ring- Down"- Spektroskopie können der Internetseite von *Picarro* entnommen werden.

Die CO₂-Konzentration am Boden wird stark von lokalen Quellen und Senken beeinflusst. Um diesen Einfluss weitestgehend zu umgehen, werden die Flaschen- sowie die kontinuierlichen Messungen ebenfalls auf den im folgenden Abschnitt beschriebenen *Tall Tower* durchgeführt.

***Tall Tower*- Messungen**

Tall Tower dienen zum Einen der Berechnung des CO₂-Flusses in der atmosphärischen Grenzschicht, zum Anderen werden auf ihnen Flaschenmessungen und kontinuierliche Messungen durchgeführt. Für die Messungen auf den hohen Türmen (sog. *Tall Tower*) des Messnetzwerkes von NOAA werden teilweise Fernseh-, Radiotürme, sowie Telefonmasten verwendet (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/towers/>).

Die Höhe der Tower bietet den Vorteil, dass im Vergleich zu den Bodenmessungen, größere Gebiete untersucht werden können. Da die Luft sich beim Aufsteigen vermischt, nimmt mit der Höhe der aufgenommenen Messung ebenfalls das analysierte Gebiet der Bodenflüsse zu. Aus diesem Grund werden immer höhere Türme angestrebt. Bisher reichen die höchsten in dem Messnetzwerk von NOAA assimilierten Tower 500 m in die Höhe.

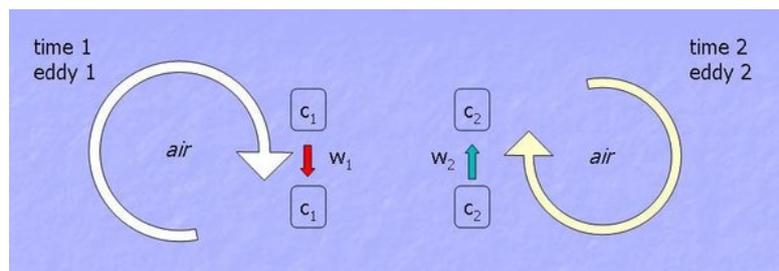


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der *Eddy Kovarianz*-Methode zur Messung der CO₂-Flüsse (Burba, 2013).

Um regionale CO₂- Flüsse berechnen zu können, wird unter anderem die sogenannte *Eddy Kovarianz*-Methode (Burba, 2013) verwendet.

Der Wind kann als eine sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegenden Luftmasse, zusammengesetzt aus zahlreichen sich drehenden Wirbeln unterschiedlicher Größe interpretiert werden. Jeder dieser Wirbel besitzt eine horizontale sowie eine vertikale Komponente. Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, existiert zum Zeitpunkt 1 an einer Messstelle des Towers ein Wirbel (eddy 1), dessen vertikale Komponente das Luftpaket mit der entsprechenden Geschwindigkeit w_1 nach unten bewegt. Zum Zeitpunkt 2 ändert sich die Richtung der vertikalen Komponente und das Luftpaket wird mit Geschwindigkeit w_2 den Turm hinauf bewegt. Jedes dieser Luftpakete ist durch seine eigene CO₂-Konzentration, seinen eigenen Druck, die eigene Temperatur und Luftfeuchtigkeit charakterisiert. Unter der Voraussetzung, dass alle diese Größen bekannt sind, können die vorhandenen Flüsse bestimmt werden. Demnach kann der vertikale Fluss als eine Kovarianz der vertikalen Windkomponente und der CO₂-Konzentration dargestellt werden.

2.4.2 Satellitenmessungen

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen in-situ-Messungen, erhalten Satelliten von außerhalb der zu untersuchenden Atmosphäre Aufschlüsse über den vorliegenden CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Ihr Messverfahren ist in der Lage, global Messwerte aufzunehmen und verfügt daher über eine wesentlich größere Abdeckung als die im Vorherigen beschriebenen Messnetzwerke. Diese Messnetzwerke liefern bisher genauere Messwerte als die Satellitenmessungen es können.

Die Satelliten leiten aus dem gemessenen Absorptionsspektrum die säulengemittelte CO₂-Konzentration ab. Durch die Messung im sichtbaren (VIS) und kurzwelligen infraroten (SWIR) Spektralbereich reagieren diese Instrumente mit einer hohen Sensitivität auf Änderungen der CO₂-Konzentration am Boden, wo sich die Quellen und Senken von CO₂ befinden. Unter diesen Fernerkundungsinstrumenten gibt es zwei grundlegende Unterschiede. Die einen arbeiten passiv, indem sie das Absorptionsspektrum des Sonnenlichtes, welches die Atmosphäre passiert, betrachten, während die anderen aktiv Laserstrahlen aussenden und das reflektierte Spektrum auswerten. Zurzeit befindet sich

allerdings noch kein aktives Messinstrument im All.

Zu den passiven Fernerkundungsinstrumenten gehören unter anderem SCIAMACHY und GOSAT, die sich in ihrer Arbeitsweise ebenfalls unterscheiden. SCIAMACHY ist ein Gitterspektroskop, während GOSAT ein Fouriertransformspektrometer ist. Zudem ist eine neue Satellitenmission, OCO-2, vor Kurzem gestartet. Des Weiteren sind die Satelliten GOSAT 2 und CarbonSat in Planung.

In dieser Arbeit werden die Messdaten des SCIAMACHY-Instruments verwendet und ausgewertet. Im nächsten Kapitel wird unter anderem der Weg von den Messdaten zum gesuchten XCO₂ genauer beschrieben.

Kapitel 3

Satelliten- und Modelldaten

3.1 SCIAMACHY



Abbildung 3.1: Der Umweltsatellit Envisat mit dem Spektrometer SCIAMACHY (Gottwald & Bovensmann, 2011)

Der in Abbildung 3.1 dargestellte Satellit ENVISAT, auf dem sich das Spektrometer SCIAMACHY befindet, war ein Umweltsatellit, dessen Betreiber die Europäische Welt- raumorganisation ESA ist. Envisat flog von März 2002 bis April 2012 in einer Höhe von 800 km um die Erde, nachdem dieser von einer Ariane-5-Trägerrakete auf eine polare Umlaufbahn gebracht wurde (<http://www.sciamachy.org/>).

Ziel von SCIAMACHY innerhalb dieser Satellitenmission war unter anderem die Unter- suchung der Auswirkung des anthropogenen Einflusses und der natürlichen Prozesse auf das troposphärische Ozon, die Luftqualität und auf die globale Erwärmung. Zudem wur- den neben Austauschprozessen zwischen der Strato- und Troposphäre, die chemischen und dynamischen Wechselwirkungsprozesse der Stratosphäre untersucht. SCIAMACHY hat dafür gestreute, transmittierte und von der Erdatmosphäre reflektierte Sonnenstrah- lung innerhalb eines Wellenlängenbereiches von 240 nm bis 2380 nm gemessen. Die solare Radianz wurde mithilfe des im Spektrometer befindlichen Beugungsgitters in acht Kanäle, die einen Spektralbereich vom sichtbaren UV-Licht bis hin zum SWIR-Licht abdecken,

aufgespalten.

Im Nadir-Modus, bei dem die Atmosphäre direkt unter dem Satelliten betrachtet wird, beträgt das optische Sichtfeld typischerweise $\pm 32^\circ$ relativ zur Flugbahn und die räumliche Auflösung $30 \times 60 \text{ km}^2$

Weitere Informationen über SCIAMACHY können dem Buch von Gottwald et al., (2011) und der Internetseite von SCIAMACHY (SCIAMACHY, 2012) entnommen werden.

3.1.1 Auswertungsalgorithmen

Um die Fernerkundungsmessungen der Satelliten auswerten zu können, gibt es verschiedene Auswertungsalgorithmen. Zum Einen können auf Geschwindigkeit optimierte “Proxy“-Algorithmen, wie der Weighting Function Modified-DOAS (WFM-DOAS)-Algorithmus ((Schneising *et al.*, 2012);(Heymann *et al.*, 2012a)), verwendet werden, zum Anderen existieren sogenannte “full physics“-Algorithmen, wie beispielsweise BESD. WFM-DOAS und BESD sind die Auswertalgorithmen des Spektroskops SCIAMACHY. Der Unterschied zwischen den “Proxy“- und den “full physics“-Algorithmen besteht darin, dass die “full physics“-Algorithmen im Gegensatz zu den “Proxy“-Algorithmen die Streuung der Strahlung an Molekülen, Aerosolen und Wolken explizit berücksichtigen. Die “Proxy“-Algorithmen dagegen nehmen an, dass die Strahlung im CO_2 - und O_2 -Band den gleichen Lichtweg zurücklegen, sodass mithilfe der Gleichung $X\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^C}{\text{O}_2^C} \cdot X\text{O}_2$ der Einfluss der Streuung reduziert werden kann.

Die Auswertungsalgorithmen verfahren meist nach dem selben Prinzip. Das von dem Satelliteninstrument gemessene Spektrum der zurückgestreuten Sonnenstrahlung wird im nahen Infrarotbereich in den Absorptionsbanden von CO_2 und O_2 gemessen. Mithilfe eines Strahlungstransportmodells und des entsprechenden Instrumentenmodells (Vorwärtsmodell) wird eine Satellitenmessung für eine bestimmte Anzahl bekannter und unbekannter Parameter simuliert. Eine Inversionstechnik, die von Algorithmus zu Algorithmus variiert, dient der Findung des Zustandsvektors, welcher mit den gemessenen Radianzen am besten übereinstimmt. Von diesem neuen Zustandsvektor wird nun angenommen, dass er den wahren, atmosphärischen Zustand repräsentiert.

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem BESD-Algorithmus.

3.1.2 Der Auswertalgorithmus Bremen Optimal Estimation DOAS

Der Bremen Optimal Estimation DOAS (BESD)- Algorithmus ((Reuter *et al.*, 2010),(Reuter *et al.*, 2011), (Reuter *et al.*, 2014)) dient der Auswertung der Messungen von SCIAMACHY um das $X\text{CO}_2$ zu bestimmen. Dieser Algorithmus wertet die Nadirmessungen der von der Erde reflektierten Sonnenstrahlung in dem CO_2 -Absorptionsband (1558 nm-1594 nm) und dem O_2 -A Absorptionsband (755 nm-775 nm) aus.

Das Ziel dieses Algorithmus' ist, die durch Streuung verursachten Fehler auf das XCO₂ zu reduzieren. Dabei sind optisch dünne Wolken eine der wahrscheinlichsten Fehlerquellen. Um lediglich wolkenfreie Pixel von SCIAMACHY bei der Auswertung zu berücksichtigen, werden die Messwerte mithilfe des MERIS Wolkendetektions-Algorithmus' gefiltert. Des Weiteren werden nur Pixel, die vollständig mit Land gefüllt sind, deren Oberflächenrauheit unter 0.5 km und deren Sonnenzenithwinkel unter 70° liegt, berücksichtigt. Wie genau die Daten gefiltert werden, kann im ATBD (Reuter *et al.*, 2014) nachgelesen werden.

SCIAMACHY misst die Radianz der Sonnenstrahlung für 137 Wellenlängen. Die sonnennormierte Radianz bildet den Inputvektor \vec{y} . Die Berechnung der XCO₂-Werte basiert auf der Methode der optimalen Anpassung. Für die Berechnung wird das Vorwärtsmodell \mathbf{F} verwendet, das für einen gegebenen Zustandsvektor ein SCIAMACHY-Spektrum simuliert. Für die Berechnung dieses Spektrums wird das SCIATRAN 3.1-Modell (Rozanov *et al.*, 2005) verwendet. Als Input für dieses Modell dienen der Zustandsvektor \vec{x} und der Parametervektor \vec{b} . Der Zustandsvektor \vec{x} beinhaltet 26 Variablen, wie beispielsweise die Albedo, den Bodendruck, die Wolkenhöhe, drei Streuparameter sowie das XCO₂-Mischungsverhältnis innerhalb verschiedener Druckniveaus, die aus der Messung gewonnen werden sollen. Alle diese Parameter beeinflussen das Spektrum des reflektierten Sonnenlichtes. Als weiteren Input für das Vorwärtsmodell \mathbf{F} dient der Parametervektor \vec{b} , der Profile der Temperatur, des Druckes und der Luftfeuchtigkeit basierend auf den ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)-Daten enthält. \vec{b} enthält auch die als bekannt angenommenen Streuparameter, die mit dem Strahlungstransport zusammenhängen. Die gemessene Radianz \vec{y} lässt sich schreiben als:

$$\vec{y} = \mathbf{F}(\vec{x}, \vec{b}) + \varepsilon$$

wobei ε für den Mess- und Modellfehler steht. Den wahrscheinlichsten Zustandsvektor \vec{x} erhält man durch Minimieren der Kostenfunktion χ^2 .

$$\chi^2 = (\vec{y} - \mathbf{F}(\vec{x}, \vec{b}))^T S_\varepsilon^{-1} (\vec{y} - \mathbf{F}(\vec{x}, \vec{b})) + (\vec{x} - \vec{x}_a)^T S_a^{-1} (\vec{x} - \vec{x}_a)$$

S_ε ist die zu dem entsprechenden Zustandsvektor \vec{x} gehörende Fehler-Kovarianz-Matrix. \vec{x}_a ist der Zustandsvektor mit dem a priori-Wissen für jedes Element des Zustandsvektors \vec{x} . S_a stellt die entsprechende a priori-Fehler-Kovarianz-Matrix, die die Unsicherheiten des a priori-Vektors und dessen Kreuzkorrelation beinhaltet, dar. Für die Berechnung des Zustandsvektors \vec{x} wird das Levenberg-Marquardt-Iterationsverfahren verwendet, dessen Iteration mit einem first guess-Vektor \vec{x}_0 startet.

Die Berechnungen des Strahlungstransports des Vorwärtsmodells werden auf 60 Modellniveaus durchgeführt, die für den Zustandsvektor, der lediglich zehn Modellniveaus beinhaltet, interpoliert werden. Das CO₂-Mischungsverhältnis wird nun in zehn atmosphärische Schichten, deren "Abstand" derselben Druckdifferenz entspricht, unterteilt.

Diese Druckniveaus sind durch den Oberflächendruck normiert. Änderungen des Bodendruckes müssen zum Beispiel bezüglich des CO₂-Profils ebenfalls berücksichtigt werden. In den bodennahen Schichten tritt die größte Schwankung der CO₂-Konzentration auf. Unter der Annahme der hydrostatischen Grundgleichung enthält jede Schicht die gleiche Anzahl an Luftmolekülen. Um nun das XCO₂ zu berechnen, wird ein Schicht-Gewichtungs-Vektor \vec{w} verwendet, der für alle Einträge des Zustandsvektors, die keine Informationen über die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liefern, eine 0 enthält. Für die 10 Einträge des XCO₂-Mischungsverhältnisprofils enthält er eine 0.1, was dem Verhältnis der Luftmoleküle in der Schicht zu der Gesamtanzahl der Luftmoleküle innerhalb der gesamten Säule entspricht. Daraus folgt für die Berechnung von XCO₂:

$$XCO_2 = \vec{w}^T \vec{x}$$

3.2 Modelle zur Simulation von atmosphärischem CO₂

Trotz der vielen Messstationen ist die räumliche Abdeckung der Gesamtheit dieser Stationen nicht ausreichend, um die Unsicherheit der Quellen und Senken von CO₂ in dem gewünschten Umfang zu reduzieren.

Zunächst machen die Modelle auf der Grundlage ihres a priori-Wissens Annahmen über die vorhandenen CO₂-Flüsse, welche dem verwendeten Transportmodell als Input dienen. Die Ergebnisse sind simulierte, globale CO₂-Felder, die mit den gemessenen CO₂-Werten verglichen werden. Sollten diese voneinander abweichen, werden die CO₂-Flüsse in ihrer Stärke soweit angepasst, bis die simulierten CO₂-Werte den gemessenen CO₂ am besten übereinstimmen. Diese Anpassung erfolgt mithilfe eines Iterationsverfahrens.

Um die Modelldaten mit den Satellitendaten vergleichen zu können, muss unter anderem bekannt sein, welche Kriterien die Modelle an die Messwerte stellen, welche Transportmodelle sie verwenden und wie groß ihre zeitliche und räumliche Abtastung ist. Im Folgenden werden die hier verwendeten Modelle LSCE MACC v2012, MPI BGC JENA ANA96 v3.4 und NOAA CarbonTracker v2011 charakterisiert und auf ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht.

3.2.1 Das LSCE MACC-Modell

Das LSCE-Modell analysiert XCO₂-Messwerte seit 1988 und ist somit das Modell mit der längsten Messzeit ((Chevallier *et al.*, 2010)). Diese Messwerte stammen, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, von 128 Messstationen, die von drei großen Messnetzwerken assimiliert werden: NOAA Earth System Research Laboratory (ESRL), CarboEurope IP Projekt, und von dem World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) der World Meteorological Organization (WMO) des Global Atmosphere Watch Programms. Sie beinhalten in situ-Messungen, die von kontinuierlichen Messungen und Flaschenmessungen stammen. Bei Turmmessungen wird lediglich der höchstgelegene Messwert berücksichtigt, da

dieser repräsentativ für das Mischungsverhältnis der mittleren Grenzschicht ist und mithilfe des verwendeten globalen Transportmodells einfacher als ein Mischungsverhältnis am Boden zu reproduzieren ist. Es werden alle Stationen berücksichtigt, die länger als fünf Jahre an einem Standort, unabhängig von der betreibenden Organisation und der Messtechnik, Messungen durchführten.

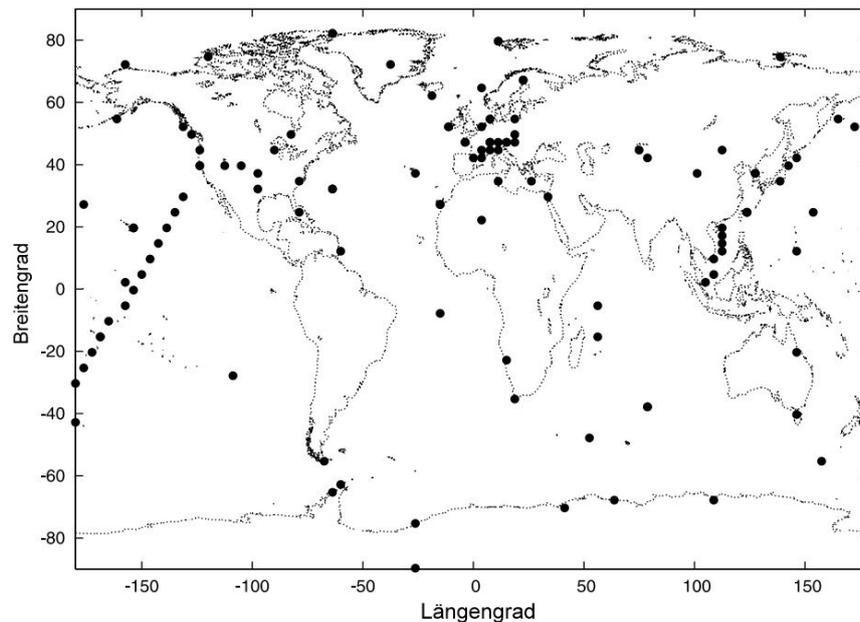


Abbildung 3.2: Karte aller Messstationen, deren Daten von dem Modell LSCE MACC v2012 assimiliert werden (Chevallier *et al.*(2010))

Für kontinuierliche Messungen, deren Messstationen unter 1000 m über N.N. liegen, werden die Stunden zwischen 12:00 und 20:00 lokaler Sonnenzeit ausgenutzt. Über 1000 m werden die Messungen zwischen 01 : 00 und 06 : 00 lokaler Sonnenzeit berücksichtigt. Des Weiteren werden Daten, die der Validierung dienen, mithilfe von 34 unabhängigen Flugzeugmessungs-Kampagnen aus der GEOMON Datensammlung (GEOMON, 2010) und dem Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner (CONTRAIL) Projekt (Machida *et al.*, 2008) verwendet. Die Messwerte liegen als Mischungsverhältnisse, bei denen der Anteil der Wassermoleküle in der Atmosphäre nicht berücksichtigt wird (“dry air“), vor.

Die Berechnung der atmosphärischen CO₂-Flüsse basiert auf einem Bayesischen Variationsinversions-Verfahren beschrieben von (Chevallier *et al.*, 2005) dessen räumliche und zeitliche Auflösung acht Tage und $3.75^\circ \times 2.5^\circ$ (Breiten-, Längengrad) beträgt. Das Modell schätzt die atmosphärischen CO₂-Flüsse für 19 Schichten zwischen dem Boden und der Maximalhöhe der Atmosphäre ab.

Mithilfe der vierten Version des globalen atmosphärischen Transportmodells des Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDZ) (Hourdin *et al.*, 2006) werden die CO₂-Flüsse auf der Grundlage des in dem Modell verwendeten a priori-Wissens simuliert. Die a priori Informationen über die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammen aus der EDGAR3.2 Fast Track 2000 Emissionsdatenbank (Olivier *et al.*, 2001), deren Werte durch die jährlichen, globalen Gesamtwerte des Carbon Dioxide Information Analysis Center skaliert werden. Der Atmosphären-Ozean-Austausch der CO₂-Moleküle wird mithilfe des Klimamodells der Atmosphären-Ozean-CO₂-Partialdruckdifferenz von (Takahashi *et al.*, 2009) beschrieben. Mithilfe des Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) Modells von (Krinner *et al.*, 2005) wird die Wechselwirkung der Atmosphäre mit der Biosphäre bezüglich des CO₂-Moleküls in das Modell mit einbezogen. Bei den CO₂-Flüssen von ORCHIDEE werden weder Änderungen der Landflächennutzung noch Waldfeuer berücksichtigt. Diese a priori-Informationen werden jedoch seit 1997 von der zweiten Version der Global Fire Emission Database (GFEDv2, (Randerson *et al.*, 2007)) dem LSCE- Modell hinzugefügt.

Eine ausführlichere Beschreibung des LSCE MACC-Modells ist in Chevallier *et al.*, (2010) zu finden.

3.2.2 Das MPI BGC JENA ANA96-Modell

In dem MPI BGC JENA ANA96-Modell von Martin Heimann, Stefan Körner (2003) und Christian Rödenbeck (2005) wird das atmosphärische Transportmodell TM3 verwendet, welches auf analysierten meteorologischen Daten (NCEP) basiert. Das TM3 ist in der räumlichen Auflösung seiner Simulationen variabel. Diese reicht von einer groben Rasterung von 10° x 7.5° bis zu einer feinen Auflösung von 1.125° x 1.118°. Die vertikale Unterteilung reicht von neun bis zu 31 Schichten. Für das Inversionsverfahren wird die Bayesche Methode angewendet. Die räumliche Auflösung dieses Modells beträgt über Land 4° x 5° und über dem Ozean ca. 8° x 10°.

Bei der Datenauswahl wird die Intention verfolgt, so viele Daten wie möglich in das Modell zu integrieren. Für Aufnahmen von kontinentalen Messstationen werden, da das verwendete Transportmodell nachts teilweise fehlerhafte Werte liefert, meist nur Messungen, die am Tage aufgenommen werden, verwendet. Bei den kontinuierlichen Messungen werden stündliche, halbstündliche oder abhängig von den erhaltenen Werten Mittelwerte gebildet, die dann in das Modell integriert werden. Neben den kontinuierlichen Messungen werden zudem Flaschenmessungen verwendet, die für jede Stunde einen Mittelwert liefern, der als individueller Datenpunkt in das Modell eingeht. In Abbildung 3.3 sind alle assimilierten Messstationen zusammengefasst.

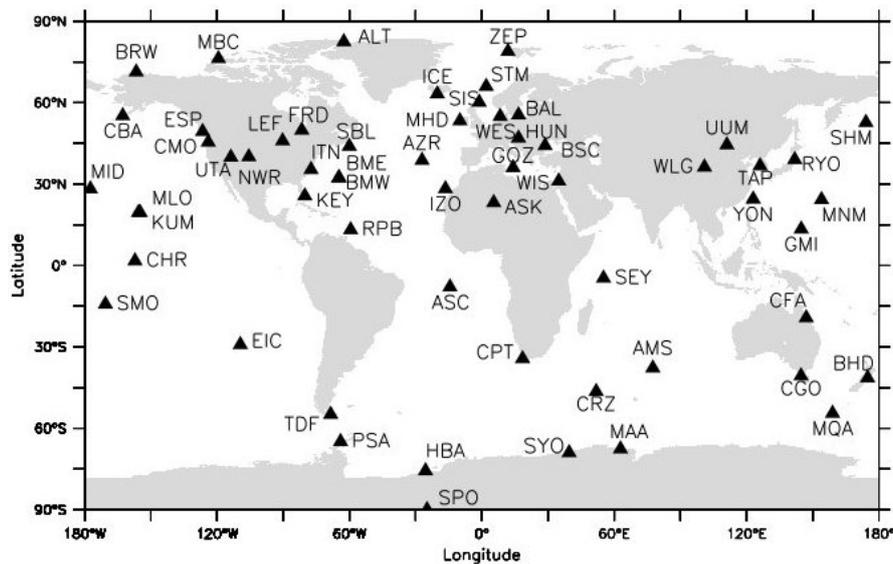


Abbildung 3.3: Karte der assimilierten Messstationen des Modell MPI BGC JENA ANA96. Die Kürzel bezeichnen die einzelnen Messstationen, wobei CFA beispielsweise für Cape Ferguson Australia steht (Rödenbeck, 2005)

In dem Modell werden drei a priori-Fluss-Modelle betrachtet. Die CO₂-Flüsse, die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen, werden durch die EDGAR Datensammlung (Olivier *et al.*, 2001) in das MPI-Modell eingebunden. Die a priori-Informationen über die biosphärischen Flüsse stammen aus dem LPJ Biosphären-Modell (Sitch *et al.*, 2003). Der Austausch von CO₂ zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen wird durch Daten von (Gloor *et al.*, 2003) und mithilfe des Modells von (Takahashi *et al.*, 1999) und (Wanninkhof, 1992) berücksichtigt.

Eine detailliertere Beschreibung dieses Modells ist Rödenbeck (2005) zu entnehmen.

3.2.3 Das CarbonTracker-Modell

CarbonTracker ist ein weiteres Modell, welches die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre untersucht, um auf die vorhandenen Bodenflüsse von CO₂ zurückzuschließen. CarbonTracker setzt sich wie die anderen Modelle ebenfalls aus Messungen, a priori-Wissen, einer Inversionstechnik und einem Transport-Modell zusammen. Das CarbonTracker-Modell hat eine räumliche Auflösung von 3° x 2° und eine zeitliche von drei Stunden. Das von CarbonTracker verwendete Transportmodell TM5, welches auf den a priori-Daten basierend die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen simuliert, kann jedoch in manchen Regionen, beispielsweise Nordamerika, aus kleineren Gittern mit einer Abmessung von 1° x 1° bestehen. Für diese Regionen wird alle 10 Minuten ein Wert für die CO₂-Flüsse simuliert.

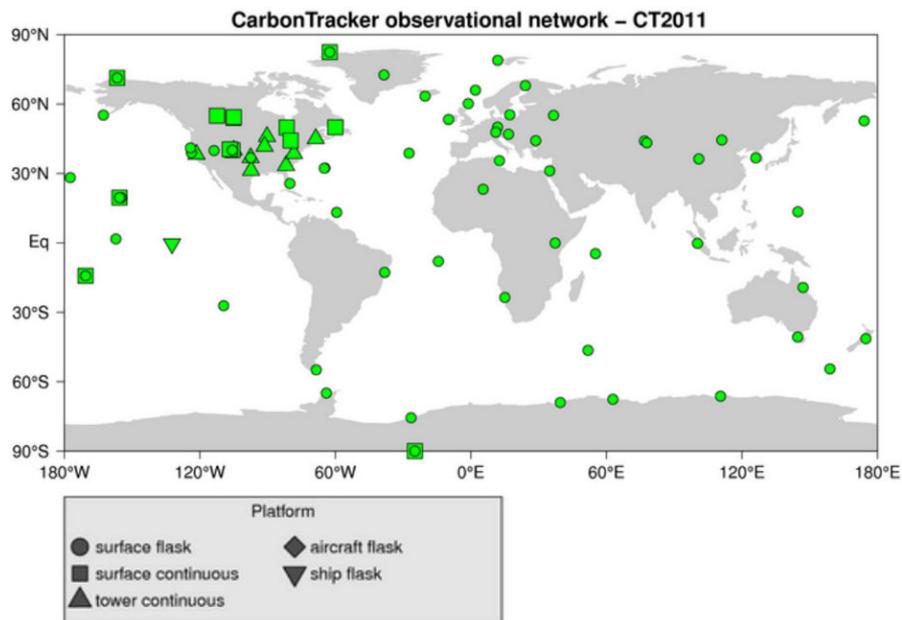


Abbildung 3.4: Karte der assimilierten Messstationen des CarbonTracker- Modells aus der Dokumentation auf <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/CT2011/documentation.html>

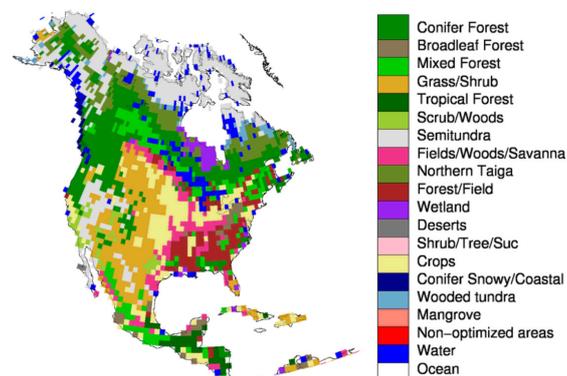


Abbildung 3.5: Einteilung Nordamerikas in seine Ökosystem-Regionen aus der Dokumentation (CarbonTracker-Dokumentation, 2011)

TM5 erhält seine Daten für die vorhandenen Winde und Zirkulationen von dem ECMWF-Wetterreanalyse-Modell. Vor 2006 beinhaltete das Modell lediglich 60 Atmosphärenschichten, die danach auf 91 Schichten erweitert wurden.

Die CarbonTracker-Daten für Landflächen setzen sich, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, aus Messungen von Messtürmen, Flaschenmessungen und kontinuierlichen Bodenmessungen zusammen. CarbonTracker verwendet Messungen von Bodenstationen des NO-

AA ESRL Cooperative Global Air Sampling Netzwerkes von dem CSIRO Air Sampling Netzwerk und von dem IPEN-CQMA sampling Programm. Flugzeugmessungen werden nicht assimiliert, sondern lediglich zur Überprüfung der CarbonTracker-Ergebnisse genutzt. Als Biosphären-Modell wird hier das Carnegie-Ames Stanford Approach (CASA) verwendet. Dieses Biosphären-Modell liefert monatlich globale Flüsse mit einer räumlichen Auflösung von 1° x 1°.

Um atmosphärische CO₂-Flüsse vorhersagen zu können, nutzt das CarbonTracker-Modell ein Verfahren bei dem die Landflächen der Erde unter anderem in Ökosystem-Regionen unterteilt wird, denen ein charakteristischer CO₂-Fluss entspricht. Wie in Abbildung 3.5 angedeutet, können in einer Region wie Nordamerika bis zu 19 Ökosystem-Regionen vertreten sein.

Weitere Informationen über dieses Modell können der entsprechenden Dokumentation des CarbonTracker-Modells entnommen werden.

Kapitel 4

Vergleichsmethode

4.1 Stand der Forschung

Ziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden, welches Modell in seinen Werten am besten mit denen des Satelliten übereinstimmt. Dazu wird in diesem Fall die Jahresgangamplitude der XCO_2 -Werte in der Atmosphäre untersucht. Die Jahresgangamplitude ist ein Maß für die Aufnahme und Abgabe von CO_2 -Molekülen. Ziel der heutigen Forschung ist es, diese CO_2 -Flüsse in ihrer Stärke und ihrem Ort genauestens zu kennen. Aus diesem Grund ist die Jahresgangamplitude bei der Untersuchung der CO_2 -Flüsse ein wichtiger, in der derzeitigen Forschung oft fokussierter Parameter.

In 2013 wurde beispielsweise bereits die “peak-to-peak“- XCO_2 - Jahresgangamplitude von einigen Algorithmen und von dem ebenfalls hier verwendeten CarbonTracker v2011-Modell berechnet und miteinander verglichen. Für alle Algorithmen folgte im Vergleich, dass deren Ergebnisse um 1.5 ppm- 2.0 ppm größer waren als die Daten des CT-Modells. Weitere Informationen zu dieser Studie können (Reuter *et al.*, 2011) entnommen werden.

In einer anderen Studie wurden die aus den Spektren, aufgenommen von den Fourier Transform Spektrometern von TCCON (Wunch *et al.*, 2011), ermittelten XCO_2 -Messungen mit CarbonTracker-Daten und vier weiteren Modellen verglichen. Alle diese Modelle unterschätzten die Jahresgangamplitude (“peak-to-peak“) um 1 ppm- 3 ppm (Basu *et al.*, 2011).

Die TCCON-Stationen besitzen im Gegensatz zu dem Satelliten keine globale Abdeckung. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit XCO_2 -Messwerte des Spektrometer SCIAMACHY auf dem Satelliten ENVISAT verwendet. Um einen globalen Überblick über die Übereinstimmung der XCO_2 -Satellitenmessungen mit den derzeit aktuellsten Modellen (LSCE MACC v2012, MPI BGC JENA ANA96 v.3.4 und NOAA CarbonTracker v2011) zu schaffen, werden diese drei Datensätze mit den Messungen von SCIAMACHY verglichen.

4.2 Datenbearbeitung

In den folgenden Abschnitten soll die Methode der verwendeten Datenverarbeitung der vier Datensätze, die für den Vergleich betrachtet werden, erläutert.

Dem Vergleich der vier Datensätze wird das gleiche Sampling vorausgesetzt. Das bedeutet, dass die Parameter, wie beispielsweise Zeit und Längen- und Breitengrad, mit denen die Modelldaten bestimmt wurden, mit den entsprechenden Parametern, die bei der Messung der Satellitendaten vorhanden waren, übereinstimmen. Von dem Satelliten kann ein Datensatz verwendet werden, der neun Jahre (2003- 2011) umfasst. Ebenso von dem LSCE-Modell. Da die beiden anderen Modelle jedoch bloß Werte für die Jahre zwischen 2003 und 2010 Daten beinhalten, bleiben für den Vergleich acht Jahre übrig. Hinzu kommt, dass im Jahre 2003 die Detektortemperatur und das Sichtfeld von SCIAMACHY geändert wurden (Schneising *et al.*, 2011), was die Größe der mit BESD ermittelten Jahresgangamplitude potentiell beeinflusst. Für die im nächsten Abschnitt beschriebene Datenverarbeitung bleiben demnach lediglich die Jahre 2004 bis 2010 der vier Datensätze für den Vergleich.

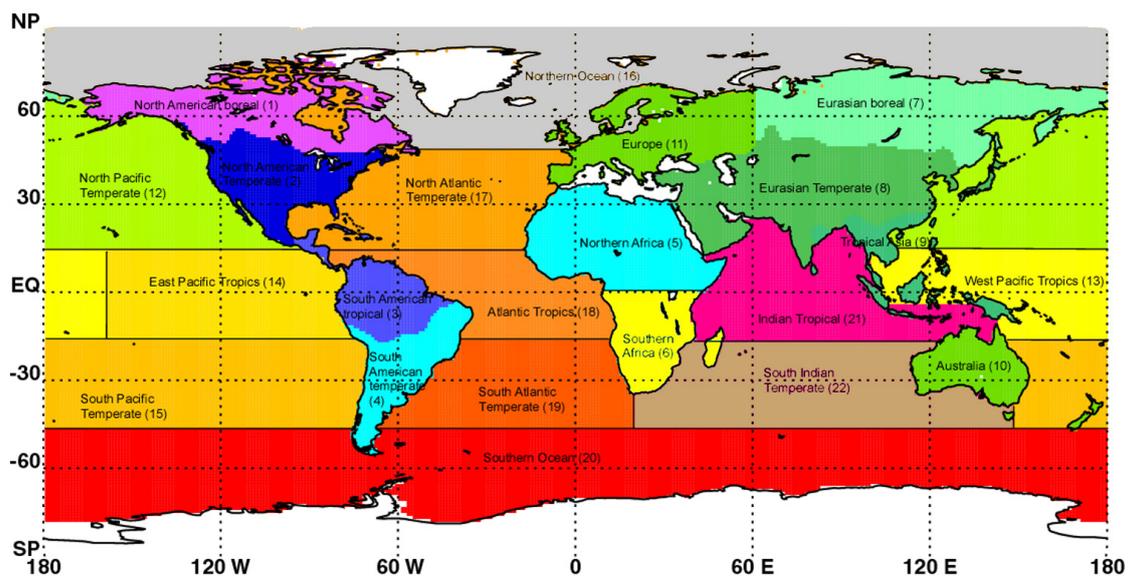


Abbildung 4.1: Die 22 Transcom-Regionen aus (Transcom, 2011)

Um aus dem CO_2 der Modelle das gesuchte XCO_2 zu berechnen, wird ein vertikaler Mittelwert über die Modelldaten gebildet. Dies geschieht durch Gewichtung des Mischungsverhältnisses jeder Schicht durch die in der entsprechenden Schicht vorhandenen

Luftmasse. Folgende Gleichung aus (Basu *et al.*, 2011) beschreibt die Berechnung:

$$XCO_2 = \frac{1}{p_{surface}} \sum_i x_{CO_2}^i (p^i - p^{(i+1)}) \quad (4.1)$$

p^i bezeichnet die unterschiedlichen Druckschichten der Modelle, $p_{surface} = p_0$ ist der Bodendruck und $x_{CO_2}^i$ ist das CO₂-Profil.

Die SCIAMACHY- BESD- Daten haben einen anderen *averaging kernel* als die Modelle. Der *averaging kernel* ist ein Maß für die Sensitivität der CO₂- Messung. Um die Modell- daten dennoch mit den Satellitendaten vergleichen zu können, müssen nach (Rodgers, 2000) den beiden Messverfahren das gleiche a-priori Wissen zugrunde liegen. (Schneising *et al.*, 2012). Vereinfacht gesagt werden die von den Modellen modellierten XCO₂- Profile als gemeinsames a priori- Wissen in BESD genutzt.

Die vier Datensätze sollen in dieser Arbeit für einzelne Regionen verglichen werden. Die Erde, bestehend aus Land- und Ozeanflächen, wird komplett durch 22 Transcom- Regionen dargestellt. Die Grenzen der Landflächen trennen Gebiete unterschiedlicher Ve- getationstypen, die auf [http://transcom.project.asu.edu/transcom03_protocol_ basisMap.php](http://transcom.project.asu.edu/transcom03_protocol_basisMap.php) nachgelesen werden können.

Eine der Transcom-Regionen, wie sie in Abbildung 4.1 dargestellt sind, setzt sich dem- nach aus Flächen ähnlicher Vegetation und damit ähnlichem CO₂-Fluss zusammen. Bei- spielsweise bestehen alle tropischen Transcom-Regionen aus den immergrünen Laub- bäumen und den Laubbäumen, die im Herbst ihre Blätter verlieren. Die Einteilung in Transcom-Regionen bieten den Vorteil der festen Grenzen und die Möglichkeit, Ergeb- nisse, die für diese Regionen berechnet werden, mit anderen Forschungsergebnissen für diese Regionen vergleichen zu können.

Um einen globalen Überblick über die Breitengradabhängigkeit der XCO₂-Werte zu er- halten, werden neben den in Abbildung 4.1 dargestellten 11 Land-Transcom-Regionen sechs weitere Regionen definiert: Norden (0N – 30N), Norden (30N – 60N), Norden (60N – 90N), Norden (90N – 25N), Tropen (25N – 25S) und Süden (25S – 90S).

4.3 Berechnung der Amplitude des XCO₂- Jahresgang

Um die XCO₂- Jahresgangamplitude der vier Datensätze berechnen zu können, werden die Daten den einzelnen Regionen zugeteilt. Dafür müssen die Größe der jeweiligen Area- le, wie sie in Abbildung 4.1 gezeigt werden, und deren genaue geografische Abmessung bekannt sein. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, dass nicht an allen Tagen über jeder Region gemessen wird bzw. Messwerte durch das Qualitätsfiltern des BESD-Algorithmus übrig bleiben.

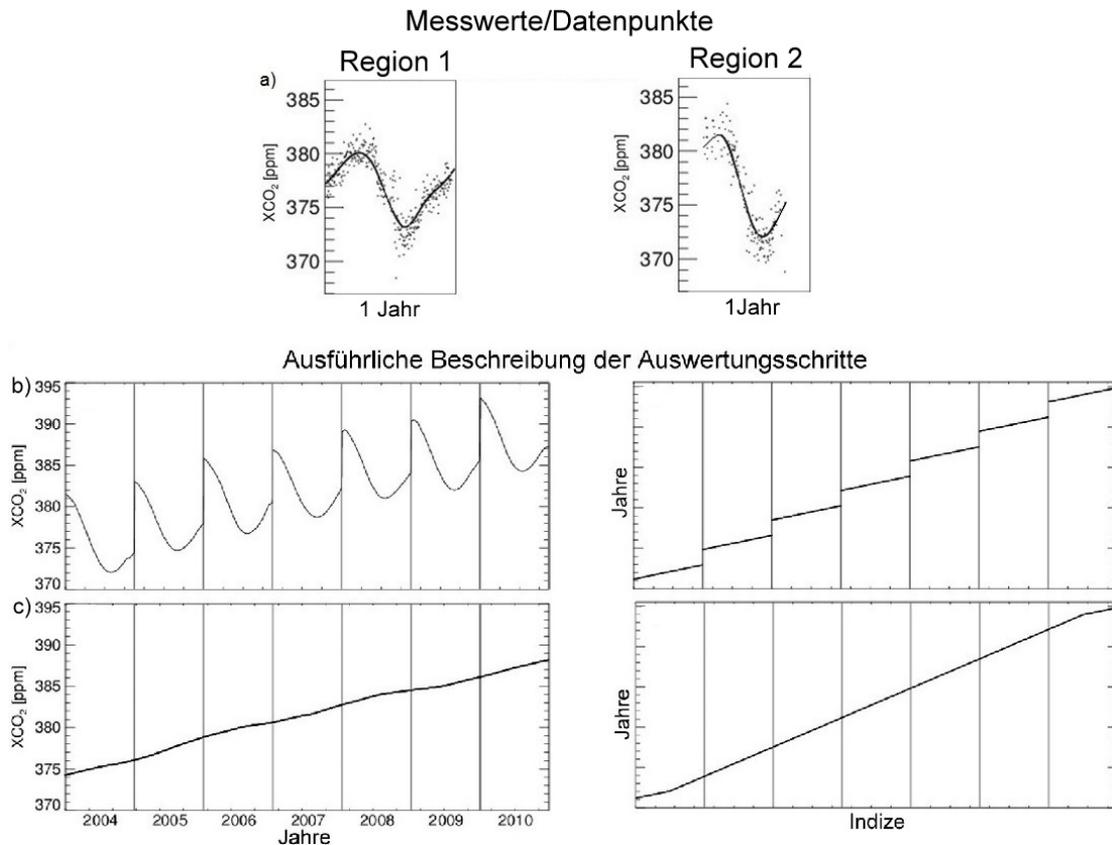


Abbildung 4.2: Darstellung der verwendeten Methode der Datenverarbeitung am Beispiel von zwei Regionen. a) Ursprungsdaten und Ergebnis der Faltung dieser Daten mit dem Hanning-Fenster (zwei Monate effektiv) (Linie), b) ausführliche Beschreibung der Auswertungsschritte für Region 2 über die sieben Jahre der Messdaten des Satelliten, reduzierte Daten- und Index-Vektoren der Region 2, c) die Daten aus den beiden Abbildungen aus b) mit je einer Rechtecksfunktion geglättet.

Bei den XCO₂-Werten sowohl von den Modellen als auch von dem Satelliten tritt Streuung auf. Die Streuung bei den Modelldaten wird verursacht durch kurzzeitige Variabilitäten, die beispielsweise durch den Tagesgang verursacht werden. Bei dem Satelliten führen diese Variabilitäten ebenfalls zu einer Streuung. Der Messfehler überwiegt diese jedoch. Bevor die Jahresgangamplitude berechnet werden kann, muss die Streuung sowohl bei den Modellen, als auch bei dem Satelliten zunächst herausgefiltert werden. Die im Folgenden beschriebene Methode wird hier am Beispiel der SCIAMACHY BESD-Daten erläutert und analog für alle anderen Regionen und die Modelle durchgeführt.

In Abbildung 4.2a) sind die von SCIAMACHY für zwei Regionen gemessenen XCO₂-Werte als tägliche Mittelwerte dargestellt. Im Vergleich der beiden Regionen fällt auf, dass die erste Region für jeden Tag des betrachteten Jahres einen Mittelwert besitzt,

während die andere Region nur in der Jahresmitte Werte aufweist. Das Auswerten der Messwerte beider Regionen soll im Folgenden erläutert werden.

Zunächst soll das in den beiden Abbildungen deutlich erkennbare Rauschen der Messpunkte minimiert werden. Dazu werden die Messwerte beider Regionen mithilfe eines Hanning-Fensters geglättet.

$$h(x) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2 \cdot \pi \cdot x)) \quad (4.2)$$

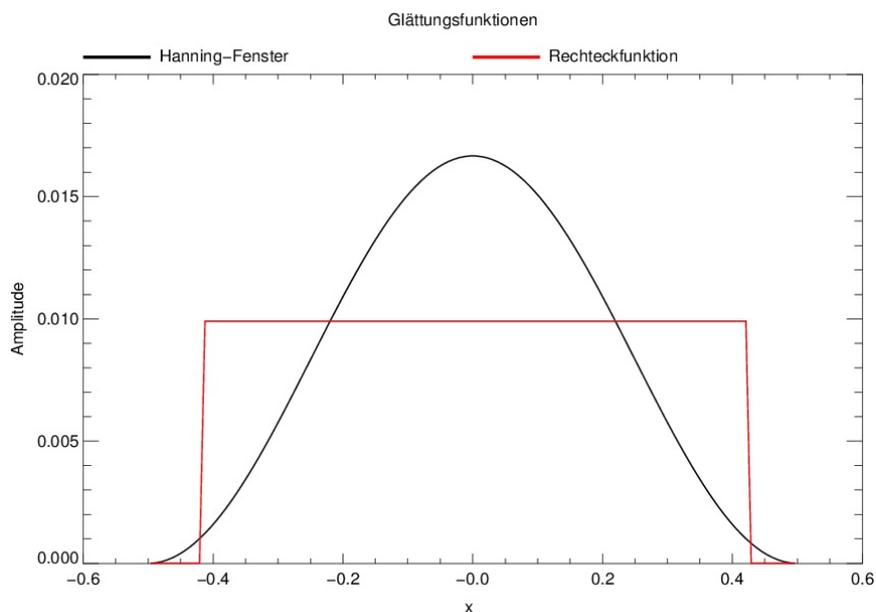


Abbildung 4.3: Qualitative Darstellung der verwendeten Glättungsfunktionen

Die Breite des in Abbildung 4.3 dargestellten und für die Auswertung verwendeten Hanning-Fensters beträgt für beide Regionen vier Monate (120 Tage), wovon zwei Monate effektiv sind. Für die erste Region bereitet das Glätten im Gegensatz zur zweiten Region keine Schwierigkeiten. Das Glätten einer lückenhaften Funktion ist aufwendiger, da die Glättungsfunktion für die Werte, bei denen ein Teil der Glättungsbreite keine Messwerte überdeckt, fehlerhafte Werte berechnet.

Die Faltung von Messwerten mit einem Hanning-Fenster ist vergleichbar mit der Berechnung eines gewichteten Mittelwertes. Falls das Hanning-Fenster nicht mit Messwerten gefüllt ist, muss es aufgrund der sonst entstehenden Lücken modifiziert werden. Also werden die Gewichte so angepasst, dass die Fläche unter der modifizierten Glättungsfunktion immer noch 1 beträgt. Je weniger Messwerte vorhanden sind, desto schlechter wird die Glättung. Daher müssen in diesem Fall für die Berechnung eines geglätteten

Messwertes mehr als fünf Messwerte im Faltungsbereich liegen.

Im nächsten Schritt soll die Wachstumsrate der XCO₂-Werte berechnet werden, die von den XCO₂-Daten für die Berechnung der Jahresgangamplitude abgezogen werden muss.

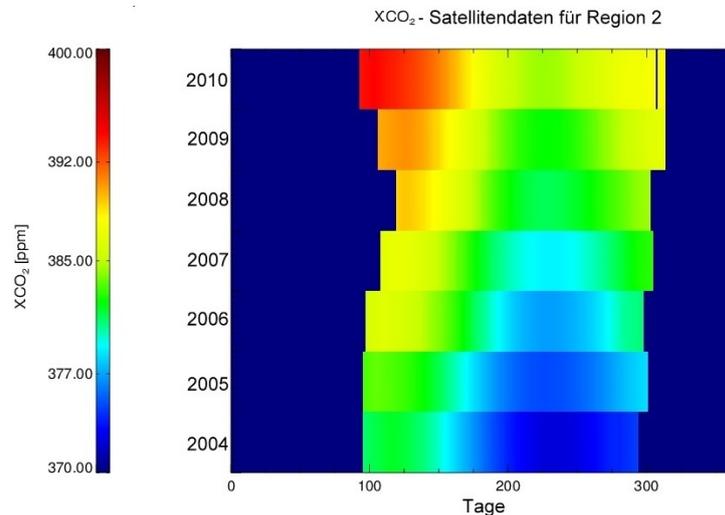


Abbildung 4.4: Darstellung der Messwerte des Satelliten für Region 2 in Form einer Matrix à 365 x 7

Für die Berechnung der Wachstumsrate des Jahresganges liegen die Messwerte beider Regionen nun in Form einer Matrix à 365 x 7, wie sie für Region 2 in Abbildung 4.4 gezeigt wird, vor. Es ist deutlich zu sehen, dass nicht in allen Jahren die gleichen Tage und gleiche Anzahl an Tagen Messwerte aufweisen. Über jeden der 2555 Tage liegt nun die Information vor, ob an dem entsprechenden Tag ein Messwert vorliegt oder nicht. Für die Berechnung der Wachstumsrate werden lediglich die Messwerte der Tage verwendet, an denen in jedem Jahr Messwerte aufgenommen werden konnten. Für die erste Region werden demnach für die Bestimmung der Wachstumsrate alle 2555 Tage mit den entsprechenden täglichen Mittelwerten betrachtet. Die zweite Region wird nun durch einen reduzierten Messwertvektor mit den vorher durch das Hanning-Fenster geglätteten Messwerten und einen entsprechend reduzierten Tagevektor in Abbildung 4.2 b) dargestellt. Sie beinhalten nun lediglich die Informationen für die in allen Jahren bemessenen Tage. In der rechten Abbildung von b), wo die Tage der sieben Jahre über die Indizes der Messtage im Ursprungsmesstagevektor geplottet sind, ist deutlich zu erkennen, dass an Tagen in den Wintermonaten nicht ausreichend gemessen werden konnte.

Die Anzahl der Tage, die jedes Jahr vorhanden sind, gibt die Breite der im nächsten Schritt angewendeten Rechteckfunktion an. Nur so ist es möglich, den Jahresgang aus den Messwerten herauszufiltern, ohne den kontinuierlichen Anstieg des Jahresgangs zu verfälschen. Demnach beträgt die Glättungsbreite für die erste Region 365 Tage, wäh-

rend die Glättungsbreite der zweiten Region wesentlich weniger Tage umfasst.

Neben den Datenvektoren dieser beiden Regionen werden ebenfalls die dazugehörigen Tagevektoren mit den gleichen Glättungsfunktionen gefaltet. Beide sind für die Region 2 in Abbildung 4.2 c) dargestellt. In der linken Abbildung ist nun die Wachstumsrate der XCO_2 -Werte dargestellt.

An den beiden Enden der reduzierten Messwert- und Tagevektoren werden, aufgrund des Randeffektes der Glättung je eine halbe Glättungsbreite der entsprechenden Glättungsfunktion abgezogen.

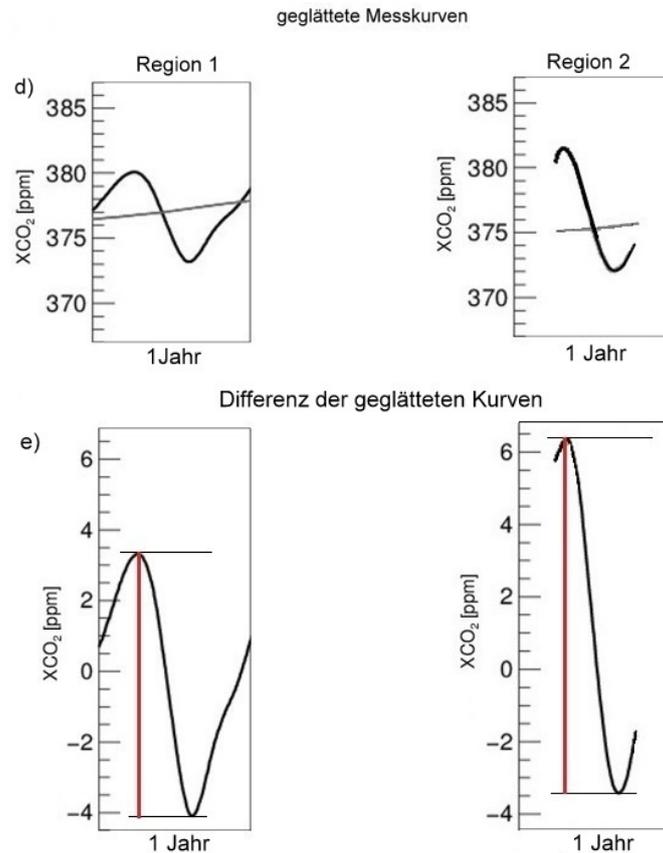


Abbildung 4.5: Darstellung der verwendeten Methode der Datenverarbeitung am Beispiel von zwei Regionen. d) mit dem Hanning- Fenster und der Rechtecksfunktion geglättete Daten für beide Regionen, e) Differenz der Kurven aus d) "peak-to-peak"-Amplitude eingezeichnet in Rot.

Die in Abbildung 4.2 c) dargestellten Tage entsprechen nun nicht mehr den Originaltagen. Der 112. Messtag wurde durch das Glätten beispielsweise zum 112,25. Messtag. Da für die reduzierten Messwert- und Tagevektoren die gleichen Glättungsfunktionen

verwendet wurden, gehört nun zu jedem geglätteten Tag ein entsprechender geglätteter Messwert. Um nun für jeden ganzen Tag einen Wert für die in Abbildung 4.2 c) gezeigte Wachstumsrate zu erhalten, werden diese geglätteten Werte der Wachstumsrate auf die ganzzahligen Tage interpoliert.

An beiden Enden dieser beiden neuen Vektoren, die täglich einen Wert für die Wachstumsrate ihrer Region beinhalten, werden die bisher fehlenden Tage an den Enden einer ganzen Glättungsbreite extrapoliert. So liegen nun zwei Vektoren vor, die für alle $365 * 7$ Tage einen Wert für die Jahresgang- befreite- CO₂- Konzentration der entsprechenden Region enthalten.

In Abbildung 4.5 d) sind für beide Regionen die sowohl mit dem Hanning-Fenster als auch mit der Rechtecksfunktion geglätteten Messwerte über alle 2555 Tage dargestellt.

In Abbildung 4.5 e) werden die in d) gezeigten Vektoren in beiden Regionen voneinander subtrahiert. Die "peak-to-peak"- Jahresgangamplitude kann nun als Differenz des jährlichen Minimums zum jährlichen Maximum berechnet werden. Diese ist Abbildung 4.5 in rot eingezeichnet.

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der XCO₂- Amplitudenberechnung

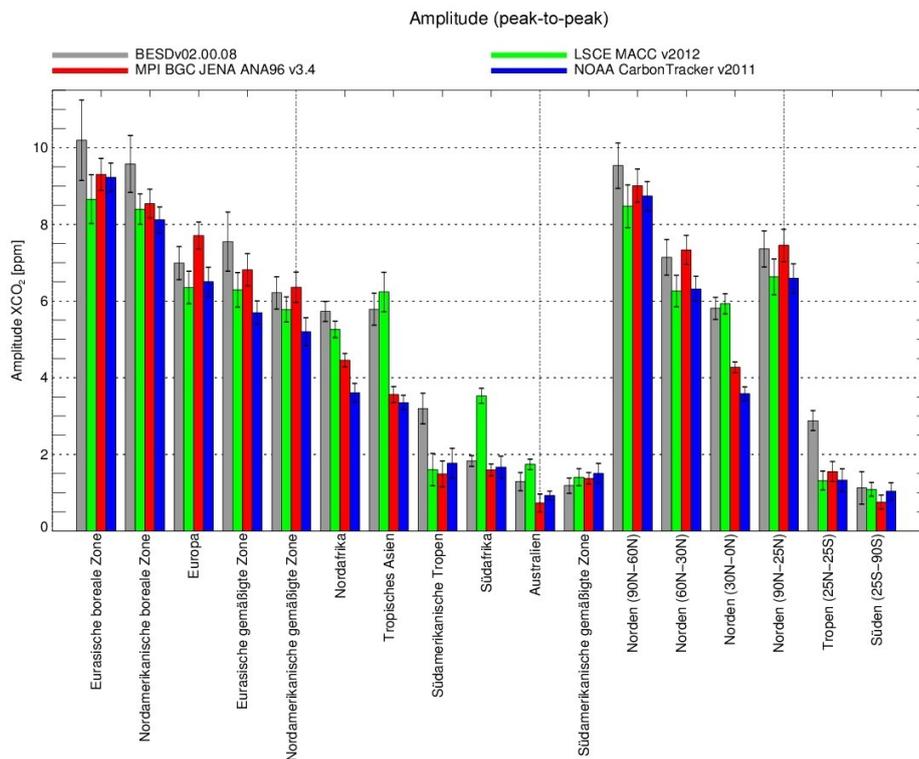


Abbildung 5.1: Darstellung der über sieben Jahre gemittelten Jahresgangamplitude der XCO₂-Werte der vier Datenquellen für 17 Regionen, die sich aus 11 Transcom-Regionen und sechs eigens definierten Arealen zusammensetzen, geordnet nach dem Breitengrad.

Region	Satellit	LSCE	MPI	CT
Eurasische boreale Zone	10.19 ± 1.05	8.66 ± 0.64	9.30 ± 0.42	9.23 ± 0.37
Nordamerikanische boreale Zone	9.58 ± 0.74	8.40 ± 0.40	8.54 ± 0.38	8.12 ± 0.34
Europa	7.00 ± 0.43	6.35 ± 0.42	7.71 ± 0.35	6.50 ± 0.38
Eurasische gemäßigte Zone	7.55 ± 0.77	6.30 ± 0.45	6.82 ± 0.42	5.69 ± 0.31
Nordamerikanische gemäßigte Zone	6.21 ± 0.42	5.78 ± 0.33	6.36 ± 0.40	5.20 ± 0.37
Nordafrika	5.73 ± 0.26	5.26 ± 0.21	4.46 ± 0.18	3.61 ± 0.24
Tropisches Asien	5.79 ± 0.42	6.24 ± 0.51	3.56 ± 0.21	3.35 ± 0.19
Südamerikanische Tropen	3.20 ± 0.40	1.6 ± 0.42	1.49 ± 0.34	1.77 ± 0.39
Südafrika	1.83 ± 0.14	3.53 ± 0.20	1.59 ± 0.15	1.67 ± 0.29
Australien	1.29 ± 0.24	1.74 ± 0.14	0.74 ± 0.23	0.93 ± 0.11
Südamerikanische gemäßigte Zone	1.19 ± 0.20	1.40 ± 0.15	1.38 ± 0.15	1.50 ± 0.26
Norden (90N- 60N)	9.53 ± 0.59	8.47 ± 0.55	9.01 ± 0.43	8.74 ± 0.38
Norden (60N- 30N)	7.14 ± 0.47	6.26 ± 0.41	7.33 ± 0.38	6.32 ± 0.33
Norden (30N- 0N)	5.81 ± 0.29	5.93 ± 0.26	4.27 ± 0.14	3.58 ± 0.18
Norden (90N- 25N)	7.36 ± 0.47	6.63 ± 0.47	7.45 ± 0.42	6.59 ± 0.38
Tropen (25N- 25S)	2.88 ± 0.26	1.31 ± 0.25	1.55 ± 0.26	1.33 ± 0.29
Süden (25S- 90S)	1.13 ± 0.42	1.10 ± 0.18	0.76 ± 0.18	1.04 ± 0.23

Tabelle 5.1: Mittlere Jahresgangamplitude und die entsprechende Standardabweichung, berechnet aus den täglichen Mitteln von SCIAMACHY BESD XCO₂ und den drei Modellen für 17 Regionen (alle Werte in ppm).

Die Ergebnisse der Amplitudenberechnung sowie die entsprechende Standardabweichung über die sieben Jahre für die 17 Regionen sind in der Tabelle 5.1 zu finden. Die Transcom-Regionen sind nach ihrem mittleren Breitengrad geordnet, der nach $\text{mittl. Breitengrad} = \frac{1}{2}(\text{max. Breitengrad} - \text{min. Breitengrad})$ bestimmt wird. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Jahr-zu-Jahr-Variabilität. Die Daten der nachfolgenden Tabelle werden ebenfalls in der Abbildung 5.1 veranschaulicht.

Im Folgenden werden vier Regionen genauer untersucht. Darunter ist Europa, als eine Region der Nordhemisphäre, die Tropen, und Australien als Vertreter der Südhemisphäre. Alle drei Regionen weisen ganzjährig Daten auf. Im Vergleich dazu wird im Darauf-folgenden die nordamerikanische boreale Zone als eine Region, in der lediglich in der Jahresmitte Daten vorhanden sind, genauer betrachtet.

Europa

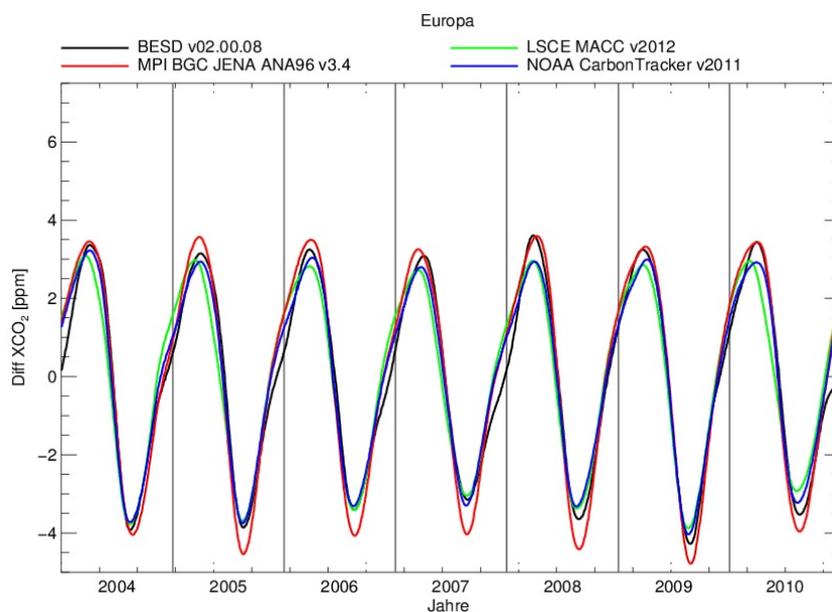


Abbildung 5.2: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für Europa

Europa ist die nördlichste der 17 Regionen, für die jeden Tag im Jahr geglättete Messwerte vorliegen. Aufgrund der großen Landmasse und der damit größeren Masse der Biosphäre auf der Nordhalbkugel, ist die Jahresgangamplitude dort sehr viel größer als die auf der Südhalbkugel.

Wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, nimmt der Verlauf des XCO₂-Jahresganges jedes Jahr ein Minimum und ein Maximum an. Während die Maxima in der Mitte der ersten Jahreshälfte liegen, befinden sich die Minima in der Mitte der zweiten Jahreshälfte.

Qualitativ stimmen die Kurven aller vier Datensätze gut überein. Der Satellit stimmt in seinen Werten am besten mit dem CT-Modell überein, wie auch Tabelle 5.1 mit (7.00 ± 0.43) ppm für die Amplitude aus den Satellitendaten und (6.50 ± 0.38) ppm berechnet aus den Daten des CT-Modells zeigt.

Das CT-Modell assimiliert für Europa acht Messstationen, während das MPI-Modell lediglich fünf Stationen bei seinen Berechnungen berücksichtigt. Mit 16 Messstationen werden von dem LSCE-Modell am meisten assimiliert. Dazu gehören verstärkt Messstationen, die in der Nähe der Mittelmeerküste gelegen sind.

Tropen

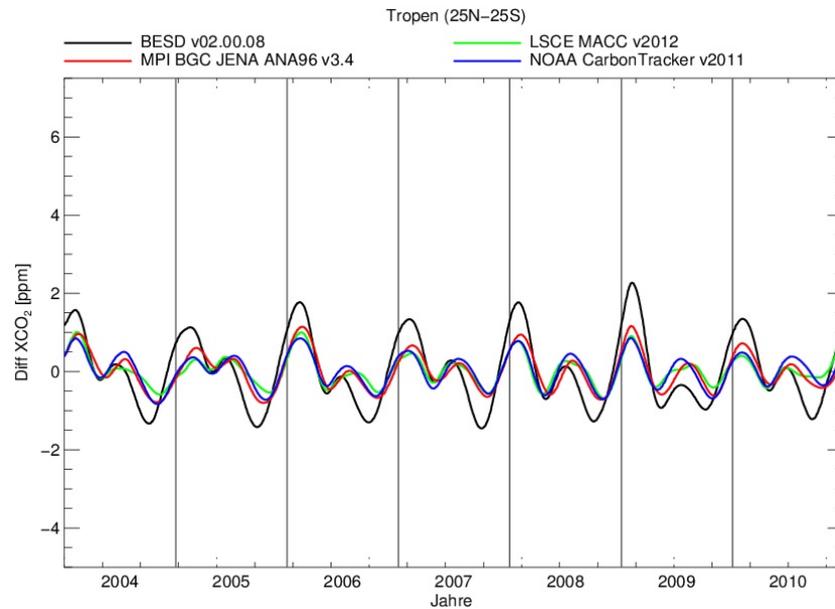


Abbildung 5.3: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für die Tropen (25°N- 25°S).

Für diese Region werden alle Landflächen, die zwischen 25°N und 25°S liegen, eingebunden. In dieser, in Abbildung 5.3 dargestellten Region, liegen jedes Jahr zwei Maxima und demnach ebenfalls zwei Minima vor. Bei den Maxima des Satelliten ist jeweils das erste im Jahr das in seiner Amplitude ausgedehntere. Das zweite Maximum tritt immer zur Mitte des Jahres auf. Das die Maxima verbindende Minimum ist fast immer in seiner Amplitude kleiner als das Hauptminimum, welches am Ende des Jahres vorliegt. Eine Ausnahme dafür zeigt sich im Jahr 2009. Hier scheinen ihre Betragswerte übereinzustimmen.

Die Kurven der Modelle unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Amplitude und weisen nur leichte Phasenverschiebungen gegeneinander auf. Im Vergleich mit dem Satelliten erreichen die Modelle meist später das zweite Maximum, während das erste Maximum aller Datenquellen nahezu zeitgleich erreicht wird. Die Position des Hauptminimums am Jahresende trifft ebenfalls bei allen Modellen später als bei dem Satelliten ein.

Im Vergleich der Daten der MPI- und CT-Modelle fällt auf, dass sich der qualitative Verlauf kaum unterscheidet, die Differenz zwischen den Extremstellen jedoch große Unterschiede aufweisen. Während MPI für das Hauptmaximum immer größere Werte als die anderen beiden Modelle liefert, liegt CT beim zweiten Maximum kontinuierlich über

den Berechnungen von MPI.

Das Modell LSCE ähnelt qualitativ ebenfalls den übrigen Modellen. Auf Grundlage der vier Messwertkurven stimmen die Berechnungen des MPI-Modells am besten mit dem Datensatz des Satelliten überein. Diese Vermutung wird ebenfalls durch die Werte der Tabelle 5.1 bestätigt, die für das MPI-Modell (1.55 ± 0.26) ppm und für den Satelliten (2.88 ± 0.26) ppm beträgt. Die Modelle LSCE mit (1.31 ± 0.25) ppm und CT (1.33 ± 0.29) ppm weichen in ihren Berechnungen kaum voneinander ab.

Für die Tropen werden zehn Messstationen von allen drei Modellen assimiliert. Das MPI-Modell verwendet zusätzlich die Informationen zweier weiterer Messstationen, die im Pazifik lokalisiert sind. Diese Messstationen werden ebenfalls von den LSCE-Modell assimiliert. LSCE bezieht ebenfalls Messwerte von Stationen, die im Pazifik zwischen der Westküste Amerikas und Australien aufgenommen wurden. Hinzu kommen die sieben Messstationen zwischen Vietnam und Malaysia, die sonst von keinem anderen Modell assimiliert werden. Auch eine im indischen Ozean, nahe Madagaskar gelegene, Messstation wird bei diesem Modell berücksichtigt. Eine Messstation in Südafrika wird ebenfalls in dem CT-Modell berücksichtigt. CT assimiliert zwei weitere Stationen im Pazifik, die von den anderen Modellen nicht verwendet werden. Des Weiteren verfügt das CT-Modell über Messstationen in Brasilien, in Mittelafrika und auf Singapur, die lediglich von diesem Modell abgefragt werden.

Australien

Die wenigen Landmassen auf der Südhalbkugel liegen sehr nah am Äquator, wodurch es nur geringe Schwankungen der Temperatur gibt. Für Australien liegen nahezu für jeden Tag im Jahr Messwerte vor. Dies kann durch den meist kleinen Sonnenzenitwinkel und die geringe Menge an Wolken erklärt werden.

Im direkten Vergleich von Abbildung 5.4 mit den Kurven für die Tropen fällt auf, dass hier nicht mehr klar zu erkennen ist, welches das Hauptmaximum und -minimum darstellt. Die Graphen stimmen bezüglich der Zeitpunkte ihrer Extrema nicht immer überein.

Bei Betrachtung von Abbildung 5.4 muss zudem die Verschiebung der Jahreszeiten und den damit phasenverschobenen Verlauf des Vegetationszyklus' auf der Südhemisphäre berücksichtigt werden. Demnach sollte das Hauptmaximum in den Wintermonaten und das Hauptminimum in den Sommermonaten der Nordhemisphäre liegen.

Für Australien stimmen, wie in Abbildung 5.4 zu erkennen, das MPI-Modell und das CT-Modell am besten miteinander überein. Dies bestätigt sich ebenfalls in den Ergebnissen der Amplituden von (0.74 ± 0.23) ppm für das MPI-Modell und (0.93 ± 0.11) ppm für das CT-Modell. Während in der Jahresmitte alle Datenquellen ein lokales Maximum der XCO₂-Werte aufzeigen, verlaufen sie zu den Jahresenden hin qualitativ nicht gleich. Das CT-Modell bildet beispielsweise zum Jahreswechsel meist ein Maximum, während die Kurve des MPI-Modells ein Minimum annimmt.

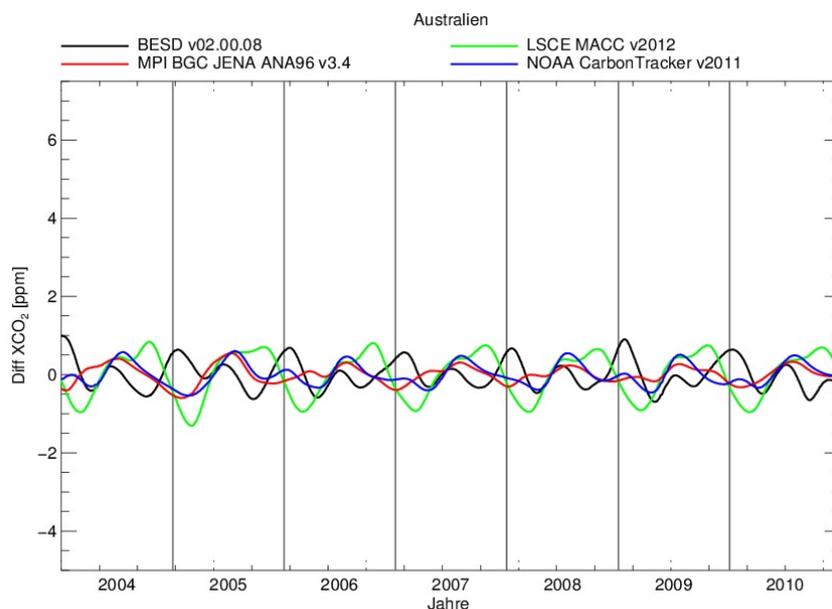


Abbildung 5.4: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für Australien.

Wie Tabelle 5.1 zu entnehmen ist, beträgt der vom Satelliten ermittelte Wert der Jahresgangamplitude (1.29 ± 0.24) ppm und der des LSCE-Modells (1.74 ± 0.14) ppm. Demnach sind die Daten des CT-Modells den Daten des Satelliten am ähnlichsten. Bezüglich des Verlaufs des Jahresganges stimmt der Datensatz des Satelliten qualitativ ebenfalls am besten mit dem des CT-Modells überein.

Für Australien assimilieren alle Modelle die gleichen Messstationen, weshalb die starke Abweichung des LSCE-Modells nicht dadurch begründet werden kann.

Nordamerikanische boreale Zone

Im Gegensatz zu den bisher gezeigten Jahresgangverläufen der Regionen Europa, Tropen (25°N - 25°S) und Australien liegen in der nordamerikanischen borealen Zone nicht jeden Tag geglättete Messwerte vor. Für die drei nördlichsten (eurasische boreale Zone, nordamerikanische boreale Zone und Norden (90°N - 60°N)) der 17 Regionen standen lediglich Messwerte aus der Jahresmitte zur Verfügung, was auf der Nordhemisphäre hauptsächlich in dem zu großen Sonnenzenitwinkel und den damit längeren Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre begründet ist. Die Intensität der Sonnenstrah-

lung wird durch Streuung, die Dunkelheit und die Annahme einer plan-parallelen Atmosphäre stark abgeschwächt und kann am Satelliten kaum noch ausgewertet werden. Glücklicherweise konnten für diese Regionen genügend Messwerte aufgenommen werden, sodass die Maxima und Minima noch bestimmt werden konnten.

Bei Betrachtung der Abbildung 5.5 fällt deutlich auf, dass der Satellit meist die größte "peak-to-peak"-Amplitude aufweist, während die Modelle größtenteils miteinander übereinstimmen. Die jährlichen Minima betragen bei allen Datensätzen nahezu den selben Wert, während im Gegensatz dazu der Satellit in einigen Jahren die Maxima für wesentlich höher einschätzt als die Modelle.

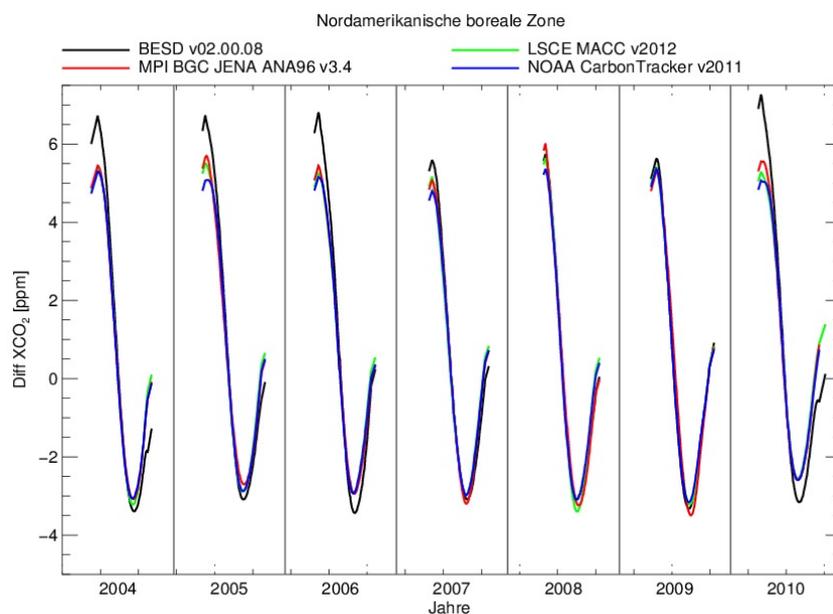


Abbildung 5.5: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für die nordamerikanische boreale Zone.

Für diese Region vermittelt Abbildung 5.5 den Eindruck, dass das MPI-Modell am besten mit dem Datensatz des Satelliten harmoniert. Diese Vermutung wird durch die Werte für die Jahresgangamplitude für alle vier Datensätze aus Tabelle 5.1 bestärkt. Denn die mittlere Amplitude aus den Satellitendaten beträgt für diese Region (9.58 ± 0.74) ppm, während das MPI-Modell die Amplitude auf einen Wert von (8.54 ± 0.38) ppm schätzt.

Das Modell LSCE schreibt der mittleren Jahresgangamplitude dieser Region einen Wert von (8.40 ± 0.40) ppm zu. Diese Übereinstimmung mit dem MPI-Modell könnte sich dadurch erklären lassen, dass diese beiden Modelle für die nordamerikanische boreale

Zone dieselben Messstationen assimilieren. Auch die Standardabweichung der jährlichen Amplitudenwerte stimmt bei beiden Modellen nahezu überein.

Das CT-Modell weicht mit (8.12 ± 0.34) ppm von diesen Werten leicht ab. Es assimiliert, wie bereits in Abbildung 3.5 gezeigt, wesentlich mehr Datenquellen für diese Region als die übrigen Modelle. Die Standardabweichung der jährlichen Jahrgangamplitude von CT sind für die nordamerikanische boreale Zone die kleinsten.

5.2 Abweichungen der Modell- von den Satellitendaten

Mittlere Abweichung

Im Folgenden wird die Abweichung der Modelldatensätze von dem Satellitendatensatz untersucht. Die Differenzen der in Abbildung 5.1 dargestellten Ergebnisse der vier Datensätze für die 17 Regionen sind in Abbildung 5.6 veranschaulicht.

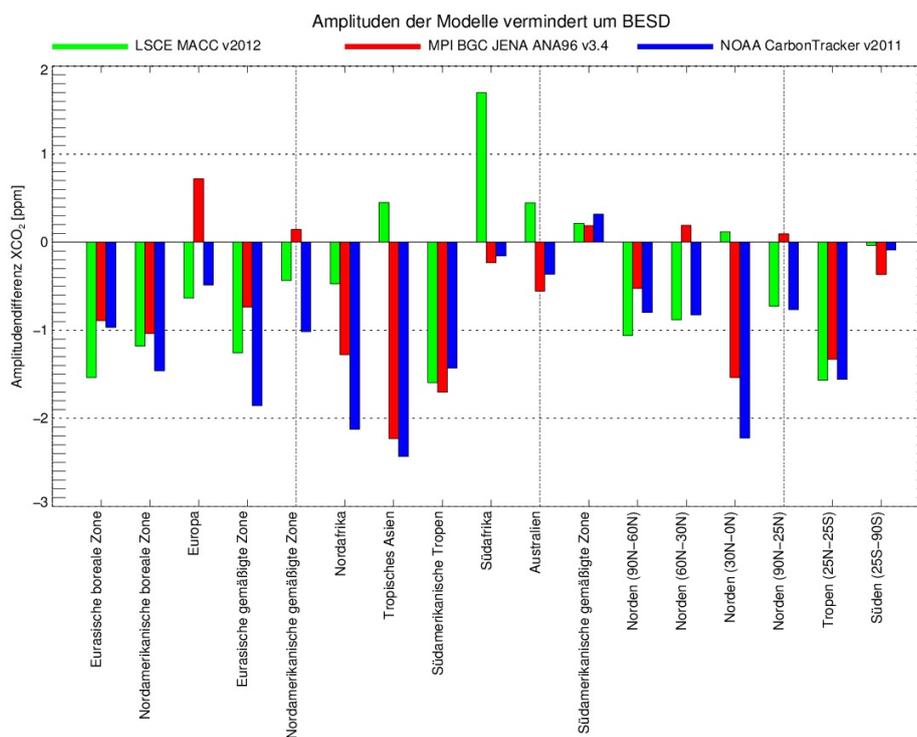


Abbildung 5.6: Darstellung der Differenz der mittleren XCO₂- Jahrgangamplituden aus Abbildung 5.1 (Modell-Satellit) der vier Datenquellen für 17 Regionen, geordnet nach dem Breitengrad.

In Abbildung 5.6 ist deutlich zu erkennen, dass die Messwerte des Satelliten in neun

der betrachteten 17 Regionen von einzelnen Modellen überschätzt werden. Lediglich in der südamerikanischen gemäßigten Zone ist die gemessene Jahresgangamplitude des Satelliten unter allen vier Datenquellen die kleinste. Des Weiteren ist auffällig, dass die Berechnungen des CT-Modells in acht Regionen die größte Abweichung von den Satellitenmesswerten aufweisen, während das MPI-Modell lediglich in vier und das LSCE-Modell in fünf Regionen die zum Satelliten größte Diskrepanz unter den drei Modellen bezüglich ihrer Messwerte aufweist.

Die dargestellten mittleren Differenzen der CT-Berechnungen zu den gemessenen Satellitendaten für die Regionen der Nordhemisphäre scheinen tendenziell mit abnehmendem Breitengrad zuzunehmen. Für Europa, die südamerikanischen Tropen, Südafrika und Australien ist die Abweichung dieses Modells hingegen die kleinste. Für die südamerikanische gemäßigte Zone weicht es wieder am stärksten von den Satellitendaten ab. Lediglich für diese Region überschätzt dieses Modell die Satellitendaten. Für die eigens definierten Regionen ist die Abweichung des CT-Modells für keine die geringste. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass dieses Modell für die Regionen, die zwischen 30°N - 0°N liegen, die größte Abweichung zum Satelliten liefert.

Für die fünf nördlichsten Transcom-Regionen, mit Ausnahme von Europa, ist das MPI-Modell das Modell, welches am ehesten mit den Satellitendaten übereinstimmt. Im Gegensatz zu den anderen beiden Modellen schätzt dieses Modell die Jahresgangamplitude in Europa und in der nordamerikanischen gemäßigten Zone größer ein als der Satellit. In den Regionen zwischen Nordafrika und den südamerikanischen Tropen erreicht das Modell seine Maximalwerte für die Abweichung gegenüber den Satellitendaten. Für die Regionen Südafrika, Australien und der südamerikanischen gemäßigten Zone sind die Abweichungen für dieses Modell neben denen für die nordamerikanische gemäßigte Zone am geringsten.

Für die Regionen, die zwischen 60°N - 30°N und 90°N - 25°N liegen, überschätzt das MPI-Modell die Amplitude aus den Satellitendaten. In diesen Regionen und im Norden (90°N - 60°N) sowie in den Tropen (25°N - 25°S) weichen die MPI-Werte am geringsten von den Satellitendaten ab.

Die betragliche Abweichungen des LSCE-Modells zu den Satellitendaten scheint mit abnehmendem Breitengrad bis zum tropischen Asien abzunehmen, bevor sie für die südamerikanischen Tropen und Südafrika ihre Maximalwerte erreicht. Für Australien und die südamerikanische gemäßigte Zone liegt das Modell in seiner Jahresgangamplitude in beiden Regionen über der des Satelliten.

Für die beiden nördlichen Regionen Norden (90°N - 60°N) und Norden (60°N - 30°N) und die Tropen sind die Werte des LSCE-Modells am weitesten von den Messwerten des Satelliten entfernt, während es für die Regionen Norden (30°N - 0°N) und Süden (25°N - 25°S) am besten mit diesen übereinstimmt.

Prozentuale Abweichung

Die prozentuale Abweichung der Modelldaten von den Satellitenmessungen ist in folgender Abbildung veranschaulicht.

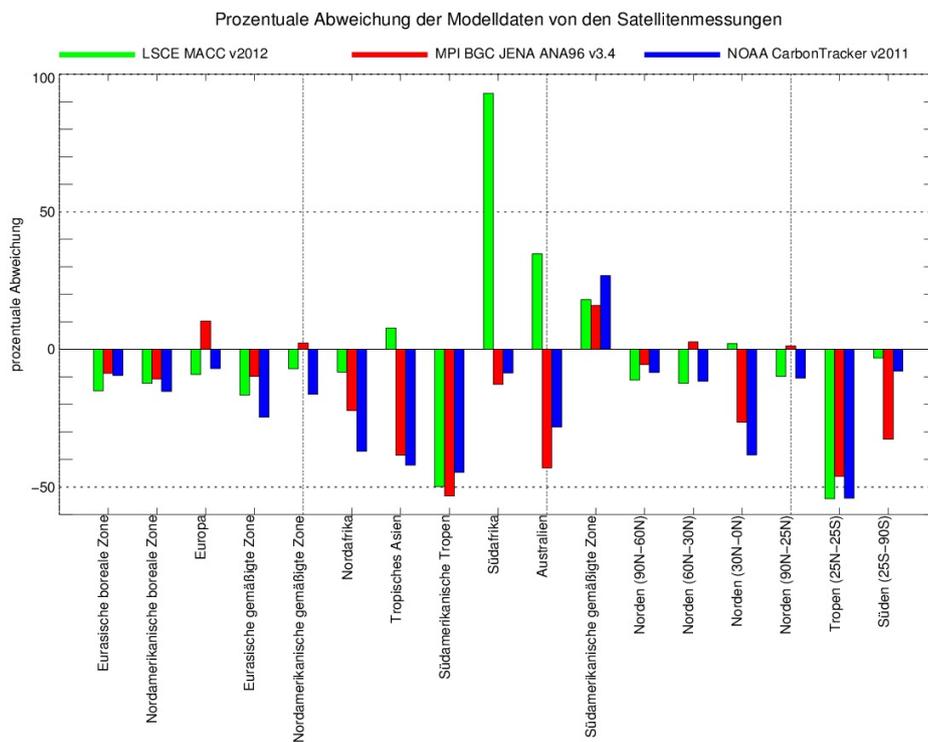


Abbildung 5.7: Darstellung der prozentualen Differenz der mittleren XCO₂- Jahresgangamplituden aus Abbildung 5.1 (Modell-Satellit) der vier Datenquellen für 17 Regionen, geordnet nach dem Breitengrad.

Aus Abbildung 5.7 lässt sich deutlich erkennen, dass für die Regionen, die nördlich von 30° N liegen, die Modelle eine relativ geringe prozentuale Abweichung zu dem Satellitendatensatz aufweisen. Neben CT mit -14.52% und LSCE mit -12.01% weicht das MPI-Modell im Mittel über die fünf Regionen von der eurasischen borealen Zone bis hin zur nordamerikanischen gemäßigten Zone mit -3.32% am wenigsten von den Messungen des Satelliten ab.

In Abbildung 5.7 wird deutlich, dass die prozentuale Abweichung des CT- und des MPI-Modells zu den südlichen Regionen hin betragsmäßig nahezu kontinuierlich zunimmt. Für Südafrika ist sie für beide Modelle jedoch relativ klein. Im Vergleich mit den tropischen Regionen scheinen beide Modelle für die Regionen der Südhemisphäre wieder etwas mit dem Satellitendatensatz übereinzustimmen.

Im Gegensatz zu diesen beiden Modellen weicht das LSCE-Modell erst ab den südamerikanischen Tropen prozentual sehr stark ab. Für Südafrika ist diese Abweichung am größten. Mit abnehmenden Breitengrad wird auch die prozentuale Abweichung dieses Modells von den Messungen des Satelliten kleiner.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.7 für die Breitengradabhängigen Regionen zeigen deutlich, dass die prozentuale Abweichung aller Modelle für die Nordhemisphäre bis 30° N betragsmäßig sehr gering ist, während alle Modelle in den Tropen um ca. -50% von dem Satellitendatensatz abweichen. Diese Zunahme der prozentualen Abweichung zur Südhemisphäre hin lässt sich teilweise durch die kleineren Absolutwerte der ermittelten Jahresgangamplitude erklären.

Jährliche Abweichung in der Nord- und Südhemisphäre, sowie in den Transcom-Regionen

Um herauszufinden, welches Modell für alle Transcom-Regionen, die Regionen der Nord- und die der Südhemisphäre innerhalb der betrachteten sieben Jahre am besten mit den Satellitendaten übereinstimmt, wird in folgender Tabelle für jedes Jahr, jedes Modell und jede der drei Regionen der entsprechende Mittelwert der Abweichung gebildet.

Die Nordhemisphäre aus Tabelle 5.2 umfasst die bisher betrachteten Transcom-Regionen von der eurasischen borealen Zone bis zum tropischen Asien, während die Südhemisphäre die Transcom-Regionen zwischen den südamerikanischen Tropen und der südamerikanischen gemäßigten Zone umschließt.

Wie Tabelle 5.2 zeigt, scheint für die Transcom-Regionen das LSCE-Modell aufgrund seiner im Vergleich mit den anderen Modellen jährlich kleinsten Abweichung, am besten mit den Messwerten des Satelliten übereinzustimmen. Dies bestätigt ebenfalls der über die betrachteten sieben Jahre gebildete Mittelwert in Tabelle 5.2, der mit (-0.39 ± 0.22) ppm für die Transcom-Regionen der kleinste ist. Jedoch ist die Streuung der Abweichungen der LSCE-Modelldaten zu den Satellitendaten die größte unter den drei Modellen für diese Region.

Da die Transcom-Regionen alle Regionen der Nord- und der Südhemisphäre beinhalten, ist dieser Wert ebenfalls ein Maß für den Offset des Modells gegenüber dem Satelliten.

Für die Nordhemisphäre sind die Abweichungen des LSCE-Modells von dem Datensatz des Satelliten in vier der betrachteten sieben Jahre die kleinsten. In den anderen drei Jahren sind die Werte des LSCE-Modells jedoch nicht viel größer als die des MPI-Modells, welches für diese Jahre die geringste Abweichung zum Satellitendatensatz aufweist. Auch hier ist der Mittelwert der Abweichungen über alle sieben Jahre für das LSCE-Modell mit (-0.72 ± 0.31) ppm der kleinste. Dieses Ergebnis ist in Anbetracht der regionalen Untersuchungen überraschend, wird jedoch durch die starken Abweichungen der Daten des MPI-Modells von den Satellitendaten in Nordafrika sowie im tropischen Asien erklärt.

Das LSCE-Modell ist das einzige Modell, welches positive mittlere Abweichungen zu den Messungen des Satelliten aufweist. Diese liegen in fünf der sieben Jahre in der Südhemisphäre vor. In den verbleibenden zwei Jahren sind die Abweichungen betraglich sehr gering.

Für diese Region stimmt das LSCE-Modell mit (0.19 ± 0.23) ppm mit Abstand am besten mit den Messungen des Satelliten überein. Des Weiteren muss jedoch erwähnt werden, dass das LSCE-Modell für die Südhemisphäre unter den drei Modellen die größte Streuung aufweist. Dies wird durch die Überschätzung der Jahresgangamplitude des Satelliten von dem LSCE-Modell in Südafrika um 1.70 ppm erklärt.

Jahr	Mittlere Differenz zwischen den Modellen und BESD in ppm				Mittelwert
	Region	LSCE	MPI	CT	
2004	Transcom	-0.56	-0.91	-1.04	
	Nordhemisphäre	-0.87	-1.08	-1.35	
	Südhemisphäre	-0.02	-0.62	-0.51	
2005	Transcom	-0.19	-0.43	-0.98	
	Nordhemisphäre	-0.61	-0.58	-1.42	
	Südhemisphäre	0.55	-0.18	-0.21	
2006	Transcom	-0.36	-0.73	-1.07	
	Nordhemisphäre	-0.79	-0.87	-1.51	
	Südhemisphäre	0.38	-0.47	-0.31	
2007	Transcom	-0.19	-0.53	-0.98	
	Nordhemisphäre	-0.27	-0.39	-1.17	
	Südhemisphäre	-0.05	-0.76	-0.66	
2008	Transcom	-0.32	-0.59	-1.14	
	Nordhemisphäre	-0.58	-0.54	-1.62	
	Südhemisphäre	0.14	-0.66	-0.29	
2009	Transcom	-0.30	-0.75	-1.09	
	Nordhemisphäre	-0.66	-0.83	-1.52	
	Südhemisphäre	0.32	-0.60	-0.34	
2010	Transcom	-0.81	-0.90	-1.31	
	Nordhemisphäre	-1.28	-1.00	-1.76	
	Südhemisphäre	0.02	-0.73	-0.52	
Jahresmittel	Transcom	-0.39 ± 0.22	-0.69 ± 0.18	-1.09 ± 0.11	-0.72
	Nordhemisphäre	-0.72 ± 0.31	-0.76 ± 0.25	-1.48 ± 0.19	-0.99
	Südhemisphäre	0.19 ± 0.23	-0.58 ± 0.20	-0.41 ± 0.16	-0.26

Tabelle 5.2: Jährliche Abweichungen der Amplitude aus den Modelldaten von den vom Satelliten gemessenen, gemittelt über die Transcom-Regionen, die Regionen der Nord- und Südhemisphäre, Jahresmittel ist der Mittelwert über die jährlichen Differenzen und der Fehler ist die entsprechende Standardabweichung (alle Werte in ppm).

Für die Transcom-Regionen liegen die Abweichungen des MPI-Modells in jedem Jahr zwischen denen des LSCE- und des CT-Modells.

In sechs Jahren weicht das MPI-Modell in der Südhemisphäre am stärksten von den Satellitendaten ab. Dies bestätigt ebenfalls der über alle Jahre gebildete Mittelwert von (-0.58 ± 0.20) ppm.

Das CT-Modell weicht mit im Mittel (-1.09 ± 0.11) ppm für die Transcom-Regionen am stärksten unter den drei Modellen von dem Satelliten ab. Jedoch weist dieses Modell für alle drei Regionen die kleinste Streuung auf.

Für die Nordhemisphäre stimmt das CT-Modell mit durchschnittlich (-1.48 ± 0.19) ppm ebenfalls am wenigsten mit den Messungen des Satelliten überein.

Unter alleiniger Berücksichtigung von Tabelle 5.2 lässt sich folgern, dass das LSCE-Modell in seinen Berechnungen am besten mit den Satellitendaten übereinstimmt, während das CT-Modell mit seinen Werten am weitesten von diesen abweicht. Eine Ursache für diese starke Abweichung kann dadurch begründet werden, dass das CT-Modell das CASA-Modell als Biosphären-Modell verwendet. Dies unterschätzt die Flüsse um $\sim 40\%$ (Keppel-Aleks *et al.*, 2012). Auch bei den anderen Modellen liegt die Vermutung nahe, dass deren Biosphären-Modelle die vorhandenen biosphärischen Flüsse unterschätzen.

Ergänzend muss erwähnt werden, dass für alle Regionen die Standardabweichung des LSCE-Modells die größte und die des CT-Modells die kleinste ist.

Mittlere Amplitude

In Tabelle 5.3 werden einige der bereits in Abbildung 5.1 dargestellten Jahresgangamplituden über die entsprechenden Regionen gemittelt. Die Werte für den Satelliten und das CT-Modell für die Nord- und die Südhemisphäre können mit den bereits von Schneising *et al.*, (2014) berechneten Werten verglichen werden. Sie stimmen weitestgehend überein. Für die Transcom-Regionen und die Nordhemisphäre sind die mittleren Jahresgangamplituden aus den Satellitendaten die größten. Für die Südhemisphäre bilden die LSCE-Werte gegenüber den anderen drei Datensätzen das Maximum.

Wie bereits in Tabelle 5.2 gezeigt, weicht auch hier das LSCE-Modell für alle drei Regionen am wenigsten von den Ergebnissen aus den Satellitendaten ab. Ebenfalls ist hier zu erkennen, dass das LSCE-Modell als einziges der drei Modelle, die Jahresgangamplitude des Satelliten für die Südhemisphäre übersteigt.

Außerdem dargestellt sind die prozentualen Abweichungen der Modelldaten von den Satellitendaten, hier mit einem * markiert.

Für die Transcom-Regionen und die Nordhemisphäre liegen die Abweichungen des MPI- und des LSCE-Modells von den Messwerten des Satelliten bei um die 10%, während die CT-Daten um 20% von diesen abweichen.

mittlere Amplitude in ppm	BESD	LSCE	MPI	CT
Transcom	5.41	5.02	4.72	4.32
Nordhemisphäre	7.43	6.71	6.68	5.96
Südhemisphäre	1.87	2.07	1.30	1.47
mittlere Abweichung zu BESD		LSCE*	MPI*	CT*
Transcom		- 0.39	- 0.69	- 1.09
Nordhemisphäre		- 0.72	- 0.76	- 1.48
Südhemisphäre		0.19	- 0.58	- 0.41
mittlere Abweichung zu BESD in %		LSCE*	MPI*	CT*
Transcom		-7.21	-12.76	-20.01
Nordhemisphäre		-9.72	-10.18	-19.87
Südhemisphäre		10.23	-30.67	-21.72
RMS der Differenz zu BESD		LSCE*	MPI*	CT*
Transcom		1.50	1.32	1.73
Nordhemisphäre		1.54	1.45	2.02
Südhemisphäre		1.42	1.06	1.07

Tabelle 5.3: Amplituden der Modelldaten und der Satellitendaten, gemittelt über die Transcom-Regionen und über die Regionen der Nord- und Südhemisphäre (alle Werte in ppm), mittlere Abweichung der Modell zu BESD, prozentuale Abweichung der Ergebnisse aus der obigen Teiltabelle der Modell zu dem Satelliten (alle Werte in %), RMS der Differenz der Modelle zu BESD (alle Werte in ppm).

Auch für die Südhemisphäre liegt die Abweichung der CT-Daten bei ca. 20 %, während das LSCE-Modell die mittlere Amplitude des Satelliten dieser Region um ca. 10 % überschätzt und das MPI-Modell diese um ca. 30 % unterschätzt.

Bisher wurde, um herauszufinden, welches Modell in seinen Daten am stärksten von den Satellitendaten abweicht, der Mittelwert über die entsprechenden Differenzen betrachtet. Dabei können sich aber Differenzen ausgleichen und ein Modell, welches beispielsweise auf der Südhemisphäre um -10 ppm, am Äquator mit den Satellitenwerten übereinstimmt und auf der Nordhemisphäre um 10 ppm von den Satellitendaten abweicht, stimmt bei der Berechnung des Mittelwertes perfekt mit den Satellitendaten überein.

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit nun zusätzlich die mittlere quadratische Abweichung (RMS) berechnet:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Modell_i - BESD_i)^2}{N}}$$

N ist die Anzahl der Regionen, über die für die entsprechenden Transcom-Regionen, die Regionen der Nord- und der Südhemisphäre gemittelt wurde.

Für das gleiche, eben beschriebene Beispiel, würde der RMS einen Wert von 8.16 ppm

für die Abweichung des Satelliten von dem Modell ergeben. Die RMS-Werte in Tabelle 5.3 zeigen deutlich größere Werte als die der Mittelwertberechnung. Für die Transcom-Regionen, die Regionen der Nord- und der Südhemisphäre stimmt das MPI-Modell am besten mit den Satellitendaten überein.

Das CT-Modell weicht für die Transcom-Regionen mit 1.73 ppm und für die Nordhemisphäre mit 2.02 ppm am stärksten von den Satellitendaten ab. Die größte Abweichung zum Satelliten für die Südhemisphäre weist das LSCE- Modell auf.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Um zu untersuchen, welches der Modelle NOAA CarbonTracker v2011, MPI BGC JENA ANA96 v.3.4 und LSCE MACC v2012 mit seinen Werten der CO₂-Konzentration am geringsten von den gemessenen XCO₂-Werten von SCIAMACHY abweicht, wurden die vier Datensätze in dieser Arbeit miteinander verglichen. Da die Jahresgangamplitude Rückschlüsse auf die CO₂-Senke und Aufschlüsse über Quellen und Senken dieses Treibhausgases liefert, wurde diese in dem vorgenommenen Vergleich fokussiert. Dazu wurden 17 Regionen betrachtet.

Um die vier Datensätze miteinander vergleichen zu können, ist das gleiche Sampling eine Voraussetzung. Dabei stellten die in einigen Regionen fehlenden Messwerte des Satelliten in den Wintermonaten zunächst ein Problem bei der Datenverarbeitung dar. Dieses konnte jedoch mit der in dieser Arbeit beschriebenen Methode gelöst werden. Von dem XCO₂-Jahresgang jeder Region und jedem Datensatz wurde die entsprechende, vorher bestimmte Wachstumsrate abgezogen, um die “peak-to-peak“- Amplitude berechnen zu können.

Beim Vergleich der XCO₂- Jahresgangamplitude der vier Datensätze für alle 17 Regionen ergab sich eine Zunahme der Jahresgangamplitude mit zunehmendem Breitengrad. Des Weiteren zeigte der Vergleich, dass die drei Modelle die Jahresgangamplitude des Satelliten typischerweise im Mittel um 0.72 ppm unterschätzen.

Darüber hinaus konnte kein Modell identifiziert werden, welches für alle die in dieser Arbeit betrachteten 17 Regionen und sieben Jahre am besten mit den Messungen des Satelliten übereinstimmt.

In dieser Arbeit wurden vier Regionen, die in der Nord- und Südhemisphäre und den Tropen liegen, genauer betrachtet.

Für die nordamerikanische boreale Zone, als erste Beispielregion für die Nordhemisphäre, stimmt die Amplitude des MPI-Modells mit (8.54 ± 0.38) ppm am besten mit der aus

den Satellitendaten berechneten Amplitude von (9.58 ± 0.74) ppm überein.

Im Gegensatz zu der nordamerikanischen borealen Zone lagen für die zweite nordhemisphärische Beispielregion Europa ganzjährig Messwerte vor. Hier ist das CT-Modell mit (7.71 ± 0.35) ppm der Satellitenamplitude von (6.50 ± 0.38) ppm am ähnlichsten.

Für die Tropen wurde eine selbst definierte Region, die sich von 25°N bis 25°S erstreckt, genauer betrachtet. Auch für diese Region stimmt die Amplitude des MPI-Modells mit (1.55 ± 0.26) ppm am besten mit der von dem Satelliten ermittelten Amplitude von (2.88 ± 0.26) ppm überein.

Für Australien, als Region der Südhemisphäre, stimmen die Verläufe des Jahresganges der vier Datensätze im Gegensatz zu den anderen drei genauer untersuchten Regionen qualitativ nicht überein.

Für diese Region sind die Daten des CT-Modells mit (0.93 ± 0.11) ppm den Satellitendaten mit (1.29 ± 0.24) ppm am ähnlichsten.

Ebenfalls wurde in dieser Arbeit die prozentuale Abweichung der Modelldaten von den Satellitendaten untersucht. Diese nimmt für alle Modelldatensätze mit abnehmendem Breitengrad zu.

Neben den bisherigen Erkenntnissen, die aus Daten, die über die betrachteten sieben Jahre gemittelt wurden, entstanden, wurden ebenfalls einzelne Jahre untersucht. Dafür wurden die jährlichen Abweichungen jedes Modelldatensatzes zu dem Satellitendatensatz über die 11 Transcom-Regionen und über die Transcom-Regionen, die in der Nord- und in der Südhemisphäre liegen, gemittelt.

Diesen Berechnungen ist zu entnehmen, dass das LSCE-Modell mit (-0.39 ± 0.22) ppm innerhalb der 11 Transcom-Regionen am wenigsten von den Satellitenmessungen abweicht. Ebenfalls für die Nord- und die Südhemisphäre mit (-0.72 ± 0.31) ppm und (0.19 ± 0.23) ppm stimmt das LSCE-Modell im Mittel am besten mit den Satellitendaten überein. Es ist das einzige Modell, welches die jährliche Jahresgangamplitude des Satelliten für die Regionen der Südhemisphäre in nahezu allen Jahren übertrifft.

Diese Ergebnisse sind in Anbetracht der regionalen Untersuchungen überraschend, werden jedoch durch die starken Abweichungen der Daten des MPI-Modells von den Satellitendaten in Nordafrika sowie in dem tropischen Asien erklärt.

Für die Transcom-Regionen und die Nordhemisphäre hat das CT-Modell mit (-1.09 ± 0.11) ppm und (-1.48 ± 0.19) ppm im Mittel die größte Abweichung gegenüber den Daten des Satelliten.

Die Südhemisphäre wird im Mittel am schlechtesten durch das MPI-Modell mit (-0.58 ± 0.20) ppm repräsentiert.

Über diese drei Regionen (Transcom, Nord- und Südhemisphäre) wurden im Anschluss für alle vier Datensätze die über die sieben Jahre und die entsprechenden Regionen gemittelten Jahresgangamplituden gebildet.

Für die Transcom-Regionen und die Nordhemisphäre liegen die Abweichungen des MPI- und des LSCE-Modells von den Messwerten des Satelliten bei um die 10 %, während die

CT-Daten um 20% von diesen abweichen.

Auch für die Südhemisphäre liegt die Abweichung der CT-Daten bei ca. 20 %, während das LSCE-Modell die mittlere Amplitude des Satelliten dieser Region um ca. 10 % überschätzt und das MPI-Modell diese um ca. 30 % unterschätzt.

Die Berechnung des RMS zeigte, dass das MPI-Modell am besten mit den Satellitendaten übereinstimmt. Das CT-Modell weicht nach diesen Berechnungen für die Nordhemisphäre und die betrachteten Transcom-Regionen am stärksten von den Satellitendaten ab. Für die Südhemisphäre weist das LSCE-Modell die größte Abweichung auf.

6.1 Ausblick

Ziel der heutigen Forschung ist es, alle CO₂-Flüsse, d.h. alle CO₂-Quellen und -Senken genau lokalisieren und in ihrer Stärke quantifizieren zu können. Darunter fällt ebenfalls die Untersuchung der “missing sink“ über die noch große Unklarheiten existieren. Des Weiteren ist unklar, wie diese Quellen und Senken sich im Rahmen des Klimawandels verändern.

Um diese Fragen zukünftig beantworten zu können, muss die Genauigkeit der Satellitenmessungen zunehmen. Der derzeit geplante Satellit CarbonSat weist beispielsweise gegenüber den heutzutage messenden Satelliten eine deutlich höhere Messgenauigkeit und eine wesentlich feinere Abtastung auf. Mithilfe der zukünftigen Satellitenaufnahmen werden die geographischen Messlücken in den Modellen gefüllt werden können, woraus eine globale Karte mit den gesuchten Flüssen resultieren wird. Diese Informationen über die CO₂-Flüsse werden für genauere Vorhersagen des zukünftigen Klimas benötigt. Mithilfe dieser Vorhersagen können verschiedene, mögliche, zukünftige Szenarien mit größerer Genauigkeit durchgespielt werden.

Um die Ergebnisse der Modelle noch genauer mit den Messungen des Satelliten zu vergleichen, könnten anderen charakteristische Größen des Jahresganges, wie beispielsweise die Phase untersucht werden.

Kapitel 7

Anhang

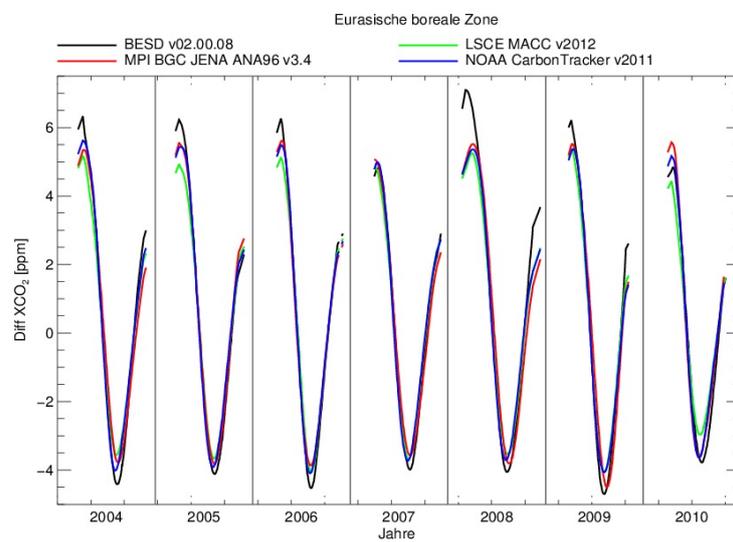


Abbildung 7.1: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der eurasischen borealen Zone

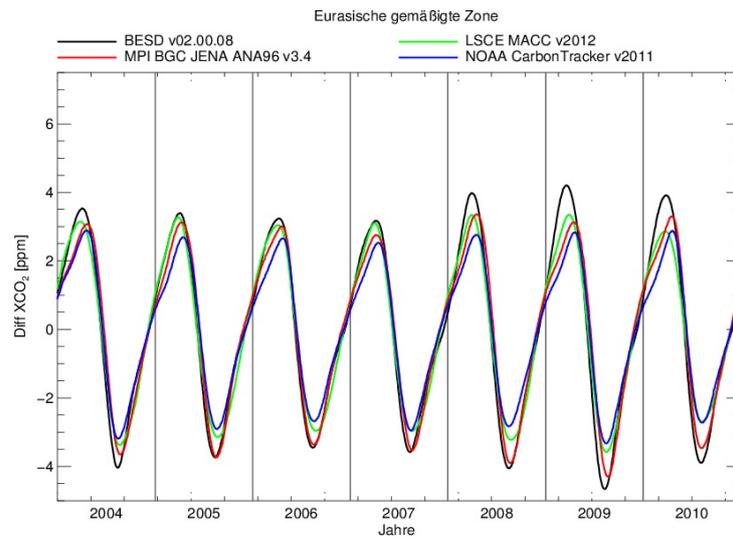


Abbildung 7.2: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO_2 -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der eurasischen gemäßigten Zone

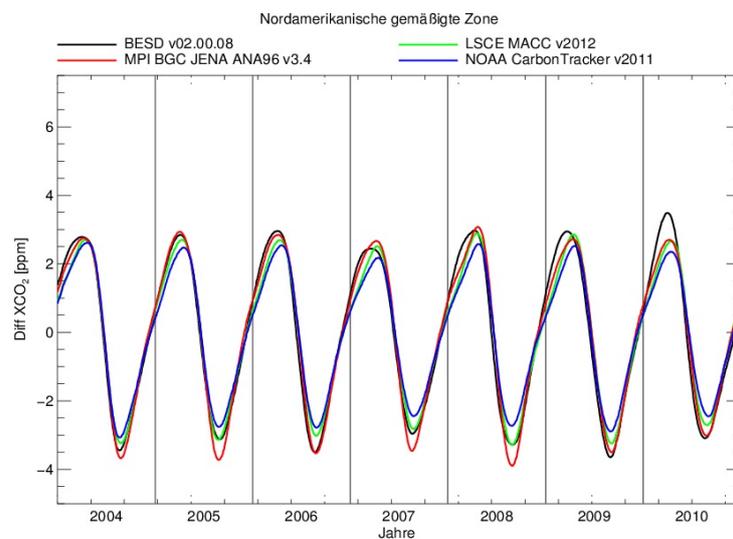


Abbildung 7.3: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO_2 -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der nordamerikanischen gemäßigten Zone

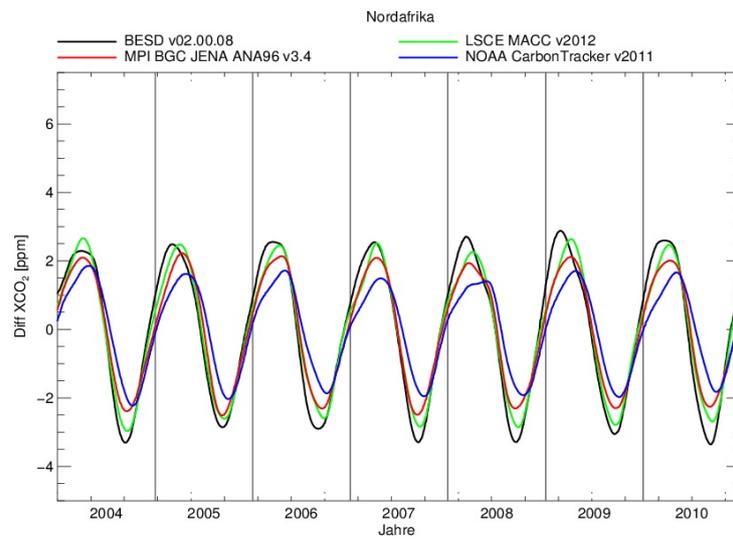


Abbildung 7.4: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten Nordafrikas

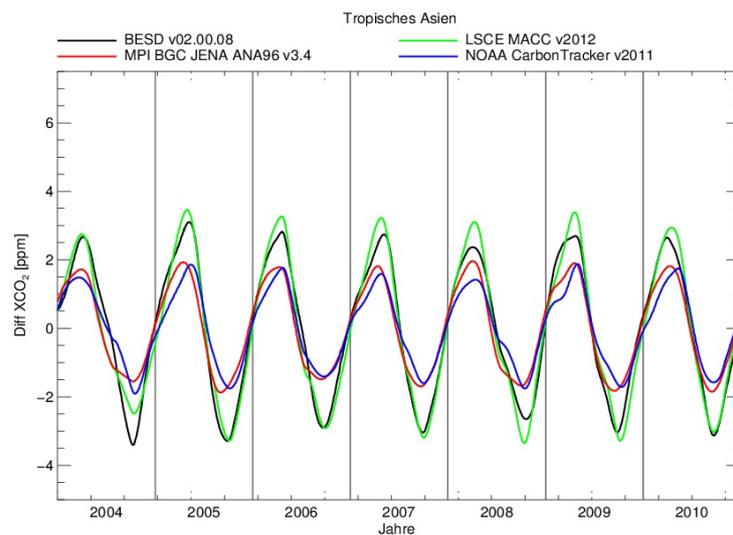


Abbildung 7.5: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für das tropische Asien

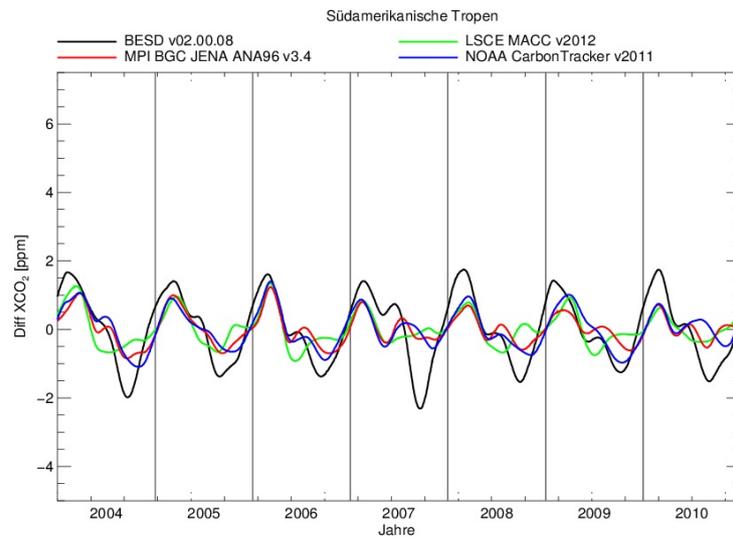


Abbildung 7.6: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für die südamerikanischen Tropen

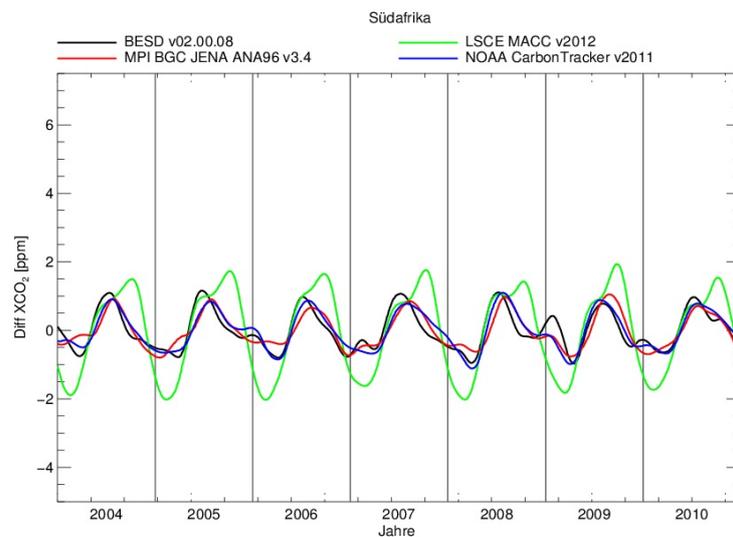


Abbildung 7.7: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten Südafrikas

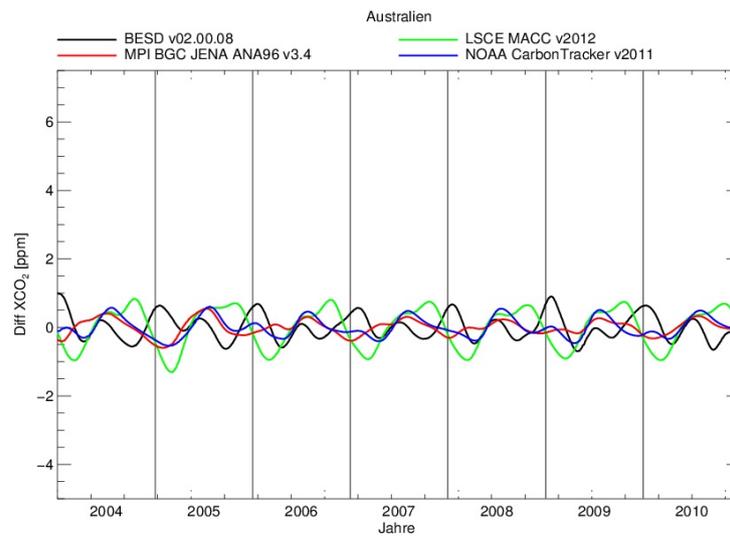


Abbildung 7.8: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO_2 -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten Australiens

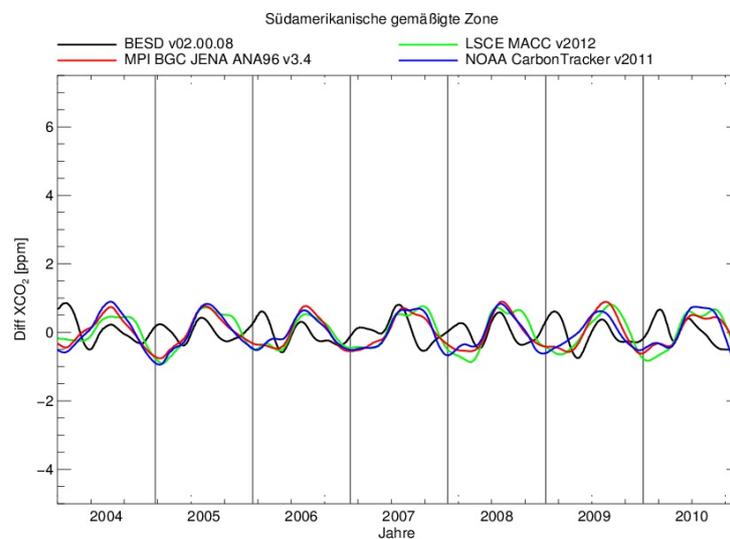


Abbildung 7.9: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO_2 -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der süd-amerikanischen gemäßigten Zone

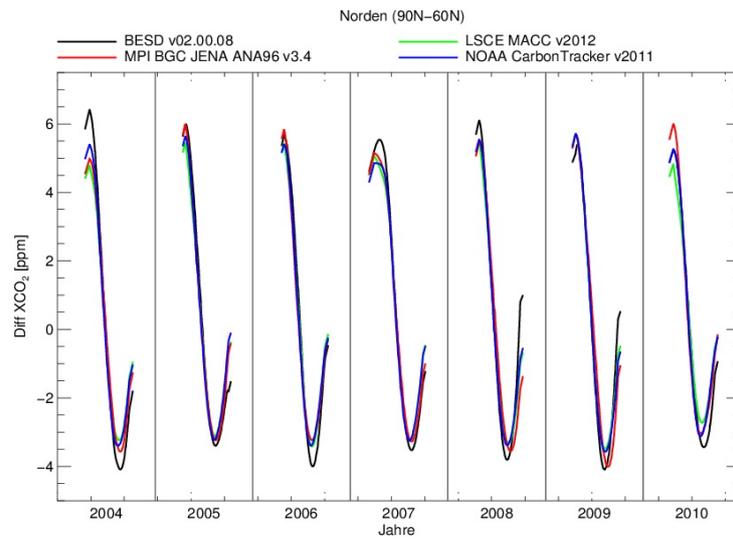


Abbildung 7.10: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 90°N und 60°N

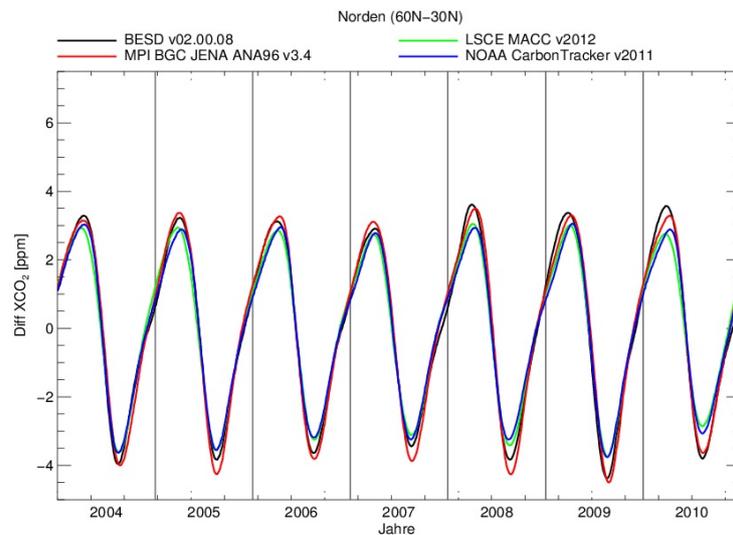


Abbildung 7.11: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 30°N und 60°N

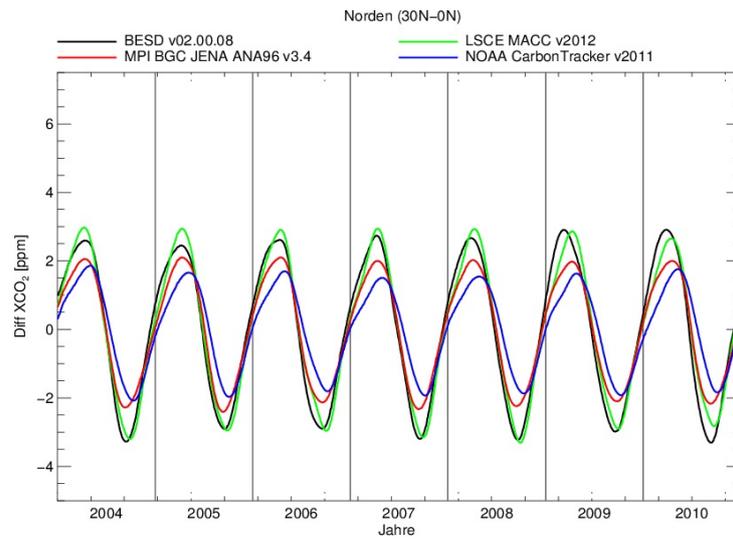


Abbildung 7.12: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 0°N und 30°N

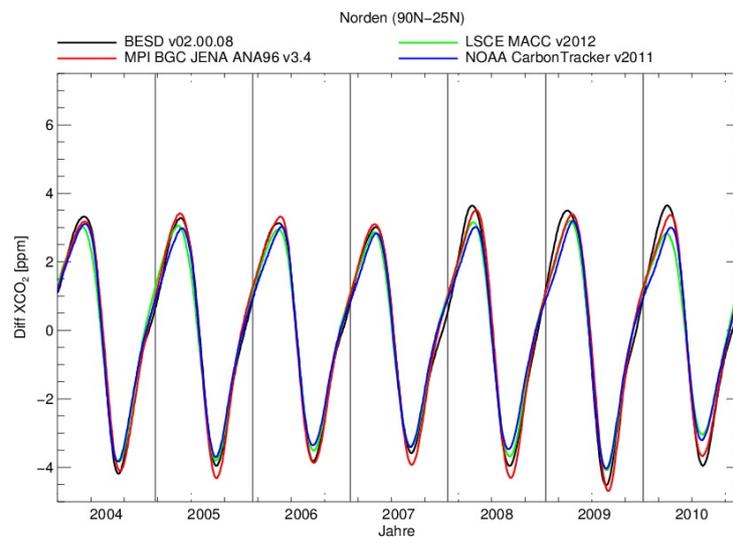


Abbildung 7.13: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 90°N und 25°N

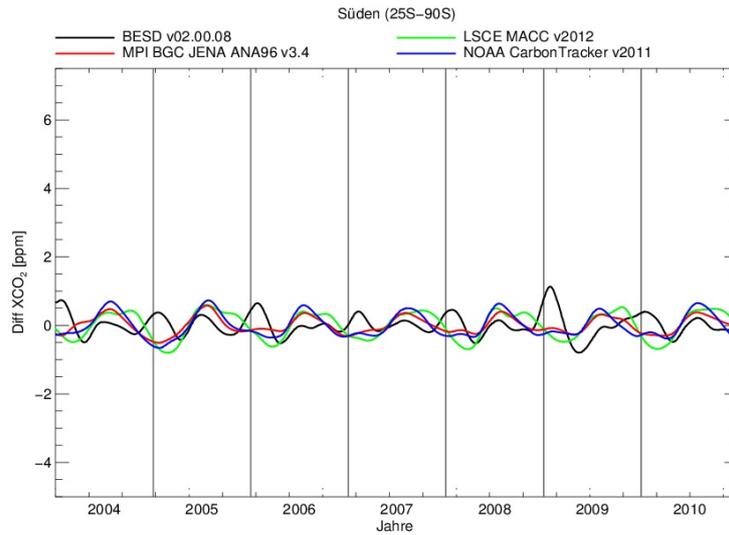


Abbildung 7.14: Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 90°S und 25°S

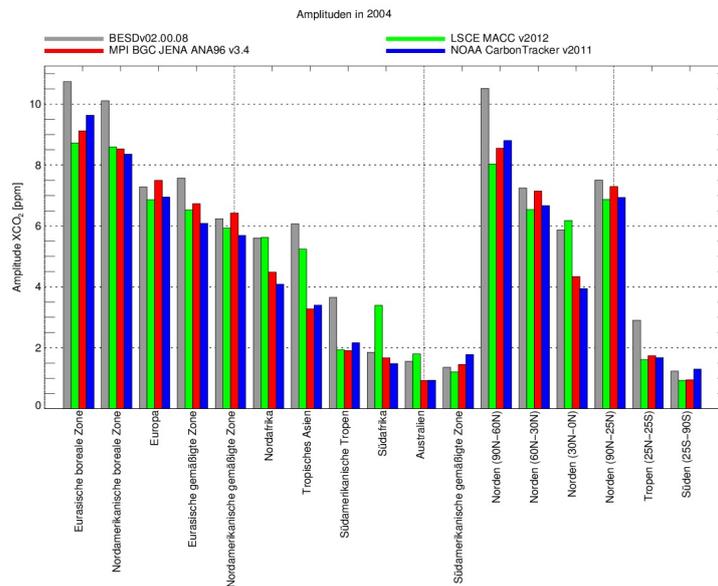


Abbildung 7.15: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2004

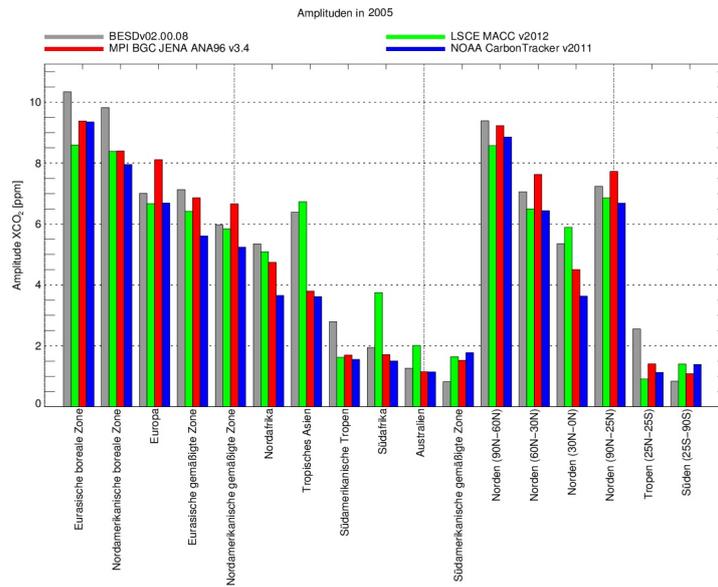


Abbildung 7.16: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2005

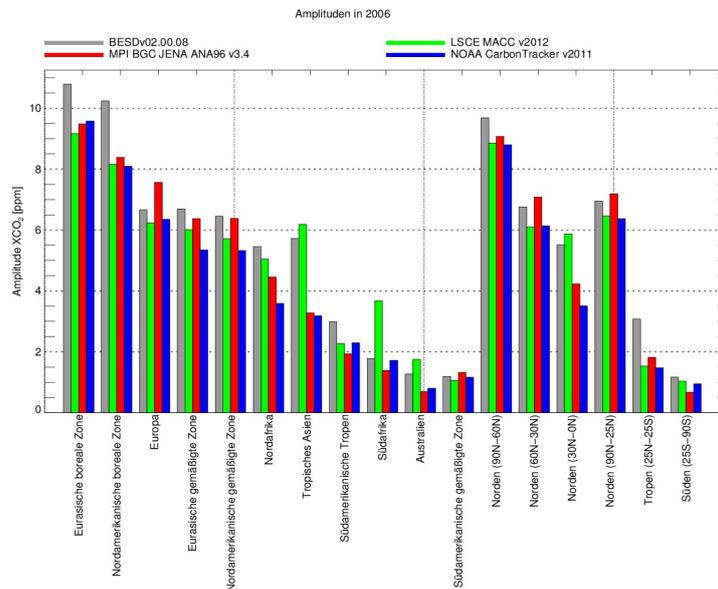


Abbildung 7.17: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2006

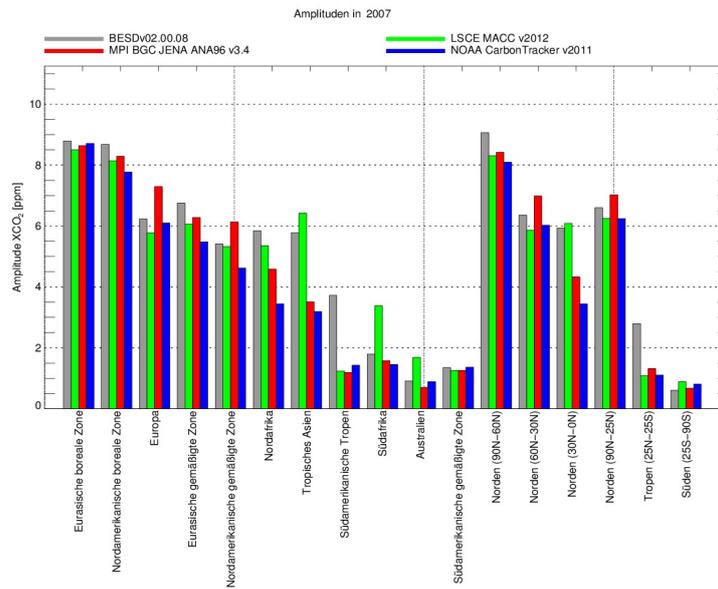


Abbildung 7.18: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2007

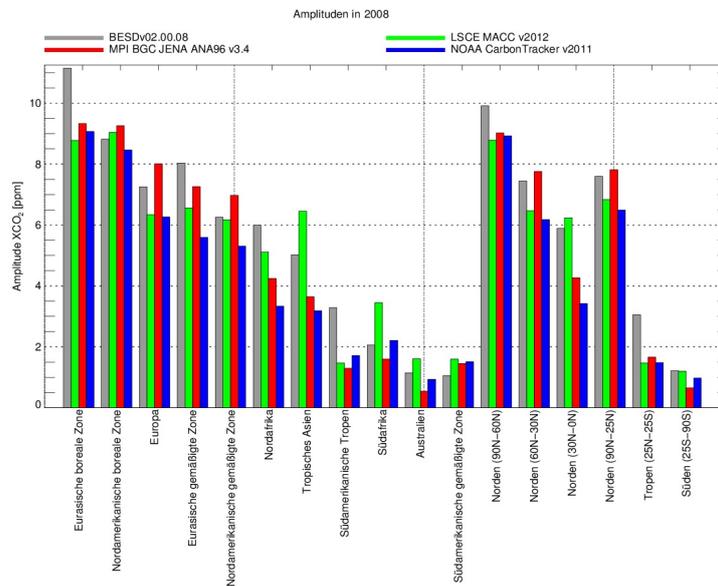


Abbildung 7.19: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2008

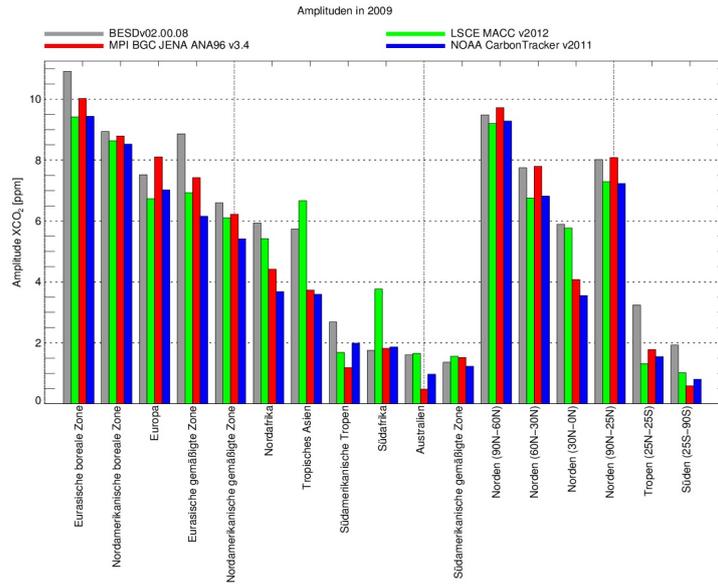


Abbildung 7.20: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2009

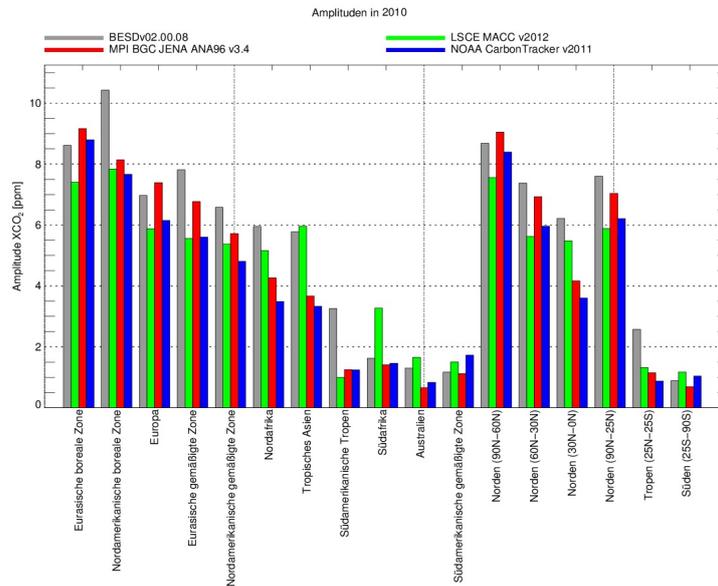


Abbildung 7.21: Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2010

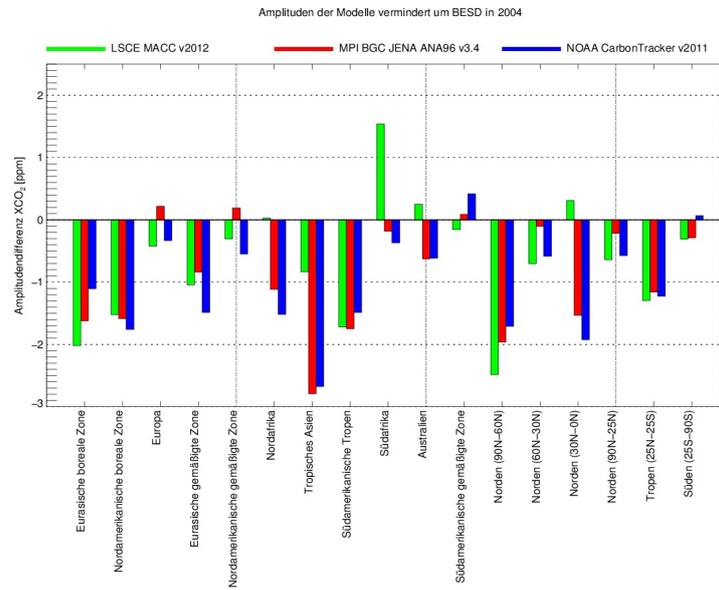


Abbildung 7.22: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2004

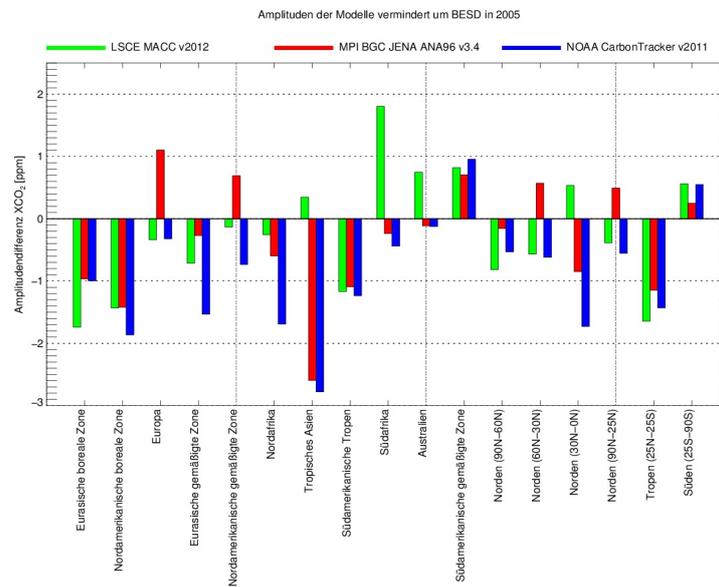


Abbildung 7.23: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2005

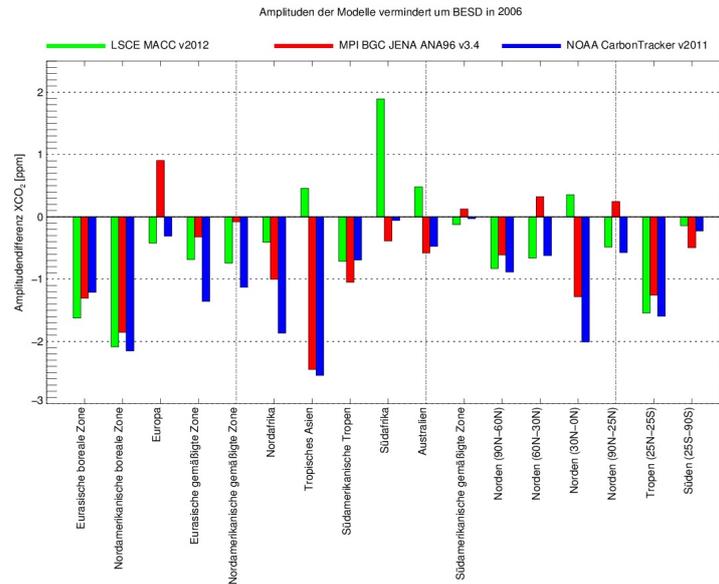


Abbildung 7.24: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2006

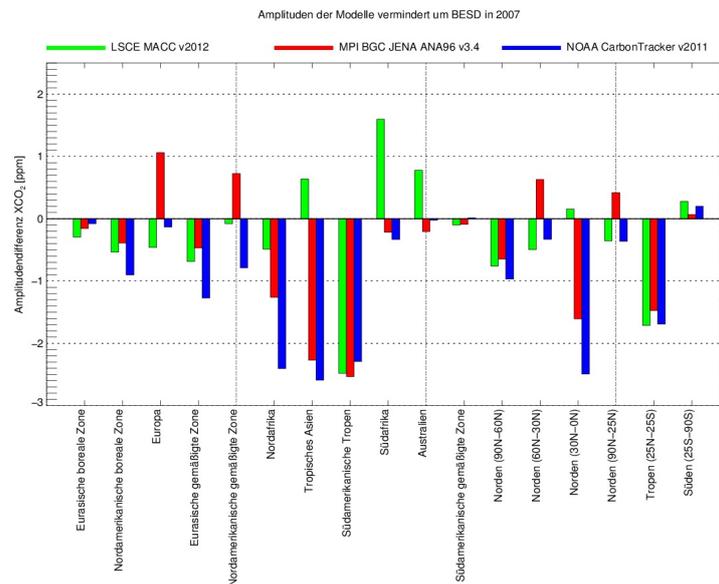


Abbildung 7.25: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2007

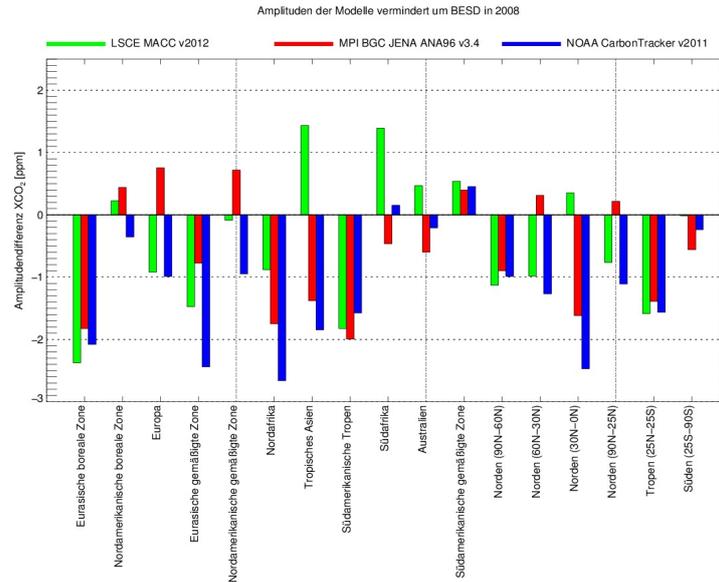


Abbildung 7.26: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2008

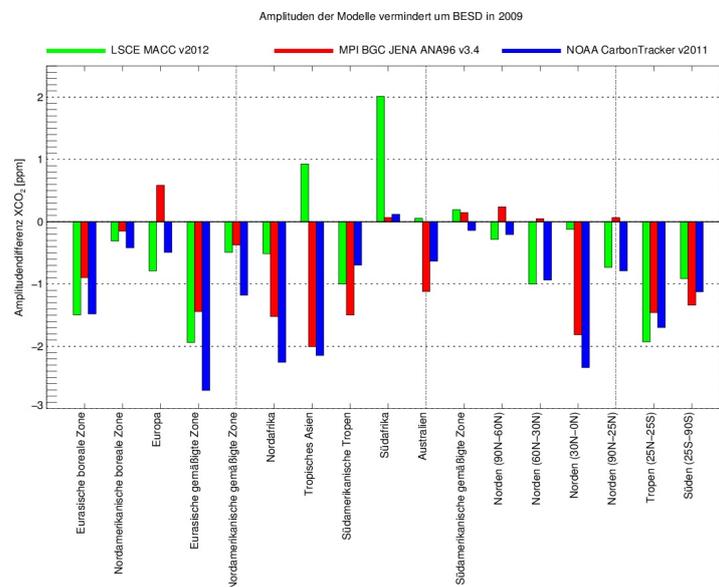


Abbildung 7.27: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2009

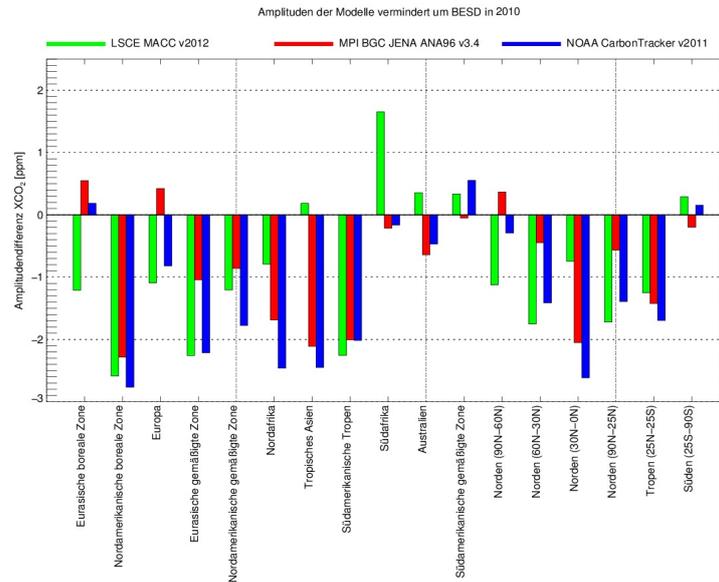


Abbildung 7.28: Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2010

Literaturverzeichnis

- Basu, S., Houweling, S., Peters, W., Sweeney, C., Machida, T., Maksyutov, S., Patra, P. K., Saito, R., Chevallier, F., Niwa, Y., Matsueda, H., & Sawa, Y. 2011. The seasonal cycle amplitude of total column CO₂: Factors behind the model-observation mismatch. *J. Geophys. Res.*, **116**, D23306.
- Bovensmann, H., Burrows, J. P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V. V., Chance, K. V., & Goede, A. 1999. SCIAMACHY – Mission Objectives and Measurement Modes. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 127–150.
- Burba, G. 2013. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA.
- Burrows, J. P., Hölzle, E., Goede, A. P. H., Visser, H., & Fricke, W. 1995. SCIAMACHY – Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography. *Acta Astronautica*, **35**(7), 445–451.
- CarbonTracker-Dokumentation. 2011. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/CT2011/documentation.html>.
- Chevallier, F., Fisher, M., Peylin, P., Serrar, S., Bousquet, P., Breon, F.-M., Chedin, A., & Ciais, P. 2005. Inferring CO₂ sources and sinks from satellite observations: Method and application to TOVS data. *J. Geophys. Res.*, **110**(D24309).
- Chevallier, F., Ciais, P., Conway, T.J., Aalto, T., Anderson, B.E., Bousquet, P., Brunke, E.G., Ciattaglia, L., Esaki, Y., M. Fröhlich, M., Gomez, A., Gomez-Pelaez, A.J., Haszpra, L., Krummel, P.B., Langenfelds, R.L., Leuenberger, M., Machida, T., Maignan, F., Matsueda, H., Morgui, J.A., Mukai, H., Nakazawa, T., Peylin, P., Ramonet, M., Rivier, L., Sawa, Y., Schmidt, M., Steele, L.P., Vay, S.A., Verneulen, A.T., & Wofsy, S. und D. Worthy, D. 2010. CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements. *J. Geophys. Res.*, **115**(D21307).
- Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R., Peregon, A., Rayner, P. J., Miller, C., Gobron, N., Kinderman, G., Marland, G., Gruber, N., Chevallier, F., Andres, R. J. G. Balsamo, G., Bopp, L., Breon, F.-M., Broquet, G., Dargaville, R., Battin, T. J.,

- Borges, A., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Butler, J., Canadell, J. G., Cook, R. B., DeFries, R., Engelen, R., Gurney, K. R., Heinze, C., Heimann, M., Held, A., Henry, M., Law, B., Luyssaert, S., Miller, J., Moriyama, T., Moulin, C., Myneni, R. B., Nussli, C., Obersteiner, M., Ojima, D., Pan, Y., Paris, J.-D., Piao, S. L., Poulter, B., Plummer, S., Quegan, S., Raymond, P., Reichstein, M., Rivier, L., Sabine, C., Schimel, D., Tarasova, O., Valentini, R., Wang, R., van der Werf, G., Wickland, D., Williams, M., & Zehner, C. 2014. Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences*, **11**, 3547–3602.
- Crisp, D., Atlas, R. M., Bréon, F.-M., Brown, L. R., Burrows, J. P., Ciais, P., Connor, B. J., Doney, S. C., Fung, I. Y., Jacob, D. J., Miller, C. E., O'Brien, D., Pawson, S., Randerson, J. T., Rayner, P., Salawitch, R. S., Sander, S. P., Sen, B., Stephens, G. L., Tans, P. P., Toon, G. C., Wennberg, P. O., Wofsy, S. C., Yung, Y. L., Kuang, Z., Chudasama, B., Sprague, G., Weiss, P., Pollock, R., Kenyon, D., & Schroll, S. 2004. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. *Adv. Space Res.*, **34**, 700–709.
- ESRL. 2008. *Flaschenmessungen*. http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/about/co2_measurements.html.
- GEOMON. 2010. *Flugzeugkampagne*. <http://geomon-wg.ipsl.jussieu.fr/sectins/aircraftcampaigns>.
- GlobeCarbonCycle-Project. 2010. <http://www.nasa.gov/topics/nasalife/features/globe-workshop.html>.
- Gloor, M., Gruber, N., Sarmiento, J. L., Sabine, C. S., Feely, R., & Rdenbeck, C. 2003. A first estimate of present and pre-industrial air-sea CO_2 flux patterns based on ocean carbon measurements and models. *Geophysical Research Letters*.
- Gottwald, M., & Bovensmann, H. (eds). 2011. *SCIAMACHY - Exploring the Changing Earth's Atmosphere*. Springer.
- Heymann, J., Schneising, O., Reuter, M., Buchwitz, M., Rozanov, V., Velasco, V. A., Bovensmann, H., & Burrows, J. P. 2012a. SCIAMACHY WFM-DOAS XCO_2 : comparison with CarbonTracker XCO_2 focusing on aerosols and thin clouds. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 1935–1952.
- Hourdin, F. and Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron, F., Dufresne, J. L., Fairhead, L., Filiberti, M. A., Friedlingstein, P., Grandpeix, J. Y., Krinner, G., Levan, P., Li, Z. X., & Lott, F. 2006. The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics*, **27**, 787–813.
- IPCC, Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., V., Bex, & M., Midgley P. 2013. *Climate Change 2013: The*

Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Keppel-Aleks, G., Wennberg, P. O., Washenfelder, R. A., Wunch, D., Schneider, T., Toon, G. C., Andres, R. J., Blavier, J.-F., Connor, B., Davis, K. J., Desai, A. R., Messerschmidt, J., Notholt, J., Roehl, C. M., Sherlock, V., Stephens, B. B., Vay, S. A., & Wofsy, S. C. 2012. The imprint of surface fluxes and transport on variations in total column carbon dioxide. *Biogeosciences*, **9**, 875–891.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., & Prentice, I. C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere–biosphere system. *Global Biochemical Cycles*, **19**.
- Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., & Hamazaki, T. 2009. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Appl. Opt.*, **48**, 6716–6733.
- Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y. and Nakagawa, Y., Hirotsu, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, N., Ishikawa, K., & Ogawa, T. 2008. Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**(10), 1744–1754.
- Olivier, J.G.J., Berdowski, J.J.M., Peters, J.A.H.W., Bakker, J., Visschedijk, A.J.H., & Bloos, J.-P.J. 2001. Applications of EDGAR. Including a description of EDGAR 3.0: reference database with trend data for 1970–1995. *RIVM Bilthoven*.
- Peters, Wouter, Jacobson, Andrew R., Sweeney, Colm, Andrews, Arlyn E., Conway, Thomas J., Masarie, Kenneth, Miller, John B., Bruhwiler, Lori M. P., Petron, Gabrielle, Hirsch, Adam I., Worthy, Douglas E. J., van der Werf, Guido R., Randerson, James T., Wennberg, Paul O., Krol, Maarten C., & Tans, Pieter P. 2007. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **104**(48), 18925–18930.
- Picarro. 2014. *Cavity-Ring-Down-Spektroskopie*. http://www.picarro.com/technology/cavity_ring_down_spectroscopy.
- Randerson, J. T., van der Werf, G. R., Giglio, L., Collatz, G. J., & Kasibhatla, P. S. 2007. Global Fire Emissions Database, version 2.1. *Oak Ridge*.
- Reuter, M., Buchwitz, M., Schneising, O., Heymann, J., Bovensmann, H., & Burrows, J. P. 2010. A method for improved SCIAMACHY CO₂ retrieval in the presence of optically thin clouds. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 209–232.

- Reuter, M., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Connor, B. J., Deutscher, N. M., Griffith, D. W. T., Heymann, J., Keppel-Aleks, G., Messerschmidt, J., Notholt, J., Petri, C., Robinson, J., Schneising, O., Sherlock, V., Velazco, V., Warneke, T., Wennberg, P. O., & Wunch, D. 2011. Retrieval of atmospheric CO₂ with enhanced accuracy and precision from SCIAMACHY: Validation with FTS measurements and comparison with model results,. *J. Geophys. Res.*, **116**, D04301.
- Reuter, M., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Heymann, J., Hilker, M., & Schneising, O. 2014. *Algorithm Theoretical Basis Document Version 3 – The Bremen Optimal Estimation DOAS (BESD) algorithm for the retrieval of XCO₂ – ESA Climate Change Initiative (CCI) for the Essential Climate Variable (ECV)*. Tech. rept. University of Bremen.
- Rödenbeck, C. 2005. Estimating CO₂ sources and sinks from atmospheric mixing ratio measurements using a global inversion of atmospheric transport. *Technical Report 6, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena*.
- Rodgers, C. D. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Roedel, Walter. 2000. *Physik unserer Umwelt: die Atmosphäre*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Rozanov, A, Rozanov, V, Buchwitz, M, Kokhanovsky, A, & Burrows, JP. 2005. SCIA-TRAN 2.0 - A new radiative transfer model for geophysical applications in the 175-2400 nm spectral region. *Pages 1015–1019 of: Burrows, JP, & Eichmann, KU (eds), Atmospheric remote sensing: Earth’s surface, troposphere, stratosphere and mesosphere - I*. Adv. Space Res., vol. 36, nos. 5, Sp. Iss. 2005. 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France, JUL 18-25, 2004.
- Schneising, O., Buchwitz, M, Reuter, M., Heymann, J., Bovensmann, H., & Burrows, J. P. 2011. Long-term analysis of carbon dioxide and methane column-averaged mole fractions retrieved from SCIAMACHY. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2863–2880.
- Schneising, O., Bergamaschi, P., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Deutscher, N. M., Griffith, D. W. T., Heymann, J., Macatangay, R., Messerschmidt, J., Notholt, J., Rettinger, M., Reuter, M., Sussmann, R., Velazco, V. A., Warneke, T., Wennberg, T. O., & Wunch, D. 2012. Atmospheric greenhouse gases retrieved from SCIAMACHY: comparison to ground-based FTS measurements and model results. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 1527–1540.
- Schneising, O., Reuter, M., Buchwitz, M., Heymann, J., Bovensmann, H., & Burrows, J. P. 2014. Terrestrial carbon sink observed from space: variation of growth rates and seasonal cycle amplitudes in response to interannual surface temperature variability. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 133–141.
- SCIAMACHY. 2012. <http://www.sciamachy.org/>.

- Sitch, S., Smith, B., Prentice, I.C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M., Thonicke, K., & Venevski, S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model. *Global Change Biology*, **9**, 161–185.
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Sweeney, C., Poisson, A., Metzl, N., Tilbrook, B., Bates, N., Wanninkhof, R., Feely, R. A., Sabine, C., Olafsson, J., & Nojiri, Y. 1999. Global sea–air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*.
- Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C. and Feely, R.A., Chipman, D.W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., & Sabine, C. et al. . 2009. Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO₂, and net sea–air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Research Part II*, **56**, 554–577.
- Transcom. 2011. *Transcom–Regionen*. http://transcom.project.asu.edu/transcom03_protocol_basisMap.php.
- Trenberth, K., Fasullo, J.T., & Kiehl, J. 2009. Earth’s global energy budget. *American Meteorological Society*.
- Wanninkhof, R. 1992. Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *J. Geophys. Res.*, **97**, 7373–7381.
- Wunch, D., Toon, G. C., Blavier, J.F.L., Washenfelder, R. A., Notholt, J., Connor, B. J., Griffith, D. W. T., Sherlock, V., & Wennberg, P. O. 2011. The Total Carbon Column Observing Network. *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 2087–2112.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Globale Karten von XCO ₂ - Anomalien basierend auf Satellitendaten (SCIAMACHY, BESD) und Modelldaten (LSCE, MPI, CT) gemittelt über die Monate Januar, Februar und März der Jahre 2003-2010 (Reuter, 2014) . .	3
2.1	Der Strahlungshaushalt der Erde (Trenberth <i>et al.</i> , 2009)	5
2.2	Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs. In rot sind die Kohlenstoff-Flüsse und in blau die Kohlenstoff-Reservoirs dargestellt (GlobeCarbonCycle-Project, 2010)	7
2.3	Die modellierte globale Bodenerwärmung. Die Simulationen beruhen auf verschiedenen Szenarien (IPCC <i>et al.</i> , 2013)	8
2.4	Schematische Darstellung der <i>Eddy Kovarianz</i> -Methode zur Messung der CO ₂ -Flüsse (Burba, 2013).	12
3.1	Der Umweltsatellit Envisat mit dem Spektrometer SCIAMACHY (Gottwald & Bovensmann, 2011)	14
3.2	Karte aller Messstationen, deren Daten von dem Modell LSCE MACC v2012 assimiliert werden (Chevallier <i>et al.</i> (2010))	18
3.3	Karte der assimilierten Messstationen des Modell MPI BGC JENA ANA96. Die Kürzel bezeichnen die einzelnen Messstationen, wobei CFA beispielsweise für Cape Ferguson Australia steht (Rödenbeck, 2005)	20
3.4	Karte der assimilierten Messstationen des CarbonTracker- Modells aus der Dokumentation auf http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/CT2011/documentation.html	21
3.5	Einteilung Nordamerikas in seine Ökosystem-Regionen aus der Dokumentation (CarbonTracker-Dokumentation, 2011)	21
4.1	Die 22 Transcom-Regionen aus (Transcom, 2011)	24

4.2 Darstellung der verwendeten Methode der Datenverarbeitung am Beispiel von zwei Regionen. a) Ursprungsdaten und Ergebnis der Faltung dieser Daten mit dem Hanning-Fenster (zwei Monate effektiv) (Linie), b) ausführliche Beschreibung der Auswertungsschritte für Region 2 über die sieben Jahre der Messdaten des Satelliten, reduzierte Daten- und Index-Vektoren der Region 2, c) die Daten aus den beiden Abbildungen aus b) mit je einer Rechtecksfunktion geglättet. 26

4.3 Qualitative Darstellung der verwendeten Glättungsfunktionen 27

4.4 Darstellung der Messwerte des Satelliten für Region 2 in Form einer Matrix à 365 x 7 28

4.5 Darstellung der verwendeten Methode der Datenverarbeitung am Beispiel von zwei Regionen. d) mit dem Hanning- Fenster und der Rechtecksfunktion geglättete Daten für beide Regionen, e) Differenz der Kurven aus d) “peak-to-peak“-Amplitude eingezeichnet in Rot. 29

5.1 Darstellung der über sieben Jahre gemittelten Jahresgangamplitude der XCO₂-Werte der vier Datenquellen für 17 Regionen, die sich aus 11 Transcom-Regionen und sechs eigens definierten Arealen zusammensetzen, geordnet nach dem Breitengrad. 31

5.2 Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für Europa 33

5.3 Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für die Tropen (25°N- 25°S). 34

5.4 Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für Australien. 36

5.5 Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für die nordamerikanische boreale Zone. 37

5.6 Darstellung der Differenz der mittleren XCO₂- Jahresgangamplituden aus Abbildung 5.1 (Modell-Satellit) der vier Datenquellen für 17 Regionen, geordnet nach dem Breitengrad. 38

5.7 Darstellung der prozentualen Differenz der mittleren XCO₂- Jahresgangamplituden aus Abbildung 5.1 (Modell-Satellit) der vier Datenquellen für 17 Regionen, geordnet nach dem Breitengrad. 40

7.1 Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der eurasischen borealen Zone 49

7.2 Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO₂-Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der eurasischen gemäßigten Zone 50

7.3	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der nordamerikanischen gemäßigten Zone	50
7.4	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten Nordafrikas	51
7.5	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für das tropische Asien	51
7.6	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten für die südamerikanischen Tropen	52
7.7	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten Südafrikas	52
7.8	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten Australiens	53
7.9	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der südamerikanischen gemäßigten Zone	53
7.10	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 90°N und 60°N	54
7.11	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 30°N und 60°N	54
7.12	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 0°N und 30°N	55
7.13	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 90°N und 25°N	55
7.14	Darstellung des um die Wachstumsrate reduzierten Jahresganges der XCO ₂ -Werte des MPI-, CT-, LSCE- Modells und der Messwerte des Satelliten der breitengradbedingten Region zwischen 90°S und 25°S	56
7.15	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2004	56
7.16	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2005	57
7.17	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2006	57
7.18	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2007	58
7.19	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2008	58
7.20	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2009	59
7.21	Amplituden der drei Modelle und des Satelliten für das Jahr 2010	59

7.22	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2004	60
7.23	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2005	60
7.24	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2006	61
7.25	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2007	61
7.26	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2008	62
7.27	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2009	62
7.28	Differenz der Amplituden der drei Modelle zum Satelliten für das Jahr 2010	63

Tabellenverzeichnis

5.1	Mittlere Jahresgangamplitude und die entsprechende Standardabweichung, berechnet aus den täglichen Mitteln von SCIAMACHY BESD XCO ₂ und den drei Modellen für 17 Regionen (alle Werte in ppm).	32
5.2	Jährliche Abweichungen der Amplitude aus den Modelldaten von den vom Satelliten gemessenen, gemittelt über die Transcom-Regionen, die Regionen der Nord- und Südhemisphäre, Jahresmittel ist der Mittelwert über die jährlichen Differenzen und der Fehler ist die entsprechende Standardabweichung (alle Werte in ppm).	42
5.3	Amplituden der Modelldaten und der Satellitendaten, gemittelt über die Transcom-Regionen und über die Regionen der Nord- und Südhemisphäre (alle Werte in ppm), mittlere Abweichung der Modell zu BESD, prozentuale Abweichung der Ergebnisse aus der obigen Teiltabelle der Modell zu dem Satelliten (alle Werte in %), RMS der Differenz der Modelle zu BESD (alle Werte in ppm).	44

Diese Erklärungen sind in jedes Exemplar der Abschlussarbeit mit einzubinden.

Name: _____

Matrikel-Nr.: _____

Urheberrechtliche Erklärung

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

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

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

Die Bachelorarbeit darf nach Abgabe nicht mehr verändert werden.

Datum: _____

Unterschrift: _____

Erklärung zur Veröffentlichung von Abschlussarbeiten

Bitte auswählen und ankreuzen:

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

Datum: _____

Unterschrift: _____