Entwicklung eines empirischen Modells zur Approximation atmosphärischer Methankonzentrationen für Satellitendatenauswertungen

Bachelorarbeit

Eingereicht von:Pascal WintjenErstprüfer:Prof. Dr. John P. BurrowsZweitprüfer:Dr. Annette Ladstätter-WeißenmayerBetreuer:Dr. M. ReuterAbgabe:20.10.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4								
2	Grundlagen									
	2.1 Der Treibhauseffekt									
	2.2 Das Gas Methan	. 8								
	2.2.1 Natürliche und anthropogene Quellen und Senken von CH_4	. 10								
	2.2.2 Wirkung auf das Erdklima	. 14								
	2.3 Messung von Methan	. 17								
	2.3.1 In-situ-Messungen	. 18								
	2.3.2 Total Carbon Column Observation Network (TCCON)	. 18								
	2.3.3 Satellitenmessungen	. 19								
	2.4 Algorithmen zur Auswertung von Satellitenmessungen	. 21								
	2.5 Simple Empirical CO_2 Model (SECM)	. 23								
	2.6 CarbonTracker-CH ₄ 2010 (CT-CH ₄) $\ldots \ldots \ldots$. 24								
3	Entwicklung eines empirischen CH_4 Modells (EMMO)									
	3.1 Verwendung der $CT-CH_4$ Daten	. 26								
	3.2 Fit-Parameter	. 32								
	3.3 Vergleich mit XCH_4 von CarbonTracker- CH_4	. 34								
4	Validation gegen TCCON	45								
	4.1 Verwendung der TCCON-Daten	. 45								
	4.2 Validationsergebnisse	. 47								
5	Zusammenfassung	58								
6	Ausblick	59								
7	Danksagung	60								
8	Literaturverzeichnis	62								

Abstract

Methan (CH₄) ist wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) ein wichtiges anthropogenes Treibhausgas. Daher wird in dieser Bachelorarbeit ein, vom Autor entwickeltes, Empirisches Methan MOdell (EMMO) vorgestellt, welches gestattet, säulengemittelte molare Mischungsverhältnisse von CH₄ in trockener Luft (XCH₄) für den Zeitraum vom 1.01.2002 bis zum 31.12.2010, als Funktion des Breitengrades und der Zeit, zu berechnen. EMMO erlaubt es, das XCH₄ mittels einer Gleichung, die durch 21 Parameter beschrieben wird, zu modellieren. Die Parameter wurden mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Zur Modellierung von EMMO werden die CH₄-Daten von CarbonTracker-CH₄ 2010 (CT-CH₄) verwendet, das ein von NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) CT entwickeltes Assimilationssystem ist. CT modelliert zunächst molare Mischungsverhältnisse CH₄, die mittels atmosphärischer Transportmodelle und biochemischer Modelle generiert werden. Diese werden gegen CH₄-Messungen des NOAA ESRL (Earth System Research Laboratory) Netzwerkes assimiliert.

Um EMMO zu validieren, wurde ein Vergleich mit globalen Karten von CT-CH₄ und mit TC-CON (Total Carbon Column Observation Network) vollzogen. TCCON ist ein unabhängiges globales Netzwerk, welches akkurate Messungen mittels FTS (Fourier Transform Spectrometer) liefert. Beim Vergleich mit dem globalen XCH₄ von CT-CH₄ ließ sich feststellen, dass EMMO die räumlichen und zeitlichen XCH₄-Verteilungen grob erfasst. Es wurde gezeigt, dass EMMO das XCH₄ an allen behandelten TCCON-Stationen mit einer mittleren Differenz von -13.9 ppb, einer Standardabweichung von 13.7 ppb und einer Korrelation von 0.90 wiedergibt. EMMO kann somit als a-priori Wissen für Satellitendatenauswertungen von XCH₄ verwendet werden.

1 Einleitung

Methan (CH₄) ist nach Kohlenstoffdioxid (CO₂) das zweitwichtigste Treibhausgas, das zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt. Nach Beginn der Industrialisierung (~ 1750) ist die Konzentration von CH₄ von (722 ± 25) ppb auf (1803 ± 2) ppb (Stand:2011) [IPCC, 2013] gestiegen. Durch die gestiegenen Konzentrationen von CH₄ und anderen Treibhausgasen ist ein mittlerer Temperaturanstieg an der Erdoberfläche von 0.85° C [IPCC, 2013] zu beobachten.

Daher ist es wichtig, Treibhausgase wie CH_4 , messtechnisch zu erfassen. Ein Grund hierfür ist die zwischen 1999 und 2006 konstante globale CH_4 -Konzentration [Simpson et al., 2012, Kirschke et al., 2013] und der erneute Anstieg ab 2007 [Rigby et al., 2008, Dlugokencky et al., 2009].

Um unter anderem atmosphärisches CH_4 zu messen, werden Flaschen- und Satellitenmessungen genutzt. Flaschenmessungen werden an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre durchgeführt. Zum Beispiel werden die Flaschen in Flugzeugen mitgeführt oder an Türmen befestigt. Die Messungen werden aufgrund ihrer Vielzahl in Messnetzwerke zusammengeführt. Ein in diesem Zusammenhang wichtiges Netzwerk ist das NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ESRL (Earth System Research Laboratory) Netzwerk (*http* : //www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/index.html). Dessen Daten werden von NOAA ausgewertet und mittels deren Assilimilations- und Modellierungsystem CarbonTracker (CT) assimiliert, um die Stärke der globalen CH_4 - und CO_2 -Quellen und Senken abzuschätzen. Hieraus entstehen global assimilierte Datenprodukte, welche es für CO_2 (CarbonTracker-CO₂ [Peters et al., 2007]) und für CH_4 (CarbonTracker-CH₄ [Bruhwiler et al., 2014]) gibt.

Satellitenmessungen haben eine hohe räumliche und zeitliche Abdeckung. Ist deren Messung des säulengemittelten molaren Mischungsverhältnis von CH_4 (XCH₄) sensitiv bis zum Boden, eignen sie sich besonders gut, um Aussagen über Quellen und Senken am Boden zu treffen [Buchwitz et al., 2005]. Allerdings müssen die Messungen genau genug sein [Meirink et al., 2006]. SCIAMACHY und GOSAT sind Satelliteninstrumente, die mit hoher Bodensensitivität messen.

SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) [Burrows et al., 1995, Bovensmann et al., 1999] ist ein Gitterspektrometer, das sich an Bord des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT (ENViromental SATellite) befand. Die Satellitenmission begann im März 2002 und endete im April 2012. GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) [Kuze et al., 2009] ist ein weiterer Satellit, welcher im Januar 2009 startete. An Bord von GOSAT befindet sich das Instrument TANSO (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation), ein FTS (Fourier Transform Spectrometer) und zusätzlich ein CAI (Cloud and Aersol Imaginer).

Um die Satellitendaten auszuwerten sind sogenannte *Retrieval* nötig. *Retrieval* sind Algorithmen, die die gemessenen Spektren von Satelliten mittels eines Strahlungstransfermodells und a-priori Wissen auswerten und XCH₄ zurückgeben. A-priori Wissen kann zum Beispiel aus einer Abschätzung atmosphärischer CH₄-Konzentrationen bestehen.

Man unterscheidet hierbei zwischen "Proxy" und "Full-physics" Retrieval. "Full-physics"

meint die explizite Berücksichtigung atmosphärischer Streuprozesse. Im Gegensatz dazu wird Streuung bei den "Proxy" *Retrieval* nur implizit berücksichtigt.

Das BESD (Bremen Optimal Estimation Differential Optical Estimation Spectroscopy (DOAS)) [Reuter et al., 2010, 2011, 2013] *Retrieval* wurde an der Universität Bremen entwickelt und wurde bisher für die Bestimmung atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen genutzt. Hierfür gibt es geeignetes a-priori Wissen. Das Modell SECM (Simple Empirical CO_2 Model) wird in BESD zur Auswertung als a-priori genutzt [Reuter et al., 2012]. SECM basiert auf CarbonTracker- CO_2 [Peters et al., 2007] und ist ein rein empirisches Modell, welches gegen TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [Wunch et al., 2011], ein Netzwerk aus FTSs (Fourier Transform Spectrometers), validiert wurde.

In dieser Arbeit wird ein neues Empirisches Methan MOdell (EMMO) der globalen XCH₄-Verteilung vorgestellt werden, das auf CarbonTracker-CH₄ (CT-CH₄) beruht und zukünftig als a-priori Wissen für Satellitenretrieval genutzt werden kann. Dazu wird in Kapitel 3 wird beschrieben, wie EMMO entsteht. Dafür wird erklärt, wie CT-CH₄ verwendet wird und die Parameter für EMMO gewonnen werden. Um die Genauigkeit des XCH₄ von EMMO zu bestimmen, wird mit dem XCH₄ von CT-CH₄ verglichen (Kap. 3.3).

Zuletzt wird eine Validation gegen TCCON-XCH₄ durchgeführt (Kap. 4). Es wird erläutert, wie die TCCON-Daten gewonnen werden (Kap. 4.1) und es werden die Valdiationsergebnisse mit dem XCH₄ von EMMO dargelegt (Kap. 4.2). Eine Zusammenfassung wird in Kapitel 5 gegeben. Für eine mögliche Weiterentwicklung von EMMO werden Kapitel 6 Vorschläge gegeben.

Zur Einführung in die Thematik soll Grundwissen vermittelt werden. In Kapitel 2 wird zunächst der Treibhauseffekt (Kap. 2.1) beschrieben. Darauf folgt in Kapitel 2.2 die Wirkung des Treibhausgases CH₄ auf das Erdklima. Es werden zum Beispiel dessen Quellen und Senken aufgezeigt (Kap. 2.2.1). Zum Abschluss des Kapitel 2 wird dargelegt, wie sich atmosphärisches CH₄ messen lässt (Kap. 2.3), welche "Proxy" und "Full-physics" *Retrieval* es gibt (Kap. 2.4) und SECM eingeführt (Kap. 2.5). Zudem wird in Kapitel 2.6 eine Einführung zu CT-CH₄ gegeben.

2 Grundlagen

Da CH_4 ein Treibhausgas ist, wird zuerst der Treibhauseffekt (Kap. 2.1) beschrieben. Danach werden die anthropogenen Einflüsse auf den Treibhauseffekt (Kap. 2.2) gezeigt. Hierzu werden die Ursachen für die steigenden CH_4 -Konzentrationen genannt und die Quellen und Senken von CH_4 beschrieben (Kap. 2.2.1). Darauf aufbauend wird gezeigt, wie groß der CH_4 -Einfluss im Vergleich zu anderen Gasen auf die Strahlungsbilanz heute ist und wie dieser zukünftig sein kann (Kap. 2.2.2).

Um Erkenntnisse über die Quellen und Senken von CH_4 zu gewinnen (und damit die atmosphärischen CH_4 -Konzentrationen zu bestimmen), sind Messungen nötig (Kap. 2.3). Es wird gezeigt, welche Instrumente sich für CH_4 -Messung eignen. Es bieten sich Flaschenmessungen an, die vom NOAA ESRL Netzwerk betrieben werden (Kap. 2.3.1) und Messungen von Absorptionsspektren der Treibhausgase, die an TCCON-Stationen (Kap. 2.3.2) und von Satelliten (Kap. 2.3.3) durchgeführt werden. Satellitenspektren werden von *Retrieval* (Kap. 2.4) ausgewertet, die a-priori Wissen benötigen. Um a-priori Wissen für CO_2 zu erhalten, kann SECM (Kap. 2.5) verwendet werden. SECM und CT- CH_4 , welches in Kapitel 2.6 kurz vorgestellt wird, bilden die Grundlage für EMMO.

2.1 Der Treibhauseffekt

Im Folgenden wird der Treibhauseffekt beschrieben, zu welchem eine ausführlichere Diskussion in Roedel and Wagner [2011] gegeben ist. Der Treibhauseffekt wird verursacht durch die sogenannten Treibhausgase. Diese sind Wasserdampf (H₂O, CO₂, Ozon (O₃), Distickstoffoxid (N₂O) und CH₄. Die Treibhausgase haben gemein, dass sie das kurzwellige Sonnenlicht kaum absorbieren. Dafür aber absorbieren und emittieren sie Strahlung im infraroten Spektralbereich und tragen so zur Erwärmung der Erdoberfläche und bodennaher Luftschichten bei. In Abbildung 2.1 sind die ein- und ausgehenden Strahlungsflüsse der Erdatmosphäre wie auch der Treibhauseffekt dargestellt.



Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Energieflüsse in der Erdatmosphäre in $\frac{W}{m^2}$. Mit aufgeführt ist die Wirkungsweise des Treibhauseffektes. In Klammern sind die Unsicherheitsbereiche angegeben. (Quelle: [IPCC, 2013, Kap. 2.3.1])

Durch Einstrahlung des Sonnenlichts, welches beim Durchgang durch die Atmosphäre die Erdoberfläche erreicht, wird die Erdoberfläche erwärmt. Dabei kommen von 340 $\frac{W}{m^2}$ eingehender Strahlung nur 161 $\frac{W}{m^2}$ am Erdboden an (Abb. 2.1). Ein Großteil wird in der Atmosphäre an Wolken oder Aerosolen reflektiert (100 $\frac{W}{m^2}$). Ein anderer Teil wird durch Gase wie O₃ absorbiert (79 $\frac{W}{m^2}$). Durch O₃ wird das ultraviolette Licht (UV) absorbiert. Ein eher geringer Anteil der solaren Strahlung wird von der Erdoberfläche reflektiert (24 $\frac{W}{m^2}$).

Infolge der Erwärmung durch solare Strahlung gibt die Erdoberfläche 398 $\frac{W}{m^2}$ (Abb. 2.1) in Form von langwelliger Infrarotstrahlung an die Atmosphäre ab. Ein Teil der abgestrahlten Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen im infraroten Spektrum absorbiert. Die Treibhausgase emittieren Wärmestrahlung in alle Richtungen, wovon ein Teil von der Erdoberfläche absorbiert wird und zu einer Erwärmung führt. Dieser Teil der Wärmestrahlung wird als thermische Gegenstrahlung bezeichnet, welche mit 342 $\frac{W}{m^2}$ (Abb. 2.1) quantifiziert wird. Dieser Effekt wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Auf die thermische Gegenstrahlung nehmen auch Wolken und Aerosole Einfluss.

Der Bereich, in dem keine Absorption stattfindet, wird atmosphärisches Fenster genannt. Thermische Strahlung im Wellenlängenbereich des atmosphärischen Fensters kann die Atmosphäre nahezu ungehindert durchdringen. Durch das atmosphärische Fenster und durch Wärmeemissionen von Aerosolen, atmosphärischen Gasen und Wolken können 239 $\frac{W}{m^2}$ an den

Weltraum abgestrahlt werden.

Durch Verdunstung wird Wärme von der Erdoberfläche mittels Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben. Wasserdampf bildet in der Atmosphäre durch Kondensation Wolken und gibt dabei frei werdende Wärme (auch latent genannt) an die Atmosphäre ab.

Befände sich das System Erde in einem Strahlungsgleichgewicht, wäre der eingehende Fluss solarer Strahlung genauso groß wie der ausgehende Fluss an langwelliger Infrarotstrahlung. Jedoch werden zur Zeit 0.6 W m^{-2} mehr von der Erdoberfläche aufgenommen als sie emittiert. Dies wird verursacht durch die erhöhten Konzentrationen der Treibhausgase CH₄, CO₂ und N₂O [IPCC, 2013].

Die gestiegenen Konzentrationen der genannten Treibhausgase und synthetischer Gase wie die FCKW (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) sind auf menschliche (anthropogene) Tätigkeiten zurückzuführen. Durch die anthropogenen Emissionen der Treibhausgase steigen deren atmosphärische Konzentrationen und die Unausgewogenheit des Strahlungsgleichgewichtes erhöht sich. Diese Auswirkungen werden unter dem Begriff des anthropogenen Treibhauseffektes zusammengefasst.

2.2 Das Gas Methan

Die CH_4 -Konzentrationen in der Atmosphäre, deren zeitlicher Verlauf in Abbildung 2.2 dargestellt ist, sind erst durch anthropogene Tätigkeiten deutlich angestiegen. Abb. 2.2: Zeitlicher Verlauf der atmosphärischen Konzentrationen der drei wichtigsten anthropogenen Treibhausgase CO₂ (rot), CH₄ (blau) und N₂O (schwarz). Der dargestellte Zeitraum reicht von dem Jahr 0 bis 2005. Die atmosphärischen Konzentrationen vergangener Jahre wurden zum Beispiel aus Eiskernbohrungen bestimmt. Die Konzentrationen von CO₂ werden in ppm, die von CH₄ und N₂O hingegen in ppb angegeben. Die Abbildung wurde Solomon et al. [2007] entnommen.



Der Anstieg der Konzentrationen ist nach 1800 deutlich zu erkennen. Zurückzuführen ist dies auf den Beginn der Industrialisierung, die um 1750 einsetzte [IPCC, 2013]. Dadurch stiegen die anthropogenen Emissionen von CO_2 , CH_4 und N_2O . So lagen die Konzentrationen im Jahre 1800 von CO_2 bei etwa 280 ppb, von CH_4 bei etwa 720 ppb und von N_2O bei 270 ppb. Im Jahr 2005 hingegen lagen die Konzentrationen für CO_2 bei 380 ppb, für CH_4 bei 1770 ppb und für N_2O bei etwa 320 ppb (Abb. 2.2). Im Vergleich zu CO_2 und N_2O sind die CH_4 -Konzentrationen von 1800 bis 2005 am stärksten gestiegen, da sie um den Faktor 2.45 zugenommen haben. Begründet ist dies in gestiegenen Emissionen der anthropogenen Quellen des CH_4 [IPCC, 2013]. Vor diesem Hintergrund wird in Kapitel 2.2.1 gezeigt, welche CH_4 -Quellen große Quellstärke besitzen und welche Senken CH_4 hat. Unterschieden werden die Quellen in natürliche und anthropogene. Um den heutigen Einfluss des CH_4 auf das Erdklima zu zeigen, wird dessen Strahlungsantrieb und dessen globales Erwärmungspotential gezeigt. Der Strahlungsantrieb von CH_4 wird mit denen der anderen Treibhausgase verglichen und es wird kurz auf die zukünftige Entwicklung des Strahlungsantriebes der Treibhausgase eingegangen.

2.2.1 Natürliche und anthropogene Quellen und Senken von CH₄

Anhand Abbildung 2.3 lassen sich die natürlichen und anthropogenen Quellen und Senken von CH_4 erkennen. Quellen werden durch aufwärtsgerichtete Pfeile, Senken hingegen durch abwärtsgerichtete Pfeile dargestellt. Zudem sind Reservoirs von CH_4 mit abgebildet. Um die Stärke der Quellen und Senken zu unterscheiden, sind deren Flüsse in Teragramm pro Jahr ($Tg(CH_4)/yr$) angegeben. Die in Abbildung 2.3 gezeigten Werte beziehen sich auf den Zeitraum von 2000 bis 2009.



Abb. 2.3: Schematische Darstellung des CH_4 -Kreislaufes. Die Zahlenwerte geben die jährlichen Flüsse in Teragramm pro Jahr $(Tg(CH_4)/yr)$ und die Masse des CH_4 in den Reservoirs in $Tg(CH_4)$ wieder. Die Zahlenwerte gelten für die Zeitspanne 2000-2009 und geben Minimal- und Maximalwert an. Schwarze Pfeile sollen Flüsse natürlichen Ursprungs, rote Pfeile Flüsse anthropogenen Ursprungs aufzeigen und der hellbraune Pfeil stellt eine Mischung beider Flussarten dar. Die Pfeilrichtung gibt an, ob der zugehörige Fluss eine Quelle oder Senke ist. Das vorindustrielle globale Mittel an CH_4 beträgt 1984 Tg und wurde mittels Eiskernbohrungen abgeschätzt. Zwischen 1750 und 2011 sind weitere 2970 ± 45 Tg dazugekommen. Der gemittelte atmosphärische Anstieg gilt für den Zeitraum von 2000 bis 2009 und bezieht sich auf einen Wert von 2.2 ppb/yr. Die Menge an CH_4 in der Atmosphäre kann mittels des Faktors 2.7476 $Tg(CH_4)/ppb$ in Einheiten von ppb umgerechnet werden. (Quelle: [IPCC, 2013, Kap. 6.1.1.2])

Auffallend sind die großen geologischen CH₄-Ressourcen, welche im Permafrostboden, in den Gasreserven und in Hydraten im Ozean gespeichert sind (Abb. 2.3). Das in den Hydraten vorhandene CH₄ im Ozean macht das größte Reservoir aus. Es ist zur Zeit mit großer Unsicherheit behaftet, da die Menge an CH₄ von $2 \cdot 10^6$ bis $8 \cdot 10^6$ Tg reicht. Das zweitgrößte Reserviour bilden die Gasreserven. Diese besitzen auch eine hohe Unsicherheit (511.000 bis 1.513.000 Tg). Im Permafrostboden kann die Menge an CH₄ zur Zeit nur auf einen Wert kleiner als 530.000 Tg abgeschätzt werden [IPCC, 2013].

Die natürlichen Quellen von CH_4 sind in Abbildung 2.3 durch schwarze aufwärts zeigende Pfeile dargestellt. Die größte natürliche Quelle sind Feuchtgebiete mit 177 bis 284 Tg/yr. Weitere natürliche Quellen des CH_4 sind Termiten, Seen und Flüsse und eher geringe Emissionen des Ozeans. Eine stärkere Quelle sind geologische Formationen. Diese beschreiben natürliche Öffnungen an der Erdoberfläche, aus denen CH_4 mit 33 bis 75 Tg/yr austritt. Schlammvulkane und vulkanisch aktive Gebiete zählen als geologische Quellen [IPCC, 2013]. In Seen und Flüssen, die eine Quellstärke von 8 bis 73 Tg/yr besitzen, wird CH_4 wie in Feuchtgebieten durch Mikroben freigesetzt. Diese produzieren CH_4 als Abbauprodukt von organischen Stoffen unter geringen Sauerstoffkonzentrationen [IPCC, 2013].

Bei Verbrennung von Biomasse kann CH_4 unverbrannt entweichen. Dies gilt sowohl bei natürlichen Verbrennungsprozessen, zum Beispiel Waldbrände verursacht durch Hitzeperioden, oder durch anthropogen verursachte Verbrennungen wie Brandrodung [IPCC, 2013]. Da sowohl natürliche als auch anthropogene Tätigkeiten die Stärke dieser Quelle beeinflussen, ist der Pfeil in Abbildung 2.3 mit hellbrauner Farbe gekennzeichnet. Verbrennung von Biomasse hat einen Anteil von 32 bis 39 Tg/yr an den anthropogenen CH_4 -Emissionen, da diese auch Emissionen von biologischen Treibstoffen berücksichtigen (Tabelle 2.1) [IPCC, 2013].

Anthropogene Quellen von CH₄ finden sich in der Landwirtschaft und in der industriellen Öl-, Kohle-, und Gasförderung, bei der CH₄ gewollt oder ungewollt entweicht, zum Beispiel durch unvollständige Verbrennungsprozesse [IPCC, 2013]. Diese werden durch rote Pfeile gekennzeichnet. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe ist mit 85 bis 105 Tg/yr die größte Quelle, während die Viehwirtschaft mit 87 bis 94 Tg/yr die zweitgrößte anthropogene CH₄-Quelle ist. CH₄ wird von Rindern, Schafen, Ziegen, usw. erzeugt, welches durch Verdauung von Futter in deren Mägen entsteht [IPCC, 2013]. Reiskultivation trägt mit 33 bis 40 Tg/yr zur Gesamtheit der anthropogenen CH₄-Emissionen bei (Abb. 2.3). In Mülldeponien und bei der Reiskultivation kann CH₄ durch Abbauprozesse von Mikroben erzeugt werden, welche eine Quellstärke von 67 bis 90 Tg/yr besitzen [IPCC, 2013].

Die hauptsächliche Senke für CH₄ ist der troposphärische Abbau durch Hydroxyl-Radikale (OH•) [IPCC, 2013]. Hierdurch können 454 bis zu 617 Tg/yr CH₄ abgebaut werden. Kleineren Einfluss hat der stratosphärische Abbau durch Hydroxyl-Radikale und die Zerstörung von CH₄ durch Chlor-Radikale (Cl•) (Abb. 2.3). Diese sind mit 16 bis 84 Tg/yr bzw. 13 bis 37 Tg/yr aber deutlich geringer. Nicht nur in der Atmosphäre kann CH₄ abgebaut werden, sondern auch in gut durchlüfteten, nicht zu feuchten Böden und Wäldern können Mikroben CH₄ abbauen. Diese Senke hat eine Stärke von 9 bis 47 Tg/yr [IPCC, 2013]. Durch Abbau von OH• lässt sich die Lebensdauer von CH₄ bestimmen. Diese beträgt nach neuesten Studien für CH₄ 9.1 ± 0.9 yr [Prather et al., 2012].

Zur Übersichtlichkeit werden die Flüsse der CH_4 -Quellen für den Zeitraum von 2000 bis 2009 in Tabelle 2.1 aufgeführt. Zusätzlich ist die beste Schätzung für den Minimal- und Maximalwert der Flüsse angegeben.

Tabelle 2.1: CH_4 -Quellen und Senken für die Zeitspanne von 2000 bis 2009. Die Minimalund Maximalwerte der Flüsse stammen aus Abbildung 2.3. Der angegebene Wert entspricht der besten Schätzung vom Maximal- und Minimalwert. Die Summen der Quellen und Senken gleichen sich nicht aus. Nebenbei sind die Einflüsse verschiedener Arten von Quellen angegeben. Alle Angaben sind in $Tg(CH_4)/yr$. Die Tabelle wurde aus [IPCC, 2013, Kap. 6.3.3] übernommen.

Quellen und Senken	2000-2009		
Quellen	Bottom-Up[Tg(CH ₄)/yr]		
	Emissionen	Bereich der Emissionen	
Feuchtgebiete	217	177-284	
Weitere Quellen	130	61-200	
Frischwasser (Seen, Flüsse)	40	8-73	
Wilde Tiere	15	15-15	
Waldbrände	3	1-5	
Termiten	11	2-22	
geologische Formationen	54	33-75	
Hydrate	6	2-9	
Permafrostböden	1	0-1	
Summe natürlicher Quellen	347	238-484	
Agrarwirtschaft und Verschmutzung	200	187-224	
Reiskulturen	36	33-40	
Viehwirtschaft	89	87-94	
Mülldeponien und Abfall	75	67-90	
Fossile Brennstoffe	96	85-105	
Verbrennung von Biomasse	35	32-39	
Summe anthropogener Quellen	331	304-368	
Senken			
Troposphärisches OH	528	454-617	
Stratosphärisches OH	51	16-84	
Troposphärisches Cl	25	13-37	
Abbau durch atmos. Chemie	604	438-738	
Oxidation in Böden	28	9-47	
Global			
Summe der Quellen	678	542 - 852	
Summe der Senken	632	592-785	

Man erkennt, dass die Senken von CH_4 die Einflüsse der Quellen nicht kompensieren (Tabelle 2.1). Aus den Bottom-Up Schätzungen ergibt sich eine Differenz von 46 Tg CH_4 . Diese Differenz wird durch den gemittelten atmosphärischen Anstieg für den Zeitraum von 2000 bis 2009 von 17 Tg(CH_4)/yr (Abb. 2.3) bestätigt. Verifiziert wird diese Wachstumsrate durch die von IPCC [2013] angegebenen Wachstumsraten der Top-Down Inversionen.

2.2.2 Wirkung auf das Erdklima

Um die Wirkung des Treibhausgases CH_4 zu beschreiben, sei nochmal auf Abbildung 2.2 verwiesen, die die deutlichen Anstiege der Konzentrationen von CH_4 , CO_2 und N_2O zeigt. Auch nach 2005 sind die Konzentrationen weiter gestiegen. So sind die Konzentrationen im Jahr 2011 von CH_4 auf 1803 ppb, von CO_2 auf 391 ppm und von N_2O auf 324 ppb gestiegen [IPCC, 2013]. Diese Werte lassen sich aus Tabelle 2.2 entnehmen.

Tabelle 2.2: Lebenszeiten, Konzentrationen für die Jahre 1750, 2005 und 2011 und die globalen Anstiege der atmosphärischen Konzentrationen von CO₂, CH₄ und N₂O. Die Konzentrationswerte sind Mittelwerte und beruhen auf Aufzeichnungen von National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Die Daten von 2005 stammen vom IPCC-Bericht 2007 (AR4 [Solomon et al., 2007]). Die Werte zu den Treibhausgasen stammen aus IPCC [2013, Kap. 2.2.1]

		_		_	
Treibhausgas	Lebenszeit [yr]	Konzentrationen			Globaler Anstieg
		1750	2005	2011	2005-2011
$\rm CO_2 [ppm]$	30-95 [Jacobsen, 2005]	278 ± 2	379 ± 0.65	391 ± 0.2	11.66 ± 0.13
CH_4 [ppb]	9.1	722 ± 25	1774 ± 1.8	1803 ± 2	28.6 ± 0.9
N_2O [ppb]	131	270 ± 7	319 ± 0.12	324 ± 0.1	5.24 ± 0.14
1120 [ppb]	101	210 ± 1	010 ± 0.12	02 ± 0.1	0.24 ± 0.14

Zwischen 2005 und 2011 sind die CH_4 -Konzentrationen um etwa 29 ppb gestiegen. Betrachtet man die Lebenszeiten der Treibhausgase, sieht man, dass alle Gase unterschiedlich lange in der Atmosphäre verweilen. So bleibt CH_4 9.1 Jahre in der Atmosphäre, bis es abgebaut wird. Im Vergleich mit den Lebenszeiten von CO_2 und N_2O ist die von CH_4 recht klein.

In Abbildung 2.1 ist zu sehen, dass die Erde zur Zeit 0.6 $[0.2 - 1.0] \text{ W/m}^2$ mehr Energie aufnimmt als sie abgibt. Ursache dessen sind die durch anthropogene Tätigkeiten gestiegenen Konzentrationen der Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O (Abb. 2.2 und Tabelle 2.2). Diese Unausgewogenheit der Strahlungsbilanz der Erde lässt sich durch den Strahlungsantrieb (SA) (oder *Radiative Forcing* (RF)) [IPCC, 2013] der Treibhausgase ausdrücken. Mittels des SA wird die Unausgewogenheit des Energieaustausches zwischen eingehender solarer Strahlung und ausgehender Infrarotstrahlung beschrieben. Der SA wird in Watt pro Quadratmeter über eine gemittelte Zeitspanne angegeben [IPCC, 2013]. Ein positiver SA bedeutet, dass der Energiegehalt der Atmosphäre sich erhöht und die Oberflächentemperatur steigt. Ein negativer SA bedeutet, dass der Energiegehalt sinkt und damit die Oberflächentemperatur sinkt [IPCC, 2013]. Zum Vergleich des SA von CH₄ sind in Abbildung 2.4 die SAs für CO₂ und N₂O und für weitere atmosphärische Gase und Partikel, wie Aerosole und Wolken dargestellt.

Ein weiteres Instrument, um die Wirkung der Treibhausgase zu unterscheiden, ist das globale Erwärmungspotential (*Global Warming Potential* (GWP)) [IPCC, 2013]. Das GWP ist nützlich, um die Stärke der Treibhausgase zu charakterisieren. Das GWP ist gegeben durch ein über die Zeit integrierten SA von einem bestimmten Treibhausgas, normiert auf das absolute globale Erwärmungspotential (*Absolute Global Warming Potential* (AGWP)) von CO_2 [IPCC, 2013]. Es berechnet sich wie folgt:

$$GWP_{i}(H) = \frac{\int_{0}^{H} RF_{i}(t) dt}{\int_{0}^{H} RF_{CO_{2}}(t) dt} = \frac{AGWP_{i}(H)}{AGWP_{CO_{2}}(H)} \quad \text{aus}: \text{ [IPCC, 2013]}$$
(2.1)

 CO_2 hat ein GWP von 1. Integriert wird es über 20, 100 oder 500 Jahre, wodurch das GWP vom gewählten Zeitraum abhängt. Beispielsweise bedeutet ein GWP₁₀₀ von 28 für CH₄, dass 1 kg CH₄ genau dieselbe Treibhausgaswirkung wie 28 kg CO₂ über eine Zeitspanne von 100 Jahren hat. Der Wert für 20 Jahre ist größer, da CH₄ eine Lebenszeit von 9.1 Jahren hat.



Abb. 2.4: Natürliche und anthropogene Strahlungsantriebe im Jahr 2011 bezogen auf 1750. Die anthropogenen Komponenten sind unterteilt in gut durchmischte Treibhausgase, kurzlebige Gase und Aerosole. Jede der drei Komponenten besitzt atmosphärische Treiber, die Einfluss auf den SA eines emittierten Stoffes nehmen. Die Fehlerbalken geben den Unsicherheitsbereich des SA an. Der absolute SA ist für die Jahre 1950, 1980 und 2011 relativ zu 1750 gegeben. Zusätzlich ist das Vertrauensniveau der einzelnen Komponenten angegeben. So steht VH für sehr hoch, H für hoch, M für mittel und L für gering. Die Unsicherheiten wurden mit einer Sicherheit von 90% bestimmt. (Quelle: [IPCC, 2013]).

Man sieht, dass der natürliche SA, beeinflusst durch Veränderungen der solaren Einstrahlung, sehr klein ist im Vergleich zu den anthropogenen Einflüssen. Der Unsicherheitsbereich ist zudem sehr gering.

Daher kann die in Abbildung 2.1 dargestellte Unausgewogenheit nicht durch natürliche Effekte zustande kommen. Der Grund für die unausgeglichene Strahlungsbilanz sind die hohen SA der Treibhausgase CH₄ (0.97 W/m²) und CO₂ (1.68 W/m²), die mit hohen bzw. sehr hohem Vertrauensniveau angegeben sind (Abb. 2.4). Die SAs von N₂O und der Halogenkohlenwasserstoffe sind deutlich kleiner als der SA von CH₄. Sie besitzen ein ähnlich hohes Vertrauensniveau. CO₂ und N₂O besitzen das höchste Vertrauensniveau (Abb. 2.4). Die SAs der kurzlebigen Gase sind im Vergleich zu CH₄ recht klein. Sie besitzen aber ein schlechteres Vertrauensniveau. Den größten SA der kurzlebigen Gase besitzt Kohlenmonoxid (CO).

Hingegen können Stickoxide (NO_x) und Aerosole mit ihrem negativen SA von -0.15 W/m^2 bzw. mit -0.27 W/m^2 eine kühlende Wirkung einnehmen. Trotzdem reicht ihr Einfluss nicht einmal, um den positiven SA von CH₄ zu kompensieren. Zudem besitzen die Aerosole einen großen Unsicherheitsbereich, da manche Aerosole wie Ruß einen positiven SA besitzen. Wolken haben zwar auch einen negativen SA von -0.55 W/m^2 , welcher den SA von CH₄ ausgleichen könnte (Abb. 2.4). Aber schon aufgrund des großen Unsicherheitsbereiches und dem niedrigsten Vertrauensniveau, ist der Wert des SA der Wolken fraglich. Die Veränderung der Oberflächenalbeden wird mit einem negativen SA von -0.15 W/m^2 beschrieben (Abb. 2.4).

Insgesamt ist zu sehen, dass allein CO_2 und CH_4 fast den gesamten anthropogenen SA in 2011 von 2.29 W/m^2 ausmachen. Weiterhin ist zu sehen, dass sich der SA (relativ zu 1750) des Jahres 1980 in den vergangenen 21 Jahren etwa verdoppelt hat.

Um zukünftige Entwicklungen des SA zu prognostizieren, werden die Szenarien RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5 verwendet. Die Abkürzung RCP steht für *Representative Concentration Pathway* [IPCC, 2013]. Die Nummer eines RCP steht für den SA (in W/m²), der im Jahr 2100 erreicht wird. RCP-Szenarien beschreiben hauptsächlich Entwicklungen von Konzentrationen und SAs der Treibhausgase. Die vier genannten Szenarien sind repräsentativ, weil sie für eine große Zahl an Szenarien mit ähnlichen SAs und Emissionen stehen. In Abbildung 2.5 wird eine mögliche Entwicklung des SA für die verschiedenen Szenarien gezeigt.



Abb. 2.5: Darstellung des globalen mittleren anthropogenen Strahlungsantriebs für die Modelle RCP 2.6 (dunkelblau), RCP 4.5 (hellblau), RCP 6.0 (orange) und RCP 8.5 (rot) von 1850 bis 2100. Die durchgezogenen Linen mit den Kreisen beschreiben den absoluten SA. Die kurzen Striche mit den diamantähnlichen Symbolen stellen den Verlauf der Aerosole nach, die langen Striche mit den Quadraten hingegen beschreiben den Verlauf des Ozons. Der SA der Treibhausgase (Well-mixed greenhouse gases (WMGHG)) wird durch sich abwechselnde Punkte und Striche dargestellt. (Quelle: [IPCC, 2013, Kap. 8.5.3])

Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Treibhausgase im schlimmsten Fall über 8 W/m^2 steigen kann. Es lässt sich sehen, dass für das Szenario RCP 8.5 hauptsächlich die Treibhausgase verantwortlich sind. Hierbei nimmt CO₂ mit etwa 5 W/m^2 den größten Anteil am SA der Treibhausgase ein. CH₄ und N₂O tragen zum restlichen SA der Treibhausgase am meisten bei [IPCC, 2013]. Nach RCP 2.6 erhöht sich der SA der Treibhausgase kaum und wird nicht höher als 3 W/m^2 . Nach den Szenarien RCP 6.0 und RCP 4.5 wird der absolute SA zwischen 4 und 6 W/m^2 im Jahr 2100 liegen (Abb. 2.5). Der SA des Ozons wird sich im Vergleich zu heute kaum verändern, was alle Szenarien gleichermaßen prognostizieren. RCP 8.5 besagt, dass der Einfluss der Aerosole nahezu null werden soll (Abb. 2.5).

2.3 Messung von Methan

Da die Verteilung der Quellen und Senken von CH_4 noch eine große Unsicherheit besitzt, kann dies zu Ungenauigkeiten in Prognosen führen. Zur Verringerung der Unsicherheiten sind Messungen nötig. Es wird in in-situ- und remote sensing-Messungen unterschieden. Ist das Instrument in direkter Nähe zum messenden Objekt, wird diese Messung als in-situ (lateinisch: "am Ort") bezeichnet. Ist das zu messende Objekt hingegen weit vom Messinstrument entfernt, handelt es sich um eine remote sensing (deutsch: Fernerkundung) Messung. Die Flaschenmessungen des NOAA ESRL sind in-situ Messungen, während TCCON und Satelliten Fernerkundung betreiben. Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über die Auswertungen der Flaschenmessungen des NOAA ESRL Netzwerkes 2.3.1 und das Netzwerk TCCON gegeben werden. In Kapitel 2.3.3 wird auf die Satellitenmessungen eingegangen.

2.3.1 In-situ-Messungen

Die atmosphärischen CH₄-Konzentrationen werden zur Zeit an mehr als 100 Standorten des Earth Systems Research Lab (ESRL) (Quelle: http: //www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/) vorwiegend mittels Gasflaschen gemessen. Hierbei werden an den verschiedenen Standorten Luftproben genommen und von der *Carbon Cycle Greenhouse Gases* (CCGG) Gruppe in Boulder (Colorado) ausgewertet. Flaschenmessungen werden am Boden und auf "Tall Towern" kontinuierlich betrieben. Von Observatorien werden kontinuierliche Messungen durchgeführt und ausgewertet. Die Observatorien führen kontinuierliche Messungen Gebieten mit wenigen lokalen Quellen und Senken durch. Diese werden ausgewertet, um zeitliche Trends des CH₄ zu erkennen und eine gute Schätzung des atmosphärischen CH₄ zu erhalten. In-situ Messungen können auch in Flugzeugen durchgeführt werden, um Luftproben in der oberen Troposphäre zu entnehmen (*http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/behind_the_scenes/network.html*).

Für die Auswertung wird ausgenutzt, dass die Treibhausgase wie CO_2 und CH_4 im Infraroten absorbieren. Man leitet die Luft aus den Flaschen in eine luftdichte Zelle, die an den Rändern Fenster besitzt. Es wird infrarote Strahlung in die Zelle geschickt, welche auf der gegenüberliegenden Seite der Zelle, nach Passieren des zweiten Fensters, einen Detektor erreicht. Dieser kann infrarote Strahlung registrieren. Anhand der vom Detektor ausgegebenen Spannung lässt sich die Menge des analysierten Treibhausgases ermitteln. Möchte man hingegen Gase mit geringerer Konzentration als CO_2 , wie beispielsweise CH_4 und N_2O , analysieren, müssen diese zuvor mittels Gaschromatografie voneinander getrennt werden (*http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/behind_the_scenes/meas_analyzers.html*).

Die von NOAA ausgewerteten Messungen werden zum Beispiel von den Modellierungs - und Assimilierungssystemen $CT-CO_2$ und $CT-CH_4$ genutzt.

2.3.2 Total Carbon Column Observation Network (TCCON)

Das Total Carbon Column Observation Network (TCCON) [Wunch et al., 2011] ist ein Netzwerk, welches mittels Fourier Transform Spectrometer (FTS) die Mengen von CO_2 , CH_4 , N_2O und CO in einer atmosphärischen Säule erfassen soll. Dazu werden Absorptionen der genannten Gase (und anderer Spurengase) im nahen Infrarotem untersucht, da dort ihre Absorptionsbande noch nicht zu gesättigt sind [Wunch et al., 2011]. Neben den Messungen atmosphärischer Gase können noch weitere Parameter wie die Temperatur, der Bodendruck und die Feuchtigkeit erfasst werden [Wunch et al., 2011].

TCCON wurde 2004 gegründet. Zur Zeit werden an 15 Stationen die Konzentrationen

atmosphärischer Gase gemessen, wobei es noch Bedarf an Stationen in Afrika, Südamerika und Asien gibt [Wunch et al., 2011]. Zur Messung wird an den TCCON-Stationen das IFS 125HR verwendet. Teilweise war an Stationen wie Lauder von 2004 bis 2010 noch das IFS 120HR in Gebrauch. Weil TCCON und Satellitenmessungen im selben spektralen Bereich stattfinden, können sie mit den Ergebnissen verschiedener Satellitenretrieval, welche zum Beispiel XCH₄ berechnen, verglichen werden [Wunch et al., 2011]. Hierfür müssen TCCON-Messungen eine höhere Genauigkeit besitzen als Satelliteninstrumente [Wunch et al., 2011]. Um zu gewährleisten, dass ein Vergleich der säulengemittelten Molanteile der Gase möglich ist, wird an allen Stationen derselbe Algorithmus verwendet. Dieser trägt den Namen GFIT, welcher unter anderem das XCH₄ ermittelt. Dieser wird ausführlich in [Wunch et al., 2011]. Washenfelder et al., 2006] diskutiert.

2.3.3 Satellitenmessungen

Atmosphärisches CH_4 wird auch mittels Satellitenmessungen bestimmt. Satelliten haben einen großen Vorteil gegenüber den bodengestützten Messungen. Sie besitzen eine deutlich größere räumliche Abdeckung. Insbesondere wenn sie eine hohe Sensitivität bis zum Erdboden besitzen, können Aussagen über die Quellen und Senken von CH_4 gefällt werden [Buchwitz et al., 2005]. Sie können kontinuierliche Messungen über mehrere Jahre machen, da sie ein autarkes System sind. Durch direktes Messen der reflektierten Strahlung im Nahinfraroten, ist keine Entnahme von Luftproben von Nöten. Es werden nun zwei Satelliten namens ENVISAT und GOSAT vorgestellt, die atmosphärisches CH_4 messen können.

SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) [Burrows et al., 1995, Bovensmann et al., 1999] war ein passives Gitterspektrometer an Bord von ESA's (European Space Agency) Umweltsatelliten ENVISAT (ENVIromental SATellite), das die Intensität der von der Erdoberfläche bzw. der Atmosphäre reflektierten solare Strahlung im Wellenlängenbereich von von 214 bis 2380 nm gemessen hat. ENVISAT wurde im März 2002 gestartet und flog auf einem sonnensynchronen Orbit, wobei ENVISAT den Äquator um 10:00 Uhr Lokalzeit überquerte. ENVISAT befand sich in einer Höhe von rund 800 km. In Abbildung 2.6 ist der Satellit ENVISAT dargestellt.



Abb. 2.6: Dargestellt ist das Instrument SCIAMACHY (im gelben Kreis) an Bord des von ESA's entwickelten Satelliten ENVISAT. (Quelle : [Gottwald and Bovensmann, 2011])

Die Satellitenmission endete im April 2012(http //www.iup.uni – bremen.de/sciamachy/index.html). SCIAMACHY hat seehs Kanäle, welche für Wellenlängen von 214 bis 1750 nm die reflektierte Solarstrahlung messen. Zudem gibt es zwei weitere Kanäle, die für Wellenlängen von 1940 bis 2040 nm und von 2265 bis 2380 nm empfindlich sind. In diesen Bereichen absorbieren eine Vielzahl von atmosphärischen Gasen. SCIAMACHY besitzt eine spektrale Auflösung von 0.2 bis 1.5 nm [Bovensmann et al., 1999]. Zudem war SCIAMACHY von 2003 bis 2009 der einzige Satellit, mit dem sich atmosphärisches CH₄ mit einer hohen Sensitivität zur Erdoberfläche hin messen ließ [Buchwitz et al., 2005].

GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) [Kuze et al., 2009] ist ein gemeinsames Projekt, das vom National Institute for *Enviromental Studies* (NIES), von der Japanese Space Agency (JAXA) und vom Ministry of the Enviroment (MOE) entwickelt wurde. An Bord von GOSAT befindet sich das TANSO (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation) - FTS Instrument. Es besitzt drei Kanäle, die kurzwellige Infrarotstrahlung registrieren. Diese messen in Bereichen von 0.758 - 0.775 μ m (Kanal 1), 0.56 - 1.72 μ m (Kanal 2), 1.92 - 2.08 μ m (Kanal 3) und von 5.56 - 14.3 μ m (Kanal 4), wobei dieser im thermisch Infraroten misst. So können in Kanal 1 die Absorptionen von O₂, in Kanal 2 die Absorptionen von CO₂ und CH₄, in Kanal 3 die Absorptionen CO₂ und in Kanal 4 die Absorptionen von CO₂, CH₄, H₂O und O₃ erfasst werden. TANSO-FTS besitzt eine spektrale Auflösung von $0.36 \,\mathrm{cm}^{-1}$ für Kanal 1 und von $0.26 \,\mathrm{cm}^{-1}$ für Kanal 2 und 3 ([Kuze et al., 2009] und http://www.gosat.nies.go.jp/eng/gosat/page2.htm).

GOSAT fliegt auf einem polaren sonnensynchronen Orbit mit einem 3-Tageszyklus und überquert den Äquator um 13:00 Uhr Lokalzeit. GOSAT befindet sich in einer Höhe von 666 km [Kuze et al., 2009].

TANSO-CAI (Cloud and Aersol Imaginer) wurde dazu entwickelt, Wolken- und Aersolverteilungen zu erfassen. Es besitzt 4 Kanäle in Spektralbereichen von $0.370 - 0.390 \,\mu\text{m}$ (Kanal 1), $0.644 - 0.684 \,\mu\text{m}$ (Kanal 2), $0.860 - 0.880 \,\mu\text{m}$ (Kanal 3) und $1.56 - 1.65 \,\mu\text{m}$ (Kanal 4). Zur Zeit ist GOSAT der einzige Satellit, der Messungen von CH₄ durchführt ([Kuze et al., 2009] und *http*://www.gosat.nies.go.jp/eng/gosat/page2.htm).

2.4 Algorithmen zur Auswertung von Satellitenmessungen

Zur Auswertung von Absorptionsspektren von CH_4 , welche von SCIAMACHY oder GOSAT gemessen wurden, werden zwei Arten von *Retrieval* verwendet. *Retrieval* sind Algorithmen, die die gemessenen Spektren von Satelliten mittels eines Strahlungstransfermodells und a-priori Wissen auswerten und XCH₄ zurückgeben. Man unterscheidet hierbei zwischen "Proxy" und "Full-physics" *Retrieval*. "Full-physics" meint die explizite Berücksichtigung atmosphärischer Streuprozesse an Wolken und Aerosolen. Im Gegensatz dazu wird Streuung bei den "Proxy" *Retrieval* nur implizit berücksichtigt. Sie verwenden die aus dem *Retrieval* erhaltende CO_2 -Säule als Lichtweg für die CH_4 -Säule. Denn im Vergleich mit CH_4 ist CO_2 weit weniger variabel [Parker et al., 2011, Frankenberg et al., 2011]. Die CH_4 -Säule wird durch die CO_2 -Säule dividiert, was zur Aufhebung der Lichtwegänderungen führt.

"Proxy" *Retrieval*, die zu Ermittlung von XCH₄ genutzt werden, sind WFMD (Weigthing Function Modified Differential Optical Estimation Spectroscopy (DOAS)) (entwickelt an der Universität Bremen) [Schneising et al., 2011, Heymann et al., 2012a,b, Schneising, 2013] und IMAP (Iterative Maximum a Posteriori)-DOAS (entwickelt am SRON (Netherlands Institute for Space Research) und an der Universität Heidelberg) [Frankenberg et al., 2005b,a, 2006, 2008b,a, 2011, Butz et al., 2010].

"Full-physics" *Retrieval*, die zur Bestimmung von XCH₄ genutzt werden, sind Remo-TeC (entwickelt vom SRON (Netherlands Institute for Space Research) und KIT (Karlsruhe Institute of Technology)) [Butz et al., 2011, Guerlet et al., 2013, Hasekamp et al., 2013] und Uol-FP (University of Leicester Full Physics) [Parker et al., 2011, 2013, Cogan et al., 2012]. Daneben gibt es noch einen "Full-physics" *Retrieval*, der vom National Institute for Environmental Studies (NIES) [Yoshida et al., 2011, 2013] entwickelt wurde.

Fast alle *Retrieval* haben gemein, dass sie die Optimal Estimation Methode verwenden bis auf WFMD, der die least-squares Methode nutzt. Die *Retrieval* nutzen ein Vorwärtsmodell F(x,b), das von einem Zustandsvektor x und einem Parametervektor b abhängt, einen Messvektor y und ein Residuum ϵ . F(x,b) verwendet ein Sonnen-, Instrument-, Albedo- und Strahlungstransfermodell. y enthält die gemessenen Absorptionsspektra von SCIAMACHY und GOSAT. ϵ beinhaltet die Unsicherheiten im Vorwärtsmodell und im Satelliteninstrument. Es ergibt sich die Gleichung

$$y = F(x, b) + \epsilon \tag{2.2}$$

Mit einem Optimal Estimation oder least-squares Verfahren wird versucht herauszufinden, welches simulierte Intensitätsspektrum eines Vorwärtsmodells für einen bestimmten Wellenlängenbereich am besten zu dem vom Satelliten gemessenen Intensitätsspektrum passt. Hierzu werden Parameter von F(x, b) solange verändert, bis die Intensitätsspektren bestmöglich übereinstimmen. Zur Lösung des Problems kann es hilfreich sein, a-priori Wissen für Parameter von F(x, b) nutzten. A-priori Wissen kann zum Beispiel aus einer Abschätzung atmosphärischer CH₄-Konzentrationen bestehen. Beispielsweise kann das Simple Empirical CO₂ Model (SECM) [Reuter et al., 2012] a-priori Informationen über die globale CO₂-Verteilung bereitstellen, die für BESD verwendet wird.

Schlussendlich werden aus x optimierte molare Mischungsverhältnisse von CH_4 gewonnen.

Ziel der *Retrieval* ist es, das XCH_4 zu bestimmen, um die Quellen und Senken von CH_4 zu ermitteln. Das XCH_4 bietet Vorteile gegenüber einer CH_4 -Säule. Dies soll für eine beispielhafte CH_4 -Säule in Abbildung 2.7 illustriert werden.

Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Variabilität der CH₄-Säule, der Luftsäule und der resultierenden XCH₄. Man sieht den Einfluss von Quellen und Senken, wobei die Einflüsse von Quellen durch aufwärts zeigende Pfeile symbolisiert werden. Das H steht für Hochdruckgebiet, während das T für Tiefdruckgebiet steht.



Die CH_4 -Säule zeigt zwar Quellen und Senken, aber auch Einflüsse durch Topographie oder Meteorologie, welche beim XCH_4 nicht mehr vorhanden sind. Man sieht nur die Effekte von den Quellen und Senken. Dies wird erreicht, wenn die CH_4 -Säule durch die Luftsäule dividiert

wird.

2.5 Simple Empirical CO₂ Model (SECM)

In diesem Abschnitt wird SECM vorgestellt, da es als Grundlage für EMMO verwendet wird. Details zu SECM sind in der Pubilkation von Reuter et al. [2012] nachzulesen. SECM ist ein empirisches Modell, das mit dem XCO₂ von CarbonTracker-CO₂ 2010 [Peters et al., 2007] angepasst wurde. SECM besitzt eine Breitengrad- und Zeitabhängigkeit. Eine Longitudinalabhängigkeit für XCO₂ wird vernachlässigt. Trotz dieser recht groben Annahme zeigen Validationsstudien, dass SECM gut als A-priori einzusetzen ist. Um eine gute Abschätzung der Konzentrationen zu erhalten, wird ein Pazifischer Transect (deutsch: Profil) verwendet, der einen Querschnitt des CO₂ bei -150°E um 12:00 Uhr Lokalzeit beschreibt. Für die Anpassung an SECM wird dieser Querschnitt gewählt, da dort kaum lokale Quellen und Senken zu finden sind.

Das XCO₂ von SECM wird durch folgende Gleichung beschrieben

$$X_{c}(t,l) = p_{0} + p_{1} \cdot t + p_{2} \cdot \tanh(p_{3}l + p_{4}) + S_{c}(t,l)$$
(2.3)

Wie schon erwähnt, hängt das XCO₂ von der Zeit t, welche in Jahren seit 2003 angegeben wird und dem Breitengrad l ab. p_0 ist eine Konstante und p_1 beschreibt den jährlichen Anstieg, der linear verläuft. p_2 bis p_4 beschreiben den Nord/Südgradienten der Konzentrationen. Die Konzentrationen von CO₂ steigen an, besitzen aber jahreszeitliche Variationen. Diese Variationen werden mit $S_c(t, l)$ beschrieben.

$$S_{c}(t,l) = (p_{5} \cdot \tanh(p_{6}l + p_{7}) + p_{8}t) \cdot \sin(2\pi t + p_{9}l)$$
(2.4)

$$+ (p_{10} \cdot \tanh(p_{11}l + p_{12}) + p_{13}t) \cdot \sin(4\pi t + p_{14}l)$$
(2.5)

 S_c besitzt eine 12-monatige Periode und eine 6-monatige Periode mit den breitenabhängigen Phasen p_{9l} bzw. $p_{14}l$. Die Amplitude der Sinusfunktionen wird durch die Parameter p_5 bis p_8 bzw. p_{10} bis p_{13} beeinflusst. Die 15 Koeffizienten von SECM werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate durch Anpassung an die Konzentrationen des Pazifischen Transects gewonnen. Die Fit-Parameter von SECM sind in Tabelle 2.3 gegeben.

L	/]/		
Parameter	Wert	Parameter	Wert
$p_0 \ p_1 \ p_2$	$\begin{array}{c} 373.09 \ \mathrm{ppm} \\ 1.923 \ \mathrm{ppm} \ \mathrm{a}^{-1} \\ 1.605 \ \mathrm{ppm} \end{array}$	p_8 p_9 p_{10}	$\begin{array}{c} 0.133 \ \mathrm{ppm} \mathrm{a}^{-1} \\ 0.00351 /^{\circ} \\ \mathrm{-7.254} \ \mathrm{ppm} \end{array}$
$p_3\ p_4\ p_5$	0.033 /° 0.623 5.470 ppm	$p_{11} \\ p_{12} \\ p_{13}$	$\begin{array}{c} 0.00166/^{\circ} \\ 0.0711 \\ 0.0125\mathrm{a}^{-1} \end{array}$
$p_6 \ p_7$	$0.00602 /^{\circ}$ 0.179	p_{14}	-0.00239 /°

Tabelle 2.3: Parameter p_i von SECM. Die Notation "/°" entspricht der Einheit pro Grad. (Quelle: [Reuter et al., 2012])

Hiermit lässt sich der von SECM simulierte Pazifische Transect bei -150°E um 12:00 Uhr Lokalzeit darstellen (Abb. 2.8). Größere Werte lassen sich auf der Nordhalbkugel beobachten aufgrund der stärkeren industriellen Entwicklung Nordamerikas bzw. Europas [Reuter et al., 2012].

Abb. 2.8: Darstellung des XCO_2 von SCEM für den Pazifischen Transect um -150°E um 12:00 Lokalzeit. Das XCO_2 ist für den Zeitraum von 2003 bis Ende 2009 und für die Breitengrade von -90°N bis 90°N dargestellt.(Quelle: [Reuter et al., 2012])



SECM XCO₂ für Pazifischen Transect

Anhand von Abbildung 2.8 ist erkennbar, dass das atmosphärische XCO_2 von 2003 bis 2009 zunimmt. Die Konzentrationen der Südhalbkugel sind meist geringer als auf der Nordhalbkugel, obwohl das XCO₂ im Sommer auf der Nordhalbkugel geringer ist als auf der Südhalbkugel. Umgekehrt ist das XCO₂ zu Beginn und Ende eines Jahres auf der Nordhalbkugel höher als auf der Südhalbkugel. Diese Beobachtungen werden durch die jahreszeitlichen Variationen von S_c erklärt. Das XCO₂ zeigt Anfang 2009 mit bis zu 390 ppm die größten Werte von 45°N bis 90°N. Mitte 2009 wird das XCO₂ mit 385 ppm zwischen 45°N bis 90°N bemessen.

SECM wurde auch gegen TCCON validiert. Es ließ sich feststellen, dass SECM das XCO_2 and en TCCON-Stationen gut approximiert. So kann SECM das XCO_2 mit einer mittleren Standardabweichung von 1.39 ppm simulieren. Die Standardabweichung aller mittleren Differenzen von SECM zu TCCON beträgt 0.47 ppm.

2.6 CarbonTracker-CH₄ 2010 (CT-CH₄)

CarbonTracker (CT) [Peters et al., 2007] wurde ursprünglich für atmosphärisches CO₂ entwickelt. In den letzten Jahren ein Ableger von CT namens CarbonTracker-CH₄ 2010 (CT-CH₄) für das atmosphärische CH₄ entwickelt, welches detailliert in der Publikation von Bruhwiler et al. [2014] beschrieben wird.

Carbon Tracker-CH₄ gibt den gesamten CH₄-Fluss und die Flüsse der Quellen des CH₄ in Abhängigkeit von den Raumkoordinaten x und y und der Zeit t wieder. Mittels CT-CH₄ können die CH₄-Emissionen von 2000 bis Ende 2010 großräumig angegeben werden.

$$F(x, y, t) = \lambda_1 \cdot F_{\text{natural}}(x, y, t) + \lambda_2 \cdot F_{\text{fossil}}(x, y, t) + \lambda_3 \cdot F_{\text{agriculture/waste}}(x, y, t) + \qquad (2.6)$$
$$\lambda_4 \cdot F_{\text{fire}}(x, y, t) + \lambda_5 \cdot F_{\text{ocean}}(x, y, t)$$

Mit den Parametern λ_i werden lineare Skalierungsfaktoren bezeichnet, die multiplikativ zu den a-priori Flüssen hinzugefügt werden. Hieraus entstehen die posteriori Flüsse, welche in den Dateien von CT-CH₄ aufgeführt sind. Weitere Informationen lassen sich unter *http* : //www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker - ch4/summary.html finden, wie auch eine interaktive Karte der in CT-CH₄ assimilierten Messstationen des ESRL Netzwerkes.

Unter F_{natural} berücksichtigt man Emissionen von Feuchtgebieten, Termiten, wilden Tieren und Ausgasungen aus Böden (Permafrost). Da die Emissionen von Feuchtgebieten von Temperatur und Niederschlag abhängen, können sie in den hohen Breiten den jährlichen Zyklus beeinflussen [Bruhwiler et al., 2014]. Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung und großer Variabilität dieser Emissionen auf kleine Skalen ist eine Extrapolation zu großen Skalen hin schwierig. Es werden a-priori Annahmen für Feuchtgebiete aus der Veröffentlichung von Bergamaschi et al. [2005] verwendet. Um die Emissionen von Feuchtgebieten zu modellieren, wird das Modell von Kaplan [2002] verwendet. Die Oxidation von CH₄ in Böden wird als Senke in die Assimilierung einbezogen.

Emissionen von der Kohle-, Öl- und Gasförderung werden durch $F_{\rm fossil}$ beschrieben. In diesem Zusammenhang wird EDGAR 3.2FT2000 (European Commission, JRC, 2009) als a-priori verwendet. Diese Datenbank beinhaltet die Emissionen von Ländern für den Zeitraum von 1990 bis 1995. Diese werden bis zum Jahre 2000 unter statistischen Annahmen extrapoliert. Über den Zeitraum von CT-CH₄ wurden diese Daten nicht extrapoliert. Es wurden konstante a-priori Emissionen angesetzt. So erkennt man, in welchen Jahren sich die Emissionen stark verändert haben.

Mit $F_{\text{agriculture/waste}}$ werden Emissionen von Reisfeldern, Vieh (und deren Ausscheidungen), Mülldeponien und verunreinigten Gewässern beschrieben. Die Vorgehensweise zur Gewinnung der a-priori Daten ist analog zu F_{fossil} .

Die Verbrennung von Biomasse wird durch $F_{\rm fire}$ beschrieben. Um a-priori Informationen zu erhalten, wird die Datenbank GFED (Global Fire Emissions Database) verwendet. GFED nutzt den CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach), um die Menge an Kohlenstoff in jeglicher Biomasse abzuschätzen. Um verbrannte Gebiete in GFED zu bestimmen, werden Satellitenaufnahmen von MODIS verwendet [Giglio et al., 2006, van der Werf et al., 2006]. Für die Zeitspanne von 1997 bis Dezember 2010 stehen Daten über CH₄-Emissionen zur Verfügung.

Der Ozean liefert einen kleinen Beitrag zum atmosphärischen CH_4 , der sich nur auf 2-3% beläuft. In CT-CH₄ wird nach Bergamaschi et al. [2009] verfahren und es werden

Schätzungen von Houweling et al. [1999] verwendet, um a-priori Emissionen zu erhalten. Trotzdem existieren noch große Unsicherheiten in der Beschreibung der ozeanischen Emissionen. Daher wird eine a-priori Unsicherheit von $\pm 75\%$ angenommen.

Als atmosphärisches Transportmodell wird TM5 (Transport Model 5) [Krol et al., 2005] mit einer räumlichen Auflösung von 4° (Breitengrad) x 6° (Längengrad) genutzt. Als Inputdaten werden meteorologische Daten vom ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts) verwendet. Die zeitliche Auflösung beträgt 3 h. Für CT-CH₄ werden ab 2006 34 Drucklevel genutzt, wobei von 2000 bis 2005 25 Drucklevel verwendet werden.

Für Abbaureaktionen in der Atmosphäre werden von TM5 OH-Konzentrationen modelliert. Details hierzu lassen sich in der Veröffentlichung von Bergamaschi et al. [2005] finden.

Es werden Daten von Flaschenmessungen des NOAA ESRL Netzwerkes verwendet. Ausgenommen sind solche, die starken lokalen Einflüssen ausgesetzt sind oder bei denen Probleme während der Messung auftraten. Flaschenmessungen von Flugzeugen werden nicht assimiliert, sondern nur zur Kontrolle der Qualität der Daten verwendet.

3 Entwicklung eines empirischen CH₄ Modells (EMMO)

Im diesem Kapitel wird das Empirische Methan MOdell (EMMO) vorgestellt. EMMO ist wie SECM ein empirisches Modell, das a-priori Wissen für Satellitenretrieval erzeugen soll. Zudem simuliert EMMO säulengemittelte molare Mischungsverhältnisse von CH_4 (XCH₄). Hierzu wird EMMO mit dem XCH₄ von CT-CH₄ angepasst. Da CT-CH₄ nur CH₄-Säulen bereitstellt, wird zunächst in Kapitel 3.1 beschrieben, wie das XCH₄ aus CT-CH₄ berechnet wird. In Kapitel 3.2 wird gezeigt, aus welchen Formeln und Koeffizienten EMMO besteht. Die Koeffizienten werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate errechnet. Eine Tabelle der Parameter von EMMO ist am Ende des Kapitels 3.2 angefügt. In Kapitel 3.3 werden die Ergebnisse des Anpassungsvorgangs veranschaulicht und ein Vergleich von EMMO XCH₄ mit globalem XCH₄ von CT-CH₄ gemacht. Es wird gezeigt in wie weit EMMO das globale XCH₄ approximieren kann.

3.1 Verwendung der CT-CH₄ Daten

Für diese Arbeit wurden die CT-CH₄ Daten vom 1.01.2002 bis zum 31.12.2010 genutzt, da im Jahr 2002 der Satellit ENVISAT gestartet wurde und CT-CH₄ Daten bis zum 31.12.2010 bereitstellt. Die CT-CH₄ Daten liegen im NetCDF Format vor und es gibt für jeden Tag eine NetCDF Datei. Von einem FTP-Server (ftp : //aftp.cmdl.noaa.gov/products/carbontracker/ch4/molefractions/), der von NOAA betrieben wird, ließen sich die 3287 benötigten Dateien herunterladen.

Vom 1.01.2002 bis zum 30.12.2005 sind 25 Drucklevel angegeben. Die Daten vom 31.12.2005 bis zum 31.12.2010 weisen hingegen 34 Drucklevel auf. Die Drücke sind in Einheiten von hPa angegeben und die Drucklevel $p_{\rm c}$ liegen immer in der Mitte einer atmosphärischen Schicht (*Layer*).

In jeder Datei sind die CH₄-Emissionen in verschiedene Kategorien aufgeteilt. Das gesamte CH₄ erhält man durch Addition der Komponenten. Eine Beschreibung der Komponenten ist in Kapitel 2.6 gegeben. Das CH₄ ist in der Einheit ppb angegeben. Insgesamt besitzt das gesamte CH₄ ein Feld der Größe (8 x (25 oder 34) x 45 x 60). Das Feld von p_c ist genauso groß. Vom 1.01.2002 zum 30.12.2005 ist die Größe 8 x 25 für das Feld prägend. Hingegen vom 31.12.2005 zum 31.12.2010 ist die Größe 8 x 34 für das Feld maßgebend. Für beide Zeiträume ist die horizontale Auflösung gleich. Bei dieser ergibt sich unter der Berücksichtigung des Bereiches der Breiten- und Längengrade eine Größe von 45 x 60.

Für die Berechnungen werden mittlere Breitengrade für die Gridboxen von CT-CH₄ eingeführt. Die Breitengrade beginnen bei -88°N und enden bei 88°N. Die Längengrade beginnen bei -177°O und enden bei 177°O. Wie eingangs erwähnt, soll das XCH₄ aus CT-CH₄ ermittelt werden. Hierzu werden aber Drucklevel am Rand eines Layers (Boundary – Level) benötigt. Dazu wird ein Algorithmus implementiert, der den Druck p_c auf Boundary – Level (p_b) umrechnet.

$$p_{\rm b}(h) = 0$$

$$p_{\rm b}(h-k) = 2 \cdot p_{\rm c}(h-k) - p_{\rm b}(h-k+1) \qquad \text{mit } k \,\epsilon \,[1, \dots h]$$
(3.1)

h nimmt entweder den Wert 25 oder 34 an, da es davon abhängt, welchen für Zeitraum $p_{\rm b}$ berechnet wird. k ist ein Laufindex, der die Zahl an Drucklevel durchläuft. Es wird ein oberstes Drucklevel hinzugefügt, welches den Druck 0 hPa annimmt. In Abbildung 3.1 wird das Ergebnis von Gleichung (3.1) beispielhaft für willkürlich gewählte Zeit- und Raumkoordinaten dargestellt.

Abb. 3.1: Drucklevel von CT-CH₄ (schwarz), Drucklevel am Rand einer Schicht (rot) $p_{\rm b}$, und die aus $p_{\rm b}$ berechneten Drucklayer $p_{\rm cb}$ (grün). Die Drucklayer $p_{\rm c}$ von CT-CH₄ stimmen mit den $p_{\rm cb}$ überein. Der Druck wird in Einheiten von hPa angeben. Für diese Abbildung werden 34 Drucklevel genutzt. Es sind zwei Ausschnitte von Gebieten niedrigen Druckes (mittleres Bild) und hohen Drucks (rechtes Bild) aufgeführt.



Man sieht, dass sich die ursprünglichen Drücke der Layer genau in der Mitte der berechneten Drucklevel $p_{\rm b}$ befinden. Sie sind identisch mit dem Drucklayer $p_{\rm cb}$, die aus $p_{\rm b}$ zur Kontrolle berechnet werden. Zudem ist erkennbar, dass mehr Drucklevel am Boden und in der oberen Atmosphäre modelliert wurden.

Nach einer Korrespondenz mit Lori Bruhwiler wurde die fehlerhafte Datei vom 31.12.2005 (20051231.nc) durch eine neue Version ersetzt.

Durch Subtraktion aufeinanderfolgender Drucklevel $p_{\rm b}$ erhält man Druckdifferenzen $\Delta p_{\rm d}$. Dadurch ist bekannt, wie mächtig die Layer sind, d.h. wie viele Luftmoleküle sie enthalten. Nun kann man das XCH₄ nach Gleichung (3.2) als druckgewichtetes Mittel berechnen.

$$\text{XCH}_4 \approx \frac{\sum_{i=0}^n \Delta p_{\mathrm{d,i}} \cdot \text{CH}_{4,\mathrm{i}}}{p_{\mathrm{b,0}}}$$
(3.2)

Gleichung 3.2 ist nur eine Näherung, da hierbei eine Atmosphäre mit konstanter Molmasse angenommen wird. Variationen durch Wasserdampf werden vernachlässigt. Es wird die Summe über das Produkt der Druckdifferenzen mit dem CH₄ des Layers gebildet und durch das unterste Drucklevel $p_{b,0}$ dividiert. Das XCH₄ wird nun für jeden Tag immer um 12:00 Uhr UTC berechnet. Hierfür wurde ein PYTHON-Programm geschrieben, das das XCH₄ ermittelt. Man erhält ein XCH₄-Feld, das die Größe (3287 x 45 x 60) besitzt. Die Wahl einer einheitlichen Zeit für das XCH_4 von $CT-CH_4$ lässt sich durch eine vernachlässigbaren mittleren Tagesgang erklären. Dieser ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Abb. 3.2: Mittlerer Tageszyklus von XCH₄ für unterschiedliche Monate. In die Mittlung gehen die Monate Dezember 2006 und die Monate von Januar 2007 bis November 2007 ein. Gemittelt wurde über alle Tage zu einer bestimmten Stunde. Der Tageszyklus ist für die Standorte Darwin (schwarz) und Lamont (orange) angegeben, inklusive der Standardabweichung, welche durch die Fehlerbalken dargestellt wird. Dargestellt sind die XCH₄-Werte in ppb über der Lokalzeit in Stunden. Das mittlere XCH₄ wurde von allen abgebildeten Zeitreihen subtrahiert.



Mittlerer Tageszyklus von XCH₄ zu verschiedenen Jahreszeiten

Für die Darstellung des mittleren Tagesgangs wurden exemplarisch zwei Orte gewählt, die auf der Nordhemisphäre bzw. Südheimsphäre liegen. Hierbei fiel die Wahl auf die Städte Lamont (USA) und Darwin (Australien). Dazu musste die entsprechende Gridbox des XCH₄ gewählt werden, die den jeweiligen Ort abdeckt. Es wurde über alle Tage zu einer bestimmten Stunde gemittelt, um zum Beispiel Windeffekte zu minimieren. Die Zahl der gemittelten Tage wurde durch die Wahl der Monate beschränkt, die in eine Mittlung eingehen. Für alle Zeitreihen wurde das mittlere XCH₄ bestimmt und subtrahiert, sodass nur die stündlichen Einflüsse zu sehen sind. Es ist erkennbar, dass alle mittleren Tagesgänge inklusive der Fehlerbalken für alle dargestellten Zeiträume um höchstens 0.6 ppb vom mittleren XCH₄ abweichen. Für den Zeitraum Dezember bis Februar ist der mittlere Tagesgang am größten. Für alle anderen Zeiträume weicht er etwa um ± 0.2 ppb ab. Dies legitimiert die Wahl von 12:00 UTC für das XCH₄ von CT-CH₄.

Wie bei SECM wird für die Ermittlung der Fit-Parameter ein Pazifischer Transect genutzt. Das bedeutet, dass aus dem berechneten XCH_4 -Feld ein Querschnitt bei -150°O für

12:00 Uhr UTC betrachtet wird. Stellt man das XCH_4 für den Pazifischen Transect dar, also die Breitengrade über der Zeit, wird man feststellen, dass das XCH_4 Streuung aufgrund der regionalen Meteorologie zeigt (obere Grafik von Abb. 3.3).

Abb. 3.3: Darstellung des XCH₄ von CT-CH₄ den Pazifischen Transect (-150°O, 12:00 Uhr UTC). Es ist das ursprüngliche (obere Abbildung) und das geglättete XCH₄ (untere Abbildung) gezeigt. Auf der y-Achse sind die Breitengrade, auf der x-Achse die Zeit in Jahren seit 2002 aufgezeigt. Die Faltung wurde mittels der Hann-Funktion durchgeführt. Die effektive Breite beträgt 8° x 1 Monat.



Vergleich von geglätteten mit ursprünglichem XCH₄ von CT-CH₄ für -150°O um 12:00 UTC

Man sieht in dem oberen Bild von Abbildung 3.3 einen Anstieg des XCH₄. Dieser ist aber erst ab Mitte 2006 dominierend und ist oberhalb des Äquators stärker ausgeprägt als auf der Südhalbkugel. Die Konzentrationen auf der Nordhalbkugel sind zudem höher als auf der Südhalbkugel. Die größten Konzentrationen werden gegen Ende der Jahre 2008, 2009 und 2010 um 20°N festgestellt, welche um 1800 ppb liegen. Es sind jährliche Variationen des XCH₄ zu sehen. So ist eine ganzjährige Periode beobachtbar. Eine halbjährige Periode ist zu erahnen. Diese sind oberhalb des Äquators deutlicher zu erkennen. Ein Nord/Südgradient des XCH₄ ist für den gesamten Zeitraum zu sehen.

Die Wirkung der regionalen Meteorologie auf das XCH_4 ist für ein empirisches Modell schwierig zu berücksichtigen. Eine Lösung, die sich anbietet, ist eine Glättung der Daten. Für die Glättung wird die Hann-Funktion genutzt. Es lässt sich durch die Funktion w

$$w(n) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right)\right) \qquad 0 \le n \le M-1 \tag{3.3}$$

beschreiben [Meyer, 2014]. M gibt die Breite des Faltungskernels an. Um die Faltung mit dem XCH₄ durchzuführen, muss die Hann-Funktion auf ein 2d Problem erweitert werden.

Zudem muss eine effektive Breite gewählt werden, welche auf 8° und einem 1 Monat begrenzt wird. Mit einer Faltung geht ein Verlust an der Genauigkeit und Daten des XCH₄ einher, da beispielsweise die Amplitude geringer wird. Die Erkenntnisse (wie das Vorhandensein einer ganzjährige Periode), die aus der oberen Grafik von Abbildung 3.3 erhalten wurden, werden durch die Faltung nur in ihrer Amplitude beeinflusst. Der funktionale Zusammenhang bleibt erhalten.

Zum Abschluss lassen sich noch Zeitreihen und Nord/Südgradienten des Pazifischen Transects anschauen. Die Zeitreihen wurden so gewählt, dass man das XCH_4 genauer am Äquator und auf der Nord- und Südhalbkugel betrachten kann. Die Tage für die Nord/Südgradienten wurden willkürlich gewählt.

Abb. 3.4: Zeitabhängigkeit des XCH₄ für ausgewählte Breitengrade des Pazifischen Transects. Der rote Graph stellt die Glättung des ursprünglichen XCH₄ (schwarz) dar. Die Glättung wurde mittels der Hann-Funktion durchgeführt. Die effektive Breite beträgt 8° x 1 Monat.



Die meteorologischen Effekte lassen sich eindeutiger erkennen, wenn man bei bestimmten Breitengraden oder Tagen die Zeit- bzw. Breitengradabhängigkeit der Konzentrationen aufzeichnet (schwarzer Graph in Abb. 3.4 und Abb. 3.5). Die Streuung ist in den Zeitreihen ausgeprägter. Es bestätigen sich die Eindrücke aus Abbildung 3.3, beispielsweise, dass der Trend des Anstieges des XCH₄ bei 44°N und beim Äquator ausgeprägter ist wie auch der jährliche Zyklus, dessen Amplitude bei 44°S geringer ist. Beide Beobachtungen werden durch das ursprüngliche XCH₄ und durch das geglättete bestätigt.

Abb. 3.5: Breitengradabhängigkeit des XCH₄ für ausgewählte Tage des Pazifischen Transects. Der rote Graph stellt die Glättung des ursprünglichen XCH₄ (schwarz) dar. Die Glättung wurde mittels der Hann-Funktion durchgeführt. Die effektive Breite beträgt 8° x 1 Monat.



Vergleich der Breitengradabhängigkeit von ungeglättetem mit geglättetem XCH $_4$

Bei der Darstellung des Nord/Südgradienten sieht man nahezu konstantes XCH_4 ab $22^{\circ}N$ und steigende XCH_4 -Werte zum Äquator hin.

3.2 Fit-Parameter

Für die Konstruktion des Modells EMMO (Empirisches Methan MOdell) wird als Ausgangspunkt das Modell SECM verwendet. EMMO hängt also von der Zeit t und dem Breitengrad l ab. Eine Vernachlässigung der Abhängigkeit des Längengrades ist für CH₄ eine sehr grobe Abschätzung. Für ein empirisches Modell wie EMMO, das a-priori Wissen von atmosphärischem CH₄ erzeugt, ist eine solche Abschätzung angemessen. SECM kann als Grundlage verwendet werden, da es einen Nord/Südgradienten und die zeitlichen XCO₂ Konzentrationen mittels einer ganz- und halbjährigen Periode beschreibt. Diese Erkenntnisse ließen sich auch für XCH₄ aus den Abbildungen 3.3, 3.4 und 3.5 gewinnen. Man kann zum Beispiel den Nord/Südgradienten wie SECM durch einen Tangenshyperbolicus beschreiben. Trotzdem können die Parameter von SECM allein nicht das geeignete Modell für das XCH₄ sein. So weist das XCH₄ keinen nahezu linearen Anstieg für den Zeitraum von 2002 bis 2010 aus (Abb. 3.3).

Deswegen müssen ein paar Terme hinzugefügt werden, um EMMO zu bilden. Um das XCH₄ zu beschreiben, wird zusätzlich zum linearen Term $a_0 + a_1 \cdot t$ der Term $a_{15}t \cdot \sin(a_{16}t + a_{17})$ hinzugefügt. Dieser wird durch eine Amplitude a_{15} , eine Periodendauer a_{16} und eine Phase a_{17} beschrieben. Dieser Term wird hinzugefügt, da erhöhtes XCH₄ bis 2006 zu sehen ist. Hingegen ist das XCH₄ zwischen 2006 bis Ende 2007 kleiner im Vergleich zum vorherigen Zeitraum. Ab 2008 nimmt das XCH₄ wieder erhöhte Werte an (Abb. 3.3 und 3.4). Dieses Verhalten wird bei EMMO durch einen zeitabhängigen Sinusterm beschrieben, der das globale XCH₄ beschreiben soll. Der Koeffizient a_{15} wird mit t multipliziert, um die Amplitude besser zu simulieren.

Für den Nord/Südgradienten ist der Term $a_2 \cdot \tanh(a_3l + a_4)$ entscheidend. Kleinere Korrekturen werden durch den zusätzlich hinzugefügten Term $a_{18}\sin(a_{19}l + a_{20})$ vorgenommen, um Variationen entlang eines Breitengrades besser zu erfassen.

EMMO besitzt einen ähnlichen jährlichen Zyklus wie SECM. Der jährliche Zyklus von EMMO $S_{\rm m}$ hat eine jährliche Periode mit einer breitengradabhängigen Phase $(\sin(2\pi t + a_9 l))$ und eine halbjährliche Periode mit einer breitengradabhängigen Phase $(\sin(4\pi t + a_1 l))$. Mittels der Terme $a_5 \cdot \tanh(a_6 l + a_7) + a_8$ und $a_{10} \cdot \tanh(p_{11} l + a_{12}) + a_{13}$ wird die Amplitude der ganz- und halbjährigen Perioden beschrieben. Im Gegensatz zu SECM sind die Koeffizienten a_8 und a_{13} im Vergleich zu p_8 und p_{13} keinem Einfluss von t ausgesetzt. Die Zeitabhängigkeit wird vernachlässigt, da in Abbildung 3.4 keine zeitlich erhöhte Amplitude zu sehen ist.

Insgesamt wird EMMO durch folgende Gleichung beschrieben

$$X_{\rm m}(t,l) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot \tanh(a_3l + a_4) + S_{\rm m}(t,l) + a_{15}t \cdot \sin(a_{16}t + a_{17}) + a_{18}\sin(a_{19}l + a_{20})$$
(3.4)

Jährlicher Zyklus S_m :

$$S_{\rm m}(t,l) = (a_5 \cdot \tanh(a_6l + a_7) + a_8) \cdot \sin(2\pi t + a_9l) + (a_{10} \cdot \tanh(p_{11}l + a_{12}) + a_{13}) \cdot \sin(4\pi t + a_{14}l)$$
(3.6)

(3.5)

EMMO wird durch 21 Koeffizienten beschrieben $(a_0 - a_{20})$, die bestimmt werden müssen. Die Gleichung $X_{\rm m}$ wird an den Pazifischen Transect mittels der Methode der kleinsten Quadrate angepasst. Die Ergebnisse der Fit-Parameter sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Parameter	Wert	Parameter	Wert				
a_0	$1720.04~\mathrm{ppb}$	a_{11}	-0.344 /°				
a_1	$1.526 \text{ ppb} \mathrm{a}^{-1}$	a_{12}	3.116				
a_2	61.624 ppb	a_{13}	-1.948 ppb				
a_3	$0.0369/^{\circ}$	a_{14}	$0.0149 /^{\circ}$				
a_4	-0.231	a_{15}	$-1.114 \text{ ppb a}^{-1}$				
a_5	1.466 ppb	a_{16}	$0.903 \mathrm{a}^{-1}$				
a_6	$2.647 /^{\circ}$	a_{17}	3.542				
a_7	-10.337	a_{18}	-30.459 ppb				
a_8	4.834 ppb	a_{19}	$0.0345 /^{\circ}$				
a_9	$0.0409/^{\circ}$	a_{20}	-0.873				
a_{10}	2.169 ppb						

Tabelle 3.1: Parameter des a_0 bis a_{20} des empirischen Methan Modells (EMMO). Die Notation "/°" entspricht der Einheit pro Grad.

Nach IPCC [2013] ist eine gemittelte Wachstumsrate von 1999 bis 2006 von etwa 0.5 ppb und von 2007 bis 2011 von etwa 6 ppb für atmosphärisches CH₄ ermittelt worden. Vergleicht man dieses mit dem Koeffizienten a_1 für den Zeitraum von 2002 bis 2010, ist erkennbar, dass Ähnlichkeiten gegeben sind. Bei Betrachtung der Koeffizienten a_{15} bis a_{17} zeigt sich, dass die Periode des zugehörigen Sinusterms recht lang ist, was erforderlich ist, da das XCH₄ erst ab Mitte 2006 beginnt anzusteigen. Zudem weist der Term, wie an a_{17} zu sehen, eine große Phase von 3.542 auf.

3.3 Vergleich mit XCH₄ von CarbonTracker-CH₄

Es wird nun ein Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ durchgeführt. Dazu werden zunächst die Fit-Ergebnisse von EMMO für den Pazifischen Transect gezeigt und mit dem Pazifischen Transect von CT-CH₄ verglichen. Danach wird ein Vergleich von EMMO mit einer globalen Karte des XCH₄ von CT-CH₄ durchgeführt, um zu überprüfen wie gut EMMO das globale XCH₄ darstellt.

In Abbildung 3.6 ist ein Vergleich des Pazifischen Transects von EMMO und des geglätteten XCH_4 von $CT-CH_4$ dargestellt.

Abb. 3.6: Vergleich von EMMO (oberes Bild) mit geglättetem XCH₄ von CT-CH₄ (mittleres Bild) für den Pazifischen Transect bei -150°O. Für den Fit wurden das XCH₄ von CT-CH₄ für 12:00 Uhr UTC verwendet. Zusätzlich ist die Differenz Δ XCH₄ (unteres Bild) von EMMO zu dem XCH₄ von CT-CH₄ abgebildet. Sowohl Δ XCH₄ als auch das XCH₄ sind in ppb angegeben. Auf der y-Achse sind die Breitengrade, auf der x-Achse ist der Zeitraum vom 1.02.2002 bis zum 30.11.2010 notiert.



Vergleich von EMMO und geglättetem XCH4 von CT-CH $_4$ bei -150 $^{\circ}$ O und 12:00 UTC

Es ist erkennbar, dass EMMO das XCH₄ gut beschreibt. So wird der Jahresgang des XCH₄

wie auch der globale Anstieg gut durch EMMO repräsentiert. Man sieht immer zur Jahresmitte hin geringere Konzentrationen an XCH₄ auf der Nordhalbkugel. Zu Jahresbeginn ist das XCH₄ zwischen 80° N und 60° N niedriger als zum Jahresende. Dieser Zyklus wiederholt sich regelmäßig, wobei, global gesehen, die XCH₄-Werte ansteigen. Ab 2007 wird steigendes XCH₄ von EMMO simuliert. Die größten XCH₄-Werte werden um 2009 und am Anfang und Ende von 2010 zwischen 20°N bis 40°N erreicht. Der Nord/Südgradient wird von EMMO berücksichtigt. Auf der Südhalbkugel sieht man keinen ausgeprägten Jahresgang. Unterhalb des Äquators nimmt das XCH₄ ab 2007 merklich zu.

Zusätzlich ist in Abbildung 3.6 die Differenz Δ XCH₄ zwischen EMMO und dem XCH₄ von CT-CH₄ gezeigt (unteres Bild). EMMO überbewertet das XCH₄ beispielsweise Mitte des Jahres 2002 vom Äquator bis 80°N. Fast zu Beginn jedes Jahres (bis auf 2007 und 2008) werden die Konzentrationen bei 80°N zu niedrig simuliert. Auch zu Anfang des Jahres 2007 wird zwischen 20°N bis zum 60°N zu hohes XCH₄ modelliert. Die größten Überbewertungen des XCH₄ sind bei 80°S zu Beginn der Jahre 2002, 2004, 2005 und 2009 zu sehen. Zu Beginn und gegen Ende des Jahres 2010 ist erhöhtes XCH₄ zwischen 20°S bis 80°S und zwischen 60°S bis 80°S modelliert. Um 2003 und 2004 und zwischen 20°N bis 40°N ist das XCH₄ von CT-CH₄ größer als das von EMMO.

Der Eindruck eines guten Fits wird durch die kleine Standardabweichung von der Differenz von EMMO zu CT-CH₄ bestätigt. Diese liegt bei 4.34 ppb. Es bedeutet, dass ein XCH₄-Wert von EMMO im Mittel um 4.34 ppb vom mittleren XCH₄ von CT-CH₄ abweicht. Die Korrelation zwischen EMMO und dem XCH₄ von CT-CH₄ beträgt 0.99. Dies spricht für einen hohen linearen Zusammenhang zwischen EMMO und dem XCH₄ des Pazifischen Transects.

Zur weiteren Überprüfung lassen sich Zeitserien und Nord/Südgradienten von EMMO betrachten. So werden Zeitserien für 80°N, 20°N und 80°S des Pazifischen Transects genauer betrachtet, da man für diese Breitengrade Abweichungen von EMMO gesehen hat. Die Zeitserien sind in den Abbildungen 3.7, 3.8 und 3.9 dargestellt.

Abb. 3.7: Zeitserie von EMMO (rot) und dem geglätteten XCH_4 von $CT-CH_4$ (schwarz) bei 80°N. Diese wurde aus dem Pazifischen Transect extrahiert (Abb. 3.6). Abgebildet ist die Differenz (blau) zwischen EMMO und dem geglätteten XCH_4 von $CT-CH_4$.



Man erkennt den Grund für die Abweichungen von EMMO bei 80°N. Die Amplitude wie auch der Anstieg des XCH₄ wird von EMMO nach 2007 gut simuliert. Aber man sieht zum Teil eine Phasenverschiebung von EMMO zu CT-CH₄. Insgesamt liegen die Abweichungen von EMMO zu CT-CH₄ innerhalb von ± 10 ppb.

Abb. 3.8: Zeitserie von EMMO (rot) und dem geglätteten XCH_4 von $CT-CH_4$ (schwarz) bei 20°N mit zugehöriger Differenz (blau).



Vergleich der Zeitabhängigkeit von EMMO mit geglättetem XCH_4

Bei 20°N ist hingegen keine Phasenverschiebung im Gegensatz zu Abbildung 3.7 zu sehen. Dafür wird die Amplitude des XCH₄ von EMMO meist zu niedrig angenommen, bis auf den Jahresbeginn von 2002 und den Zeitraum von 2006 bis 2007. Daher sind die Abweichungen meist negativ und können bis zu -15 ppb betragen.

Abb. 3.9: Zeitserie von EMMO (rot) und dem geglätteten XCH_4 von $CT-CH_4$ (schwarz) bei $80^{\circ}S$ mit zugehöriger Differenz (blau).



Vergleich der Zeitabhängigkeit von EMMO mit geglättetem XCH_4 von $CT-CH_4$

Für 80°S ergibt sich ein ganz anderes Bild. Das XCH_4 von $CT-CH_4$ steigt kaum an, im Gegensatz zu dem XCH_4 von EMMO. Das XCH_4 von EMMO ist meist größer als das von $CT-CH_4$. Es ist schwierig, eine Periodizität für $CT-CH_4$ zu identifizieren. Die Abweichungen sind folglich überwiegend positiv und erreichen bis zu 15 ppb.

Zuletzt lässt sich noch der Nord/Südgradient beschreiben, welcher in den Abbildungen 3.10, 3.11 und 3.12 für willkürlich gewählte Tage dargestellt ist. Man sieht den Einfluss des Terms $a_2 \cdot \tanh(a_3 l + a_4)$.

Abb. 3.10: Nord/Südprofil von EMMO (rot) und dem geglätteten XCH₄ von CT-CH₄ (schwarz) am 8.03.2003. Dieses wurde aus dem Pazifischen Transect extrahiert (Abb. 3.6). Mit dargestellt ist die Differenz (blau) zwischen EMMO und dem geglätteten XCH₄ von CT-CH₄.



Der Verlauf des XCH₄ wird für Abbildung 3.10 durch EMMO gut wiedergegeben. Bei 20°N sind Abweichungen von dem XCH₄ von CT-CH₄ wie auch bei 80°S zu sehen. So liegen die Abweichungen innerhalb von ± 5 ppb. Von etwa 70°S bis 10°S sind diese fast null. Bei 80°S sind diese mit ungefähr 12 ppb am höchsten.

Abb. 3.11: Nord/Südprofil von EMMO (rot) und dem geglätteten XCH_4 von $CT-CH_4$ (schwarz) mit zugehöriger Differenz (blau) am 16.05.2005.



In Abbildung 3.11 wird das Nord/Südprofil gut von EMMO beschrieben. Abweichungen sind um -40°S, am Äquator und um 40°N zu sehen. Diese lassen sich im unteren Bild von Abbildung 3.11 besser erkennen. Die Abweichungen sind mit maximal 6 ppb gering.

Abb. 3.12: Nord/Südprofil von EMMO (rot) und dem geglätteten XCH₄ von CT-CH₄ (schwarz) mit zugehöriger Differenz (blau) am 28.08.2008.



Ähnliches gilt für Abbildung 3.12. Meist ist das XCH_4 von $CT-CH_4$ größer als das von EMMO. Größere Abweichungen sind bei etwa 50°N und 10°S zu sehen. So sind die Abweichungen für Abbildung 3.12 meist negativ und nicht kleiner als -8 ppb.

Beim Betrachten aller Zeitserien und Breitengradprofile wird deutlich, dass EMMO den Einfluss des Breitengrades besser modelliert als den zeitlichen Einfluss.

Im Folgenden wird beispielhaft eine Weltkarte vom XCH_4 für EMMO und eine für $CT-CH_4$ dargestellt, um zu untersuchen, in wie weit EMMO die XCH_4 -Verteilungen erfassen kann. Dazu wurden exemplarisch vier Monatsmittel vom Januar, April, Juli und Oktober des Jahres 2009 gebildet, um zum Beispiel Windeffekte zu minimieren und die Dauer lokaler Einflüsse auf das XCH_4 deutlicher hervorzuheben. Folgerichtig werden XCH_4 -Erhöhungen, die zeitlich längerfristiger aktiv sind, in den Karten dominieren.

Zum Vergleich werden XCH₄-Karten von EMMO für dieselben Monatsmittel gezeigt. Um die Unterschiede des XCH₄ von EMMO und CT-CH₄ zu zeigen, wird die Differenz zwischen EMMO und CT-CH₄ zusätzlich gebildet. Zusätzlich wird die Standardabweichung der Differenz zwischen EMMO und CT-CH₄ für jedes Monatsmittel angegeben. Die Resultate sind in den Abbildungen 3.13, 3.14, 3.15 zu sehen. Abb. 3.13: Globale Karte des XCH₄ von EMMO für die Monatsmittel von Januar, April, Juli und Oktober des Jahres 2009. Das XCH₄ ist in ppb dargestellt. Das XCH₄ von EMMO wurde für 12:00 Uhr UTC aus dem Pazifischen Transect bestimmt und ist in Einheiten von ppb gegeben.



XCH4-Verteilungen von EMMO für verschiedene Monatsmittel von 2009 12:00 UTC

Zunächst werden die Monatsmittel von EMMO für 2009 untersucht. Für den Januar und den April ist erhöhtes XCH_4 im Bereich von $22^{\circ}N$ bis $44^{\circ}N$ von 1785 ppb zusehen. Ab dem $44^{\circ}S$ sind XCH_4 -Werte von 1690 ppb zu erkennen. Zwischen $44^{\circ}N$ bis $88^{\circ}N$ weist das XCH_4 Werte von 1770 ppb auf. Dieses ist im April leicht erhöht. Von $22^{\circ}S$ bis zum Äquator sind XCH_4 -Werte von 1720 ppb bis 1750 ppb zu beobachten.

Im Juli sind XCH₄-Werte um 1770 ppb von 44°N bis 88°N zu erkennen. Sowohl im Juli als auch im Oktober zeigt das XCH₄ von 44°S bis 66°S Werte von 1690 ppb. Im Oktober wird XCH₄ von etwa 1670 ppb in der Antarktis erzielt. Vom Äquator bis zu 44°S zeigt das XCH₄ nahezu die gleichen Werte für Juli und Oktober, welche um 1730 ppb liegen. Im Oktober nimmt das XCH₄, von 22°N bis 88°N, Werte von 1790 ppb an.

Abb. 3.14: Globale Karte des XCH_4 von $CT-CH_4$ für die Monatsmittel von Januar, April, Juli und Oktober des Jahres 2009. Das XCH_4 von $CT-CH_4$ ist für 12:00 Uhr UTC abgebildet und ist in Einheiten von ppb.



XCH4-Verteilungen von CT-CH₄ für verschiedene Monatsmittel von 2009 um 12:00 UTC

Im Januar 2009 weist das XCH₄ vom Äquator bis zu 88°N Werte von etwa 1790 ppb auf. Hingegen gibt das XCH₄ für Regionen wie Grönland und dem Himalaya niedrige Werte um 1720 ppb an. Dies gilt ebenso für den Oktober und den April. Leicht erhöhtes XCH₄ ist in Zentral und Westafrika zu sehen. Auf dem Südamerikanischen Kontinent wird vom Äquator bis zu 22°S erhöhtes XCH₄ modelliert. Die höchsten XCH₄-Werte werden in Südostasien erreicht. Im Januar und im Juli sind große XCH₄-Erhöhungen von 1810 ppb bis 1825 ppb festzustellen. Vom Äquator bis teilweise 44°S wird XCH₄ von 1750 ppb bis 1700 ppb erreicht. Über der Antarktis zeigt das XCH₄ die geringsten Werte. Diese liegen im Bereich von 1600 ppb bis 1640 ppb. Im April sind XCH₄-Werte ähnlich wie im Januar, wobei, global gesehen, die XCH₄ Werte geringer erscheinen. So zeigt das XCH₄ geringere Werte über Zentralafrika und auch das XCH₄ über Südostasien hat sich um etwa 20 ppb verringert. Auf der Südhalbkugel ist das XCH₄ zwischen 44°N und 66°N leicht angestiegen.

Im Juli hat sich das XCH₄ über Südamerika auf 1750 ppb verringert. Zudem macht sich im Juli zwischen 44°N bis 66°N und 44°E bis 88°E erhöhtes XCH₄ von 1800 ppb bemerkbar. Im Vergleich zu den vorherigen Monaten nimmt das XCH₄, gobal gesehen, von 88°N bis knapp zum Äquator Werte von 1785 ppb an. Im Vergleich zum April sind wieder erhöhte XCH₄-Werte über Zentralafrika und Südostasien zu sehen. Im Oktober hat sich das XCH₄ über Zentralafrika wieder verringert und auch über Südamerika nimmt das XCH₄ wieder erhöhte Werte von etwa 1800 ppb an. Das zuvor im Juli beschriebene XCH₄ zwischen 44°N bis 66°N und 44°E bis 88°E hat wieder geringere Werte nachzuweisen. Das erhöhte XCH₄ über Südostasien ist ähnlich zu demselben vom April. Allgemein lässt sich sagen, dass Variationen des XCH₄ unterhalb von 44°S im Juli und Oktober kaum ausmachen sind.

Abb. 3.15: Differenz des XCH₄ zwischen EMMO (Abb. 3.13) zu CT-CH₄ (Abb. 3.14) für die Monatsmittel von Januar, April, Juli und Oktober des Jahres 2009. Die Differenz Δ XCH₄ ist in ppb angegeben.



XCH₄-Differenz von EMMO von CT-CH₄ für die Monatsmittel von 2009 um 12:00 UTC

Zum Schluss lässt sich noch ein Blick auf die Differenz von EMMO zu CT-CH₄ werfen (Abb. 3.15). Es bestätigt sich der Eindruck, dass EMMO die grobe räumliche Verteilung des XCH₄ gut wiedergibt. Meist wird das XCH₄ über der Antarktis von EMMO überbewertet. Dasselbe gilt für Regionen wie Grönland, dem Himalaya und die Westküste der USA. Die Abweichungen können dort bis zu 60 ppb betragen. An der Westküste der USA wird das XCH₄ von CT-CH₄ nur um 20 ppb überbewertet. Wie schon in der Abbildung 3.14 angedeutet können die lokalen XCH₄-Erhöhungen nicht von EMMO simuliert werden. So betragen dort die Abweichungen -40 ppb bis -80 ppb. Wird von den lokalen Ereignissen abgesehen, liegen die Abweichungen der Differenzen bestätigt. So zeigt der Januar die größte Standardabweichung mit 17.5 ppb, was nachvollziehbar ist, da der Monat von hohen Differenzen Δ XCH₄ dominiert wird. Am geringsten ist die Standardabweichung im April mit 11.5 ppb, welche nur ein wenig kleiner ist als die im Juli mit 12.1 ppb. Im Oktober nimmt die Standardabweichung einen Wert von 15.2 ppb an. Wird über alle Standardabweichungen gemittelt, erhält man einen Wert von 14.1 ppb.

Wie schon erwähnt, ist zu erwarten gewesen, dass EMMO die lokalen XCH₄-Erhöhungen und Senken nicht simulieren kann. Hierauf werden auch weitere Terme in EMMO nur einen signifikanten Einfluss nehmen. Der Grund für die teilweise hohen Abweichungen beruht auf der Vernachlässigung des longitudinalen Einflusses.

4 Validation gegen TCCON

Um die Genauigkeit von EMMO zu quantifizieren, wird EMMO gegen unabhängige Daten validiert. Hierzu eignet sich das XCH₄ von TCCON Messungen. Dazu wird zuerst in Kapitel 4.1 beschrieben, von welchen TCCON Stationen das XCH₄ verwendet wird und wie es angepasst wird, um es mit EMMO und CT-CH₄ zu vergleichen. Zudem wird gezeigt, welche Parameter berechnet werden, um die Qualität von EMMO beschreiben. Zuletzt werden die Ergebnisse der Validation von EMMO gegen TCCON und CT-CH₄ und CT-CH₄ gegen TCCON an den Stationen gezeigt. Dazu werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen und Korrelationen der Daten untereinander berechnet.

4.1 Verwendung der TCCON-Daten

Zur Validation mit EMMO wurden die TCCON-Daten von der Seite http: //tccon.ipac.caltech.edu/ heruntergeladen. Diese lagen im NetCDF Format vor. Da für die Auswertung von CT-CH₄ und EMMO nur der Zeitraum von 2002 bis Ende 2010 betrachtet wurde, beschränkte sich die Wahl auf 16 TCCON Stationen, welche in Tabelle 4.1 gelistet sind. Da TCCON erst 2004 gegründet wurde [Wunch et al., 2011], konnte der Zeitraum von 2004 bis Ende 2010 mit EMMO und CT-CH₄ verglichen werden.

TCCON-Station	$Breitengrad[^{\circ}]$	$L\ddot{a}ngengrad[^{\circ}]$
Ny-Alesund	78.90	11.90
Sodankyla	67.37	26.63
Bialystok	53.23	23.03
Bremen	53.10	8.85
Karlsruhe	49.10	8.44
Orleans	47.97	2.11
Garmisch	47.48	11.06
Park Falls	45.95	-90.27
Lamont	36.60	-97.49
Tsukuba	36.05	140.12
JPL	34.20	-118.18
Izana	28.30	-16.50
Darwin	-12.42	130.89
Wollongong	-34.41	150.88
Lauder 120HR	-45.04	169.68
Lauder $125 \mathrm{HR}$	-48.04	169.68

Tabelle 4.1: Zum Vergleich mit EMMO und $CT-CH_4$ genutzte TCCON-Stationen. Aufgeführt sind die Breiten- und Längengrade der Stationen.

Zur Veranschaulichung werden die in Tabelle 4.1 aufgeführten Stationen nochmal in einer Grafik dargestellt.



Abb. 4.1: Zur Validation mit EMMO und CT-CH₄ einbezogene TCCON-Stationen.

Für alle TCCON-Stationen wird ein Zeitraum zwischen 10 bis 14 Uhr Lokalzeit gewählt. Das zum Vergleich genutzte XCH_4 -Feld von CT-CH₄ ist für 12:00 Uhr UTC gegeben. Daher werden nur TCCON-XCH₄ Messungen verwendet, welche zwischen 10:00 Uhr UTC bis 14:00 Uhr UTC gemacht wurden. Daher muss der festgelegte Zeitraum von 10 bis 14 Uhr Lokalzeit auf UTC Zeit umgerechnet werden.

Zuletzt konstruiert man ein Feld für jede TCCON-Station für den Zeitraum vom 1.01.2002 bis zum 31.12.2010. In dieses Feld werden für Tage, zu denen TCCON-XCH₄ für den Zeitraum von 10:00 bis 14:00 Uhr UTC bereitsteht, Mittlungen über die Messungen durchgeführt. Damit die Mittlung durchgeführt wird, müssen mehr als zwei XCH₄-Werte für den jeweiligen Tag gegeben sein. Andernfalls wird keine Mittlung durchgeführt und das XCH₄ eines solchen Tages auf einen konstanten Wert von zum Beispiel -9999 ppb gesetzt.

Für den Vergleich mit EMMO und CT-CH₄ wird nun das XCH₄-Feld von TCCON genutzt. Dazu werden die Tage verglichen und Tage, an denen TCCON den Wert -9999 ppb zeigt, werden aus allen XCH₄-Feldern entfernt. So sieht man in den Zeitserien von EMMO, TCCON und CT-CH₄ nur zu den Tagen XCH₄, zu denen ein Datenabgleich von EMMO und CT-CH₄ mit TCCON möglich ist. Aufgrund der räumlichen Auflösung von CT-CH₄ ist eine genaue Zuordnung des XCH₄ von CT-CH₄ zu den TCCON-Stationen nur schwer möglich. Hierdurch können Unsicherheiten auftreten. Es wurde immer eine Gridbox des XCH₄ gewählt, welche die jeweilige TCCON-Station abdeckt.

Für die Zeitserien werden die Differenzen zwischen EMMO und TCCON, EMMO und CT-CH₄ sowie zwischen CT-CH₄ und TCCON gebildet. Aus diesen Differenzen werden Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt, um zu zeigen, wie gut zum Beispiel

EMMO das XCH₄ gegen TCCON modelliert. Mit dem Mittelwert kann eine mittlere Differenz ermittelt werden. Sie zeigt, wie weit zum Beispiel das EMMO-XCH₄ vom TCCON-XCH₄ entfernt liegt. Die Standardabweichung gibt die durchschnittliche Abweichung eines Einzelwertes vom Mittelwert an. Sie ist ein Maß für die Streuung der Daten. Die Korrelation r von EMMO mit TCCON wird bestimmt, um zu schauen, in wie weit zwischen EMMO-XCH₄ und TCCON-XCH₄ ein linearer Zusammenhang besteht. r kann Werte von 1 bis -1 annehmen. Je näher r an 1 liegt, desto ausgeprägter ist der lineare Zusammenhang. Ist r nahe an -1, besteht ein nichtlinearer Zusammenhang. Ist r in der Nähe von null, liegt gar keine Linearität vor. Die Korrelation kann ein Indiz dafür sein, ob beispielsweise der Jahresgang des XCH₄ von EMMO mit dem von TCCON übereinstimmt.

Für die Streuplots, welche in Kapitel 4 gezeigt werden, wird beispielsweise das EMMO-XCH₄ mit dem TCCON-XCH₄ an allen Stationen verglichen. Es wird die Differenz zwischen EMMO und TCCON gebildet, woraus sich der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmen lässt. Zudem wird noch die Korrelation berechnet. Diese Schritte werden für die Vergleiche von EMMO mit CT-CH₄ und CT-CH₄ an allen TCCON Stationen analog durchgeführt.

4.2 Validationsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden nun die Validationsergebnisse von EMMO mit TCCON, EMMO mit CT-CH₄ und CT-CH₄ mit TCCON an den TCCON-Stationen gezeigt. Um zuerst einen Eindruck zu gewinnen, wie gut EMMO das XCH₄ von TCCON abbildet, werden zunächst die für den Vergleich von EMMO mit TCCON und CT-CH₄ sowie CT-CH₄ mit TCCON angefertigten Streuplots beschrieben. Hierbei beschreibt Δ den Mittelwert (Bias) der Differenz des XCH₄ an allen TCCON-Stationen. Die Standardabweichung σ (Station-to-Station-Bias) wird ebenso für die Differenz des XCH₄ an allen TCCON-Stationen ausgewertet. Zudem wird die Korrelation r zwischen dem zu vergleichenden XCH₄ bestimmt.

Abb. 4.2: Vergleich von EMMO-XCH₄ mit TCCON-XCH₄ für alle untersuchten Stationen. Das XCH₄ ist in ppb angegeben. Das XCH₄ einer Station ist farblich markiert. Das XCH₄ von einigen TCCON-Stationen ist nicht zu sehen, da die Zahl der gemittelten TCCON-Messungen immer unterschiedlich ist (Tabelle 4.2). Nebenbei ist der Mittelwert (Bias) Δ in ppb, die Standardabweichung σ (Station-to-Station-Bias) in ppb und der Korrelationskoeffizient r angegeben. Die schwarze (1:1)-Linie stellt den Idealfall einer Gleichheit des XCH₄ von EMMO und TCCON dar.



Die Differenz von EMMO-XCH₄ zu TCCON-XCH₄ hat ein Δ von -13.9 ppb und ein σ von 13.7 ppb. Die Korrelation beträgt 0.90. Der negative Werte für Δ ist erklärbar, da das XCH₄ überwiegend unter der 1:1-Linie (also auf der TCCON-Seite) liegt. Die größten Abweichungen zeigt EMMOs XCH₄ an den Stationen Darwin, JPL und Wollongong. Das EMMO-XCH₄ von den Stationen Garmisch, Izana und Park Falls liegt nahe der 1:1-Linie. Dafür zeigt das EMMO-XCH₄ bei Garmisch, Izana und Sodankyla eine recht hohe Streuung. Zudem ist zu sehen, dass an Stationen wie Lauder, Lamont, Wolllogong und Darwin eine recht hohe Zahl an XCH₄-Werten gegeben ist.

Abb. 4.3: Vergleich von EMMO-XCH₄ mit XCH₄ von CT-CH₄ 2010 für alle untersuchten Stationen. (analog zu Abb. 4.2)



Bei dem Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ wird ein Δ von -5.6 ppb, ein σ von 9.6 ppb und eine Korrelation von 0.95 erzielt. Δ und σ sind geringer im Vergleich zu Abbildung 4.2, da TCCON unabhängige Daten bereitstellt. Anhand von Abbildung 4.3 sieht man, dass das EMMO-XCH₄ aufgrund des geringen Wertes von Δ nahe am Idealfall liegt. Nur die Stationen Darwin und Tsukuba zeigen größere Verschiebungen in Richtung des XCH₄ von CT-CH₄. Das XCH₄ fast aller Stationen zeigt wenig Streuung. Die Streuung des XCH₄ von Tsukuba ist im Vergleich zu dem XCH₄ der anderen Stationen erhöht. Das EMMO-XCH₄ von Lamont , von Wollongong und von Park Falls ist der 1:1-Linie am nächsten. Die großen Abweichungen von JPL von der 1:1-Linie werden durch den Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ nicht bestätigt.

Abb. 4.4: Vergleich von Carbon Tracker-XCH₄ mit TCCON-XCH₄ für alle untersuchten Stationen. (analog zu Abb. 4.2)



Zuletzt lässt sich noch der Streuplot von CT-CH₄ mit TCCON betrachten. Es ergibt sich beim Vergleich ein Δ von -8.3 ppb, ein σ von 12.1 ppb und eine Korrelation zwischen den Daten von 0.93. Diese Werte liegen zwischen denen der vorherigen Vergleiche von EMMO-XCH₄ mit TCCON-XCH₄ und dem XCH₄ von CT-CH₄ (CT-XCH₄). Überwiegend ist TCCON-XCH₄ größer als CT-XCH₄, obwohl beispielsweise das CT-XCH₄ von Park Falls etwas größer ist als das TCCON-XCH₄. Nahe der 1:1-Linie liegt das CT-XCH₄ von Park Falls, Izana und Tsukuba. Die größten Abweichungen zeigt CT-XCH₄ bei Darwin, Wollongong, Lamont und JPL. Auch weist CT-XCH₄ an Stationen wie JPL und Wollongong eine recht hohe Streuung auf. Auffällig ist, dass die Vergleiche von CT-XCH₄ mit TCCON-XCH₄ sowie EMMO-XCH₄ mit TCCON-XCH₄ nahezu dasselbe σ zeigen.

Zur genaueren Betrachtung werden nun die einzelnen Zeitserien des XCH₄ an den TCCON-Stationen beschrieben. Dazu werden Vergleiche von EMMO mit TCCON, von EMMO mit CT-CH₄ und CT-CH₄ mit TCCON gezeigt. Die Zeitserien sind in den Abbildungen 4.5, 4.6, 4.7 und 4.8 zu sehen. Für alle drei Vergleiche wurden Mittelwerte (Bias) d und Standardabweichungen s der Differenzen berechnet, welche in Tabelle 4.2 gelistet sind. Zudem werden die genannten Korrelationskoeffizienten r der Vergleiche in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Abb. 4.5: Vergleich des XCH₄ von EMMO (grün) mit TCCON (schwarz) und CT-CH₄ (rot). Nur an Tagen, bei denen ein Abgleich des XCH₄ von TCCON mit EMMO und CT-CH₄ möglich ist, werden Daten aufgetragen. Sortiert sind die TCCON-Stationen Ny-Alesund, Sodankyla, Bialystok und Bremen nach Breitengraden. Mit angeben ist der Mittelwert (Bias) d in ppb, die Standardabweichung s in ppb und der Korrelationskoeffizient r für den Vergleich von EMMO mit TCCON (abgekürzt als TC).



Vergleich von EMMO mit TCCON und CT-CH₄

Für Ny-Alesund sieht man, dass die Zeitreihen EMMO und TCCON recht gut übereinstimmen. Der Mittelwert und die Standardabweichung des Vergleiches liegen bei d=7.4 ppb und s=13.5 ppb. Es ist zu sehen, dass TCCON-XCH₄ nach 2010 gut 20 bis 40 ppb niedriger als EMMO-XCH₄ und CT-XCH₄ ist. Kleinere Abweichung sind Anfang 2008 und Mitte 2005 zu sehen. Die Korrelation ist mit 0.43 nicht hoch. Eine bessere Korrelation zeigt der Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ von 0.86. Hierbei zeigt sich ein d mit 2.0 ppb und ein s mit 5.4 ppb. Einen höheres d von 5.4 ppb und s von 12.2 ppb wird beim Vergleich von CT-CH₄ mit TCCON erzielt. Die Korrelation ist mit r = 0.57 niedriger.

Sodankyla zeigt das kleinste d von nur -0.68 ppb, aber das höchste s mit 16.0 ppb aller Vergleiche des XCH₄ von EMMO mit TCCON. Es ist zu erkennen, dass EMMO und TCCON nahe beieinander liegen, aber TCCON-XCH₄ zeigt Anfang 2010 bis zu 40 ppb geringere Werte an als das XCH₄ von EMMO und CT-CH₄. r ist mit 0.22 sehr niedrig. Der Vergleich von EMMO zu CT-CH₄ zeigt eine etwas bessere Korrelation von 0.52, einen etwas größeren Mittelwert von -4.1 ppb, aber eine Standardabweichung von nur 7.7 ppb. Dies ist auch an der Zeitreihe zu erkennen, in welcher das XCH₄ von CT-CH₄ gut mit dem von EMMO übereinstimmt. Der Vergleich von CT-CH₄ mit TCCON zeigt ein d von 3.4 ppb, aber ein ähnlich hohes s mit 11.7 ppb wie EMMO mit TCCON. Dafür zeigt der Vergleich CT-CH₄ mit TCCON eine hohe Korrelation von 0.68. Bei Bialystok ist festzustellen, dass d für EMMO mit TCCON sowie für EMMO mit CT-CH₄ nahezu gleich ist (Tabelle 4.2). Der Verlauf des XCH₄ von TCCON wird recht gut bis auf ein d von EMMO wiedergegeben. So liegt s bei nur 10.1 ppb und die Korrelation ist mit 0.48 höher als bei Sodankyla. Die Vergleiche des XCH₄ von EMMO mit CT-CH₄ und von CT-CH₄ mit TCCON zeigen ein ähnliches s von 8.4 ppb bzw. 8.7 ppb. Die Korrelation von EMMO mit CT-CH₄ ist mit 0.52 wiederum größer und für den Vergleich CT-CH₄ mit TCCON mit 0.68 am größten.

Bei Bremen ist ein hohes d von -17.4 ppb, ein s von 10.3 ppb und eine erhöhte Korrelation von 0.56 für den Vergleich des XCH₄ von EMMO zu TCCON zu sehen. Man erkennt, dass die Zeitserien von TCCON und EMMO durch einen ständigen Bias geprägt sind, welcher durch die Vergleiche von EMMO mit CT-CH₄ (-8.2 ppb) sowie von CT-CH₄ mit TCCON (-9.2 ppb) bestätigt wird. Dasselbe gilt für s, welches für die beiden letztgenannten Vergleiche ähnlich ist (8.4 ppb bzw. 9.2 ppb (Tabelle 4.2)). Die hohen Korrelationen der Vergleiche des XCH₄ von EMMO zu CT-CH₄ und von CT-CH₄ zu TCCON mit 0.73 und 0.76 zeigen, dass der Jahresgang gut wiedergegeben werden kann.

Abb. 4.6: Wie Abbildung 4.5, aber für die TCCON-Stationen Karlsruhe, Orleans, Garmisch und Park Falls.



Vergleich von EMMO mit TCCON und CT-CH₄

Bei Karlsruhe sieht man für den kurzen Zeitraum, dass das XCH₄ von TCCON höher als das von EMMO liegt. Dies führt zu einem d von -12.0 ppb. Der Vergleich von TCCON zu CT-CH₄ bestätigt diesen Bias mit einem d von -8.0 ppb. Dafür zeigt der Vergleich von EMMO zu TCCON eine niedriges s von 9.7 ppb, was durch die anderen Vergleiche verifiziert wird (Tabelle 4.2). Es ist für Karlsruhe zu erkennen, dass das XCH₄ nicht allzu stark streut. Zudem ist die Korrelation von EMMO zu TCCON bei Karlsruhe mit 0.48 niedrig. Dafür zeigt das XCH_4 von EMMO mit CT-CH₄ eine sehr hohe Korrelation von 0.80 und CT-CH₄ mit TCCON eine Korrelation von 0.75. Dies kann für eine gute Modellierung des Jahresgangs des XCH_4 durch EMMO und CT-CH₄ sprechen.

Bei Orleans ergibt sich für die Standardabweichungen und Mittelwerte ein ähnliches Bild wie bei Karlsruhe. Das XCH₄ von EMMO stimmt gut mit dem von TCCON überein und dessen Streuung ist gering. Dasselbe gilt für das XCH₄ von EMMO im Vergleich zu CT-CH₄ (Tabelle 4.2). So zeigt das XCH₄ von EMMO zu TCCON ein d von -9.2 ppb, ein svon 7.7 ppb und eine Korrelation von 0.56. Bei dem Vergleich von CT-CH₄ mit TCCON ist ram höchsten und liegt bei 0.68. Die Werte für s sind nahezu identisch für die drei Vergleiche. Für EMMO-XCH₄ zu CT-XCH₄ liegt s bei 8.0 ppb und für CT-XCH₄ mit TCCON-XCH₄ bei 7.2 ppb.

Auch bei Garmisch ist zwischen dem XCH₄ von EMMO und TCCON kaum ein Bias zu erkennen. Man sieht aber, dass das XCH₄ von TCCON eine erhöhte Streuung aufweist, zum Beispiel um das Jahr 2008. Es ergibt sich für den Vergleich des XCH₄ von EMMO mit TCCON ein kleiner Wert für d von -4.0 ppb. Ähnlich niedrig ist d für den Vergleich von EMMO zu CT-CH₄ (-4.6 ppb) und äußerst niedrig beim Vergleich von CT-CH₄ zu TCCON (-0.6 ppb). EMMO zeigt zu TCCON ein s von 11.5 ppb, was durch die anderen Vergleiche bestätigt wird (Tabelle 4.2). Für EMMO mit TCCON zeigt sich eine Korrelation von 0.57. EMMO zeigt mit CT-CH₄ eine höhere Korrelation von 0.70 und CT-CH₄ mit TCCON ein rvon 0.77.

Für Park Falls ergibt sich für den Vergleich von EMMO zu TCCON ein d von -9.7 ppb, ein s von 11.1 ppb und eine sehr hohes r von 0.75. Der Vergleich von EMMO zu CT-CH₄ weist ein ähnliches d mit -7.5 ppb, ein niedrigeres s mit 8.4 ppb und eine ähnlich großes r von 0.78 auf. Man sieht, dass das XCH₄ gut von EMMO simuliert werden kann. Es bleibt aber ein Bias des XCH₄ von EMMO zu TCCON, welchen man in der Zeitserie von Park Falls erkennt. CT-CH₄ weist mit TCCON ein ähnliches s wie EMMO zu TCCON auf, zeigt aber einen kleinen Bias von -2.2 ppb.

Abb. 4.7: Wie Abbildung 4.5, aber für die TCCON-Stationen Lamont, Tsukuba, JPL und Izana.



Vergleich von EMMO mit TCCON und CT-CH₄

Für Lamont ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Bremen. Erkennbar ist der deutliche Bias von EMMO zu TCCON mit -15.2 ppb. Hingegen ist der Bias von EMMO zu CT-CH₄ mit -1.1 sehr klein, was auch aus der Zeitserie hervorgeht. Dementsprechend hoch ist d von CT-CH₄ zu TCCON mit -14.1 ppb. s ist für alle drei Vergleiche in etwa gleich (Tabelle 4.2). Dafür wird aber ein r von 0.54 für den Vergleich von EMMO zu TCCON erreicht. Dieses ist für EMMO zu CT-CH₄ noch größer und liegt bei 0.71. Beim Vergleich des XCH₄ von CT-CH₄ zu TCCON wird ein r von 0.81 erreicht.

Obwohl Tsukuba und Lamont auf nahezu dem gleichen Breitengrad liegen, wird Tsukuba nicht sonderlich gut von EMMO beschrieben. So zeigen die Vergleiche EMMO mit TCCON und EMMO mit CT-CH₄ einen ähnliches d von -14.8 ppb bzw. -12.3 ppb. Auch die Standardabweichungen sind nahezu gleich mit 12.1 ppb (EMMO zu TCCON) und 12.4 ppb (EMMO zu CT-CH₄). Dafür ist d von CT-CH₄ zu TCCON mit -2.5 ppb recht klein und die Standardabweichung ist mit 9.4 ppb nicht hoch. Äußerst niedrig sind hingegen die Korrelationen von EMMO zu TCCON mit nur 0.11 und von EMMO zu CT-CH₄ mit 0.24. Dies hängt damit zusammen, dass EMMO das XCH₄ Mitte 2009 niedriger simuliert als CT-CH₄ und TCCON. Das XCH₄ von CT-CH₄ zu TCCON gibt ein r von 0.69 an. Man sollte aber bedenken, dass bei Tsukuba nur 155 Datenpunkte ausgewertet werden konnten.

Schon beim Betrachten der JPL-Station sieht man den hohen Bias zwischen EMMO und TCCON, welcher mit einem d von -21.1 ppb bemessen wird. EMMO zu CT-CH₄ zeigt hingegen nur einen Bias von bei 3.1 ppb, was in der Zeitserie zu erkennen ist. Die Standardabweichungen für EMMO mit TCCON (10.4 ppb) und CT-CH₄ mit TCCON (10.6 ppb)

sind nahezu gleich. Einzig bei EMMO mit $CT-CH_4$ ist die Standardabweichung niedriger (7.2 ppb). Insgesamt zeigt EMMO mit $CT-CH_4$ eine Korrelation von 0.59, welche höher als die von EMMO mit TCCON (0.39) und auch höher als die von $CT-CH_4$ mit TCCON (0.50) ist.

Bei Izana zeigt sich, dass die Werte für d für die Vergleiche von EMMO mit TCCON (-4.3 ppb) und EMMO mit CT-CH₄ (-3.3 ppb) nahezu gleich sind. Dafür ist s größer beim Vergleich von EMMO mit TCCON (11.1 ppb) als bei EMMO mit CT-CH₄ (7.2 ppb). Das XCH₄ von EMMO zeigt mit TCCON-XCH₄ eine niedrige Korrelation (0.39), wobei EMMO mit CT-CH₄ ein r von 0.77 aufweist. So kann man sagen, dass das XCH₄ von EMMO mit dem TCCON übereinstimmt, aber der Jahresgang wohl nicht richtig wiedergegeben wird. Beispielsweise nimmt das XCH₄ von EMMO Mitte 2007 und Mitte 2010 ab, aber das XCH₄ von TCCON nimmt zu.





Vergleich von EMMO mit TCCON und CT-CH₄

Bei Darwin zeigt EMMO mit TCCON ein hohes d mit -25.6 ppb. Dagegen ist die Standardabweichung mit 9.6 ppb recht klein. EMMO zeigt gegen TCCON eine sehr hohe Korrelation von 0.70. Der Bias von EMMO mit CT-CH₄ ist bei Darwin mit -12.2 ppb fast so groß wie das d von CT-CH₄ mit TCCON (13.4 ppb). Der Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ zeigt mit 7.6 ppb ein geringes s. Die Standardabweichung von CT-CH₄ zu TCCON ist mit 9.0 ppb fast genauso groß wie das s von EMMO zu TCCON. Dass die Daten untereinander eine geringe Streuung zeigen, lässt sich auch an den Zeitreihen bei Darwin sehen. So liegt zwar ein hoher Bias bei Darwin vor, aber die Korrelationen sind sehr hoch (Tabelle 4.2). Folglich kann EM-MO zwar den Jahresgang des XCH₄ erfassen, aber nicht die hohen XCH₄ Werte von TCCON.

Wollongong zeigt ein ähnliches d mit -22.7 ppb für den Vergleich des XCH₄ von EM-

MO mit TCCON wie bei Darwin. Dafür liegt EMMO näher an CT-CH₄, da es nur einen Bias von -4.4 ppb zeigt. Dieses lässt sich an der Zeitserie bei Wollongong erkennen. Die Werte für *s* sind für die Vergleiche von EMMO zu TCCON sowie von CT-CH₄ zu TC-CON mit 12.4 ppb und 11.0 ppb (Tabelle 4.2) recht groß. Für den Vergleich von EMMO zu CT-CH₄ zeigt sich ein *s* von 6.5 ppb. Schon beim Blick auf das XCH₄ von TCCON lässt sich erahnen, dass die Korrelationen zu TCCON nicht hoch sein können, da das XCH₄ von TCCON stark streut. So ergibt sich ein *r* für EMMO zu TCCON von 0.02 und für CT-CH₄ zu TCCON zeigt sich eine Korrelation von 0.41. Ein *r* von 0.53 wie auch *s* bestätigen den Eindruck, dass EMMO das XCH₄ von CT-CH₄ bei Wollongong gut simuliert.

Zuletzt lässt sich ein Blick auf die Lauder-Station werfen. Zunächst werden die Ergebnisse des FTS vom Typ 120HR behandelt. Für das XCH₄ von EMMO zu TCCON wird ein d von 10.3 ppb, ein s von 9.7 ppb und eine hohe Korrelation von 0.71 festgestellt. Beim Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ wird ein sehr niedriges d von -0.75 ppb angegeben, ein etwas besseres s von 6.8 ppb und ein r von 0.67 erzielt. Das XCH₄ von CT-CH₄ zeigt mit TCCON eine noch höhere Korrelation von 0.83. Insgesamt lassen sich bis auf das Jahresende von 2010 kaum Abweichungen von EMMO zu TCCON erkennen. Dabei zeigt TCCON XCH₄, welches um gut 20 ppb höher liegt als das von EMMO.

Dies wird durch das andere FTS vom Typ 125HR bestätigt, wobei EMMO mit TC-CON eine niedrige Korrelation von 0.21 hat. Hierbei muss bedacht werden, dass die TCCON-Messungen erst 2010 begannen. Durch die Abweichung des XCH₄ gegen Ende 2010 kommt ein höheres d von -15.9 ppb zustande und ein s von 10.2 ppb. Für EMMO mit CT-CH₄ zeigt sich ein d mit 0.99 ppb, eine kleines s von 8.6 ppb und eine Korrelation von 0.45. Die Korrelation von dem Vergleich CT-CH₄ mit TCCON ist mit 0.69 für diese Station am höchsten. Der Bias ist mit -14.9 ppb ähnlich groß wie der vom Vergleich EMMO mit TCCON. Zudem weist der Vergleich von CT-CH₄ zu TCCON das niedrigste σ mit 7.7 für diese Station auf.

In der Tabelle 4.2 sind nochmals alle zuvor beschriebenen Werte zusammenfassend aufgeführt. Außerdem werden mit n noch die Zahl der gemittelten TCCON-Messungen angegeben. Um einen gesamten Eindruck über die Qualität von EMMO zu erhalten, werden Mittelwerte für d, s und r errechnet. Man erhält einen mittleren Bias Δ_d , eine mittlere Standardabweichung Δ_s und eine mittlere Korrelation Δ_r für alle drei Vergleiche. Zudem wird noch der Station-to-Station-Bias σ , die Standardabweichung aller d, ausgewertet. Tabelle 4.2: Ergebnisse der Validation von EMMO mit TCCON und CT-CH₄ und CT-CH₄ mit TCCON an verschiedenen TCCON-Stationen. Zur Vereinfachung wird TC-CON durch TC, CT-CH₄ durch CT abgekürzt. d bezeichnet den Mittelwert der Differenz zwischen den jeweiligen Zeitreihen. s hingegen entspricht der Standardabweichung der Differenzen. Mit r wird der Korrelationskoeffizient bezeichnet. n entspricht der Anzahl der gemittelten TCCON-Messungen im Zeitraum von 2004 bis Ende 2010, die für einen Datenabgleich mit EMMO und CT-CH₄ genutzt wurden. Mehrere Mittelwerte $\Delta_{d,s,r}$ werden für alle d, s und r angeben. σ ist die Standartabweichung von allen d.

Station		$d[\mathrm{ppb}]$			$s[{\rm ppb}]$			r [-]		n [-]
	EMMO,TC	EMMO,CT	CT,TC	EMMO,TC	EMMO,CT	CT,TC	EMMO,TC	EMMO,CT	CT,TC	-
Ny-Alesund	7.4	2.0	5.4	13.5	5.4	12.2	0.43	0.86	0.57	131
Sodankyla	-0.68	-4.1	3.4	16.0	7.7	11.9	0.22	0.52	0.69	227
Bialystok	-11.9	-11.8	-0.05	10.1	8.4	8.7	0.48	0.54	0.68	180
Bremen	-17.4	-8.2	-9.2	10.3	8.4	9.2	0.56	0.76	0.73	205
Karlsruhe	-12.0	-4.0	-8.0	9.7	7.0	7.7	0.48	0.80	0.75	62
Orleans	-9.2	-6.2	-3.0	7.7	8.0	7.2	0.56	0.44	0.68	114
Garmisch	-4.0	-4.6	0.60	11.5	9.3	9.1	0.57	0.70	0.77	320
Park Falls	-9.7	-7.5	-2.2	11.1	8.4	10.1	0.75	0.78	0.79	997
Lamont	-15.2	-1.1	-14.1	11.7	10.9	8.9	0.54	0.72	0.81	599
Tsukuba	-14.8	-12.3	-2.5	12.1	12.4	9.4	0.11	0.24	0.69	155
JPL	-21.1	3.1	-24.3	10.6	7.2	10.4	0.39	0.59	0.50	281
Izana	-4.3	-3.3	-0.98	11.1	8.2	8.9	0.37	0.77	0.72	108
Darwin	-25.6	-12.2	-13.4	9.6	7.1	9.0	0.70	0.71	0.72	906
Wollongong	-22.7	-4.4	-18.2	12.4	6.5	11.0	0.02	0.53	0.41	294
Lauder 120HR	-10.3	-0.75	-9.5	9.7	6.8	7.9	0.71	0.67	0.83	529
Lauder $125 \mathrm{HR}$	-15.9	-0.99	-14.9	10.2	8.3	7.7	0.21	0.45	0.69	118
$\Delta_{d,s,r}$	-11.7	-4.8	-6.9	11.1	8.1	9.3	0.44	0.63	0.69	-
σ	8.2	4.6	8.1							

Es zeigt sich, dass EMMO im Mittel mit TCCON ein nicht allzu hohes Δ_r von 0.44 besitzt. Dieses ist für den Vergleich von EMMO mit CT-CH₄ und CT-CH₄ mit TCCON mit 0.63 und 0.69 größer. Die geringe mittlere Korrelation von EMMO zu TCCON wird vor allem durch die niedrigen Korrelationen an den Stationen Wollongong und Tsukuba hervorgerufen.

Das XCH₄ von EMMO hat mit TCCON-XCH₄ ein Δ_s von nur 11.1 ppb. Das Δ_s von EMMO mit CT-CH₄ ist mit 8.1 ppb kleiner als das Δ_s von CT-CH₄ mit TCCON (9.3 ppb). Es bedeutet, dass das die Streuung des XCH₄ von EMMO zu TCCON recht gering ist.

EMMO zeigt zu TCCON einen mittleren Bias von nur -11.7 ppb. Beeinflusst wird dieser stark von den großen mittleren Differenzen bei den Stationen von Wollongong, Darwin und JPL. Der Mittelwert von EMMO zu CT-CH₄ ist mit -4.8 ppb sehr niedrig und der von CT-CH₄ zu TCCON ist mit -6.9 ppb ein wenig größer. Ein Bias lässt sich durch Addition desselben leicht korrigieren.

Interessant sind hingegen die Werte von σ . Dieses ist für die Vergleiche von EMMO zu TCCON und CT-CH₄ zu TCCON nahezu gleich (Tabelle 4.2). Dies bedeutet, dass EMMO und CT-CH₄ nahezu mit derselben Genauigkeit das XCH₄ von TCCON beschreiben können. Diese Erkenntnis geht auch aus Standardabweichungen der Abbildungen 4.2 und 4.4 hervor. Daher können Einflüsse von Quellen und Senken auf TCCON-Messungen nahezu gleichmaßen ansprechend von EMMO und CT-CH₄ wiedergegeben werden. Einzig der Vergleich EMMO zu CT-CH₄ zeigt eine sehr niedriges σ von 4.6 ppb. Dies ist erklärbar, da EMMO auf CT-CH₄ beruht.

Man sieht also, dass EMMO das XCH_4 von TCCON recht gut simuliert, aber wohl den Jahresgang nicht an allen Stationen gut beschreiben kann, was an den niedrigen Korrelationen zu sehen ist.

5 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde das empirisches Methan (CH₄) Modell (EMMO) vorgestellt, welches gestattet, säulengemittelte molare Mischungsverhältnisse von Methan in trockener Luft (XCH₄), als Funktion des Breitengrades und der Zeit, zu berechnen. EMMO erlaubt es, XCH₄ mittels einer Gleichung, die durch 21 Parameter beschrieben wird, für den Zeitraum vom 1.01.2002 bis zum 31.12.2010 zu modellieren. EMMO besitzt eine Gleichung, die den Jahresgang und die globale Verteilung von XCH₄ beschreibt. Die Parameter wurden mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Weiterhin wurde EMMO gegen TCCON validiert.

Für den Anpassungsvorgang wurde das XCH₄ aus CarbonTracker-CH₄ 2010 (CT-CH₄) verwendet. Zu der Berechnung des XCH₄ aus CT-CH₄ musste beispielsweise beachtet werden, dass der Druck in CT-CH₄ auf atmosphärischen Schichten (*Layer*) gegeben ist. Für die Anpassung wurde der Pazifischen Transects von CT-CH₄ genutzt, welcher für 150°W und 12:00 Uhr UTC berechnet wurde. Beim Vergleich des Pazifischen Transects von EMMO mit dem von CT-CH₄ zeigte die Differenz eine kleine Standardabweichung von 4.34 ppb. Beim Vergleich mit dem globalen XCH₄ von CT-CH₄ ließ sich feststellen, dass EMMO die räumlichen und zeitlichen XCH₄ Verteilungen grob modelliert. Es wurden exemplarisch vier Monatsmittel des Jahres 2009 für EMMO und CT-CH₄ verglichen. Mit Ausnahme der lokalen Erhöhungen des XCH₄ zeigte sich, dass EMMO typischerweise Abweichungen zu CT-CH₄ von weniger als ± 20 ppb besitzt. In der Nähe lokaler Erhöhungen und können jedoch Abweichunge von -40 ppb bis -80 ppb auftreten. Für alle vier Monatsmittel ließ sich eine mittlere Standardabweichung von 14.1 ppb bestimmen.

Um EMMO gegen unabhängige Daten zu validieren, wurde ein Vergleich mit TCCON-XCH₄ durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass EMMO das XCH₄ an den behandelten TCCON-Stationen mit einer mittleren Differenz von -13.9 ppb, einer Standardabweichung von 13.7 ppb und einer Korrelation von 0.90 wiedergibt. Beim Vergleich mit dem XCH₄ einzelner Stationen zeigte sich, dass EMMO zu TCCON ein gemittelten Bias der Differenz -11.7 ppb zeigt und eine mittlere Standardabweichung von 11.1 ppb. EMMO zeigt mit TCCON eine nicht allzu hohe mittlere Korrelation von 0.44. Die mittlere Korrelation lässt sich dadurch erklären, dass die Korrelationen, welche sich beim Vergleich von EMMO mit TCCON ergaben, an einzelnen Stationen wie Wollongong mit 0.02 und Tsukuba mit 0.11 sehr niedrig sind. Zudem wiesen EMMO mit TCCON sowie CT-CH₄ mit TCCON nahezu denselben Station-to-Station-Bias (Standardabweichung aller mittleren Differenzen) mit 8.2 bzw. 8.1 ppb auf.

6 Ausblick

Insgesamt lässt sich sagen, dass EMMO als a-priori Wissen für Satellitendatenauswertungen von XCH_4 verwendet werden kann. Dazu muss man noch ein Profil des CH_4 von EMMO bestimmen, um es für Profilretrieval zu verwenden. Beispielsweise könnte man ein Profil nach Reuter et al. [2012] aus 10 atmosphärischen Schichten erstellen. In der Publikation von Reuter et al. [2012] wurde ein Druckprofil von SECM für CO₂ für 10 atmosphärische Schichten erstellt. Für das CO₂ wird eine vereinfachte Atmosphäre bestehend aus Troposphäre und Stratosphäre angenommen, die ab einem festgelegten Drucklevel getrennt sind. So wird angenommen, dass die CO₂-Konzentrationen in der Stratosphäre mit abnehmendem Druck linear abnehmen. In der Troposphäre wird auch ein lineares Verhalten des CO_2 angenommen, welches vom Jahresgang abhängt. Für CH_4 wird man solch einfache Annahmen nicht treffen können. Sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre wird CH_4 abgebaut. Weiterhin hat CH_4 lokale Quellen an der Erdoberfläche, wodurch CH₄-Konzentrationen in Oberflächennähe zunehmen können. So wäre die Annahme einer vereinfachten Atmosphäre für EMMO angebracht. In der Stratosphäre könnte man für CH_4 auch einen linear abnehmenden Trend ansetzen. In der Troposphäre sollte man aber keinen linearen Trend wegen der komplexen Abbaureaktion wählen. Den Jahresgang von CH₄ könnte man berücksichtigen. Zudem würden sich vielleicht mehr atmosphärische Schichten zur Auswertung anbieten aufgrund des Einflusses der Quellen und Senken von CH₄.

Wie schon erwähnt, ist EMMO nur für den Zeitraum vom 1.01.2002 bis zum 31.12.2010 gültig. Um EMMO für zukünftige Studien zu nutzen, müssen Veränderungen an der Modellgleichung vorgenommen werden. Wenn man beispielsweise annimmt, dass das CH_4 nach 2010 linear steigt, wird der Ausdruck $a_{15}t \cdot \sin(a_{16}t + a_{17})$ nur für den Zeitraum 1.01.2002 bis zum 31.12.2010 seine Gültigkeit behalten. Statt eines linearen Terms $a_1 \cdot t$ könnte man auch einen Ausdruck wie $a_1 \cdot t^3$ wählen, bei welchem die genannte Beschränkung für den Term $a_{15}t \cdot \sin(a_{16}t + a_{17})$ beibehalten wird. Mittels einer Funktion wie t^3 wird wahrscheinlich das nahezu konstante XCH_4 von 2002 bis Mitte 2006 gut simuliert. Es müsste untersucht werden, ob sich für zukünftige Studien ein linearer oder kubischer Term besser eignet. Auf kurzen Zeitskalen kann ein linearen Term gewählt werden. Für EMMO eignete sich ein linearer Term gut, da der Anstieg des XCH₄ nur für den kurzen Zeitraum von 2007 bis Ende 2010 vorhanden ist. Zukünftig könnte sich ein kubischer Term bewähren, da die Konzentrationen atmosphärischen CH_4 nach 2010 deutlich gestiegen sind. Dazu lassen sich beispielsweise Zeitserien des atmosphärischen CH₄ an der Mauna Loa Station von NOAA ESRL anschauen (http://www.esrl.noaa.gov/qmd/dv/iadv/qraph.php?code =MLO&program = ccgg&type = ts). So nahm dort das CH₄ von 2006 bis Ende 2010 um etwa 20 ppb zu. Hingegen von 2011 bis jetzt (Oktober 2014) ist das XCH₄ um 40 ppb auf 1850 ppb gestiegen. Man sollte bedenken, dass die Mauna Loa Station sich in einer Region mit wenigen lokalen Quellen und Senken befindet. Folglich werden in anderen Gebieten der Erde, welche höheren CH₄-Konzentrationen durch Reiskultivation, Viehzucht und Mülldeponien ausgesetzt sind, erhöhte CH₄-Konzentrationen gegeben sein.

7 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Bachelorarbeit im Hinblick auf die Auswahl von Literaturmaterial, Korrekturlesungen und Anregungen zur Auswahl der Themen unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt neben meinem Betreuer Dr. Maximilian Reuter noch Herrn Dr. Heymann, Herrn Hilker, Herrn Dr. Schneising, Herrn Dr. Buchwitz und Herrn Dr. Krings, die mich tatkräftig unterstützt haben. Weiterhin möchte ich Prof. Dr. John P. Burrows und Dr. Annette Ladstätter-Weißenmayer danken, dass sie sich als Gutachter für meine Arbeit bereiterklärt haben.

Weiterhin möchte Ich Herrn Dr. Meyer und Frau Sabine Brandenberg danken, da sie sich die Zeit genommen haben, meine Bachelorarbeit zu lesen und mir Korrekturvorschläge gegeben haben. Meinen Eltern möchte auch für Ihre tatkräftige Unterstützung Danke sagen.

Daneben gilt mein Dank dem CarbonTracker-CH₄ Team von NOAA ESRL, Boulder, Colorado, USA, dafür, dass ich deren Daten für mein Modell nutzen durfte (http: //www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker - ch4/). Speziell möchte ich Lori Bruhwiler danken, dass die fehlerhafte Datei vom 31.12.2005 von CarbonTracker-CH₄ 2010 korrigiert wurde. Des Weiteren gilt mein Dank auch dem Team des TCCON-Datenarchivs, unterhalten vom California Institute of Technology (Caltech) dafür, dass ich deren Daten verwenden durfte (http://tccon.ipac.caltech.edu/). Zudem danke ich auch allen Gruppen, die für die Unterhaltung der TCCON-Stationen und die Generierung der Daten zuständig sind.

Für die Bearbeitung der in Kapitel 3 und 4 vorhandenen Problemstellungen wurde die Software PYTHON (https: //www.python.org/) verwendet. Zusätzlich wurden die Erweiterungspakete NumPy und SciPy [van der Walt et al., 2011, Oliphant, 2007, Millman and Aivazis, 2011], Matplotlib [Hunter, 2007] und Matplotlib Basemap (http: //matplotlib.org/basemap/) genutzt.

Anhang

Es ist eine Routine gezeigt, mit welcher EMMO eingelesen werden kann. Zudem sind für willkürliche gewählte Breitengrade und Zeiten XCH_4 -Werte angegeben.

ttfamily import numpy as np

Die 21 Parameter von EMMO

a=np.array([1.72003513e+03,	1.52644010e+00,	6.16237789e+01,
$3.68776907 \mathrm{e}{-02}$,	-2.30720336e-01,	1.46553535e+00,
2.64742588e+00,	-1.03374059e+01,	4.83371245e+00,
4.09073134e - 02,	2.16907609e+00,	$-3.44427462 \mathrm{e}{-}01$,
3.11609547e+00,	-1.94777285e+00,	$1.49113099 \mathrm{e}-02$,
-1.11359123e+00,	$9.03135762 \mathrm{e}{-01},$	3.54205721e+00,
-3.04588471e+01,	3.45133096e-02,	-8.72717676e - 01])

```
def X(t, 1):
    """XCH4-Funktion von EMMO, welche vom Breitengrad 1 und von der Zeit t
       abhaengt.Zudem besitzt sie einen Jahresgang S(t, l) mit
       halb- und ganzjachriger Periode. Die 21 Koeffizienten von EMMO
       wurden mittels der Methode der kleinsten Quadrate angepasst.
    ,, ,, ,,
    def S(t, 1):
         return (a[5]*np.tanh(a[6]*l+a[7])+a[8])*np.sin(2*np.pi*t+a[9]*l) +
           (a[10]*np.tanh(a[11]*l+a[12])+a[13])*np.sin(4*np.pi*t + a[14]*l)
    return a[0]+a[1]*t+a[2]*np.tanh(a[3]*l+a[4])+S(t,1)+
         a[15] * t * np. sin(a[16] * t+a[17]) + a[18] * np. sin(a[19] * t+a[20])
Definieren eines Zeit-Arrays vom 1.01.2002 bis zum 31.12.2010 in Tagen
und eines Breitengrad-Arrays von -88N bis 88N
t=np.arange(0, 3287, 1)/365.25
l = np. arange(-88, 89, 4)
t1=t[100:110]
print (X(t1, 1[10]))
[1678.00911073]
                   1678.06507407
                                    1678.12117398
                                                     1678.17740207
1678.23375004
  1678.29020961
                   1678.34677253
                                    1678.40343059
                                                     1678.4601756
1678.51699937]
t_2 = t [1950:1960]
print(X(t2, 1[40]))
\begin{bmatrix} 1750.68966959 \end{bmatrix}
                   1750.65346908
                                    1750.61517001
                                                     1750.57486443
1750.53264831
                                    1750.39555322
                                                     1750.34672934
  1750.48862147
                   1750.44288742
1750.29652954]
11=1[37:43]
print (X(t[1800], 11))
\begin{bmatrix} 1758.83704011 \end{bmatrix}
                  1757.40761453 \quad 1756.25912392 \quad 1755.4581222
1755.05512679
  1755.08584815]
12 = 1 [20:25]
print (X(t[2500],12))
\begin{bmatrix} 1727.36199354 & 1733.01703355 \end{bmatrix}
                                   1739.10293671 1744.17026632
1751.14726599]
```

```
61
```

8 Literaturverzeichnis

Literatur

- P. Bergamaschi, M. Krol, F. Dentener, A. Vermeulen, F. Meinhardt, R. Graul, M. Ramonet, W. Peters, and E. J. Dlugokencky. Inverse modelling of national and European CH₄ emissions using the atmospheric zoom model TM5. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(9):2431–2460, 2005. ISSN 1680-7316.
- P. Bergamaschi, C. Frankenberg, J. F. Meirink, M. Krol, M. G. Villani, S. Houweling, F. Dentener, E. J. Dlugokencky, J. B. Miller, L. V. Gatti, A. Engel, and Levin Ingeborg. Inverse modeling of global and regional CH₄ emissions using SCIAMACHY satellite retrievals. J. Geophys. Res., 114:D22301, 2009. doi: 10.1029/2009JD012287.
- H. Bovensmann, J. P. Burrows, M. Buchwitz, J. Frerick, S. Noël, V. V. Rozanov, K. V. Chance, and A. Goede. SCIAMACHY – Mission objectives and measurement modes. J. Atmos. Sci., 56:127–150, 1999.
- L. Bruhwiler, E. Dlugokencky, K. Masarie, M. Ishizawa, A. Andrews, J. Miller, C. Sweeney, P. Tans, and D. Worthy. CarbonTracker-CH₄: an assimilation system for estimating emissions of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(16):8269–8293, 2014. doi: 10.5194/acp-14-8269-2014. URL http://www.atmos-chem-phys.net/14/8269/2014/.
- M. Buchwitz, R. de Beek, J. P. Burrows, H. Bovensmann, T. Warneke, J. Notholt, J. F. Meirink, A. P. H. Goede, P. Bergamaschi, S. Körner, M. Heimann, and A. Schulz. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(4):941–962, 2005. ISSN 1680-7316.
- J. P. Burrows, E. Hölzle, A. P. H. Goede, H. Visser, and W. Fricke. SCIAMACHY Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography. Acta Astronautica, 35(7): 445–451, 1995.
- A. Butz, O. P. Hasekamp, C. Frankenberg, J. Vidot, and I. Aben. CH₄ retrievals from spacebased solar backscatter measurements: Performance evaluation against simulated aerosol aund cirrus loades scenes. J. Geophys. Res., 115:D24302, 2010. doi: 10.1029/2010JD014514.
- A. Butz, S. Guerlet, O. Hasekamp, D. Schepers, A. Galli, I. Aben, C. Frankenberg, J.-M. Hartmann, H. Tran, A. Kuze, G. Keppel-Aleks, G. Toon, D. Wunch, P. Wennberg, N. Deutscher, D. Griffith, R. Macatangay, J. Messerschmidt, J. Notholt, and T. Warneke. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from gosat. *Geophys. Res. Lett.*, 38:L14812, 2011. doi: 10.1029/2011GL047888.
- A. J. Cogan, H. Bösch, R. J. Parker, L. Feng, P. I. Palmer, J.-F. L. Blavier, N. M. Deutscher, R. Macatangay, J. Norholt, C. Roehl, T. Warneke, and D. Wunch. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the greenhouse gases observing satellite GOSAT: Comparision with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations. J. Geophys. Res., 117:D21301, 2012. doi: 10.1029/2012JD018087.

- E. J. Dlugokencky, L. Bruhwiler, J. W. C. White, L. K. Emmons, P. C. Novelli, S. A. Montzka, K. A. Masarie, P. M. Lang, A. M. Crotwell, J. B. Miller, and L. V. Gatti. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. *Geophy. Res. Lett.*, 36: L18803, 2009. doi: doi:10.1029/2009GL039780.
- C. Frankenberg, J. F. Meirink, M. van Weele, U. Platt, and T. Wagner. Assessing methane emissions from global spaceborne observations. *Science*, 308(5724):1010–1014, 2005a. doi: 10.1126/science.1106644.
- C. Frankenberg, U. Platt, and T. Wagner. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: Model studies for CH_4 and CO_2 retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT. Atmos. Chem. Phys., 5 (1):9–22, 2005b. ISSN 1680-7316.
- C. Frankenberg, J. F. Meirink, P. Bergamaschi, A. P. H. Goede, M. Heimann, S. Körner, U. Platt, M. van Weele, and T. Wagner. Satellite chartography of atmospheric methane from SCIAMACHY onboard ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004. J. Geophys. Res., 111:D07303, 2006. doi: 10.1029/2005JD006235.
- C. Frankenberg, P. Bergamaschi, A. Butz, S. Houweling, J. F. Meirink, J. Notholt, A. K. Petersen, H. Schrijver, T. Warneke, and I. Aben. Tropical methane emissions: A revised view from SCIAMACHY onboard ENVISAT. *Geophys. Res. Lett.*, 35:L15811, 2008a. doi: 10.1029/2008GL034300.
- C. Frankenberg, T. Warneke, A. Butz, I. Aben, F. Hase, P. Spietz, and L. R. Brown. Pressure broadening in the $2\nu_3$ band of methane and its implication on atmospheric retrievals. *Atmos. Chem. Phys.*, 8(17):5061–5075, 2008b. ISSN 1680-7316.
- C. Frankenberg, I. Aben, P. Bergamaschi, E. J. Dlugokencky, R. van Hees, S. Houweling, P. van der Meer, R. Snel, and P. Tol. Global column-averaged methane mixing ratios from 2003 to 2009 as derived from sciamachy: Trends and variability. J. Geophys. Res., 116: D04302, 2011. doi: 10.1029/2010JD014849.
- L. Giglio, G. R. van der Werf, J. T. Randerson, and P. Kasibhatla. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 6:957–974, 2006. doi: 10.5194/acp-6-957-2006.
- M. Gottwald and H. Bovensmann, editors. SCIAMACHY Exploring the Changing Earth's Atmosphere. Springer, 2011.
- S. Guerlet, A. Butz, D. Schepers, S. Basu, O. P. Hasekamp, A. Kuze, T. Yokota, J.F. Blavier, N. M. Deutscher, D. W. T. Griffith, F. Hase, E. Kyro, I. Morino, V. Sherlock, R. Sussmann, A. Galli, and I. Aben. Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO₂ from gosat shortwave infrared measurements. J. Geophys. Res., 118:4887–4905, 2013. doi: 10.1002/jgrd.50332.
- O. Hasekamp, S. Guerlet, and A. Butz. Algorithm Theoretical Basis Document Version 2 for the RemoTeC XCO₂ and XCH₄ Products – ESA Climate Change Initiative (CCI) for the Essential Climate Variable (ECV). Technical report, Netherlands Institude for Space Research(SRON), Karlsruhe Institute for Technology(KIT), Laboratoire de Meteorologie Dynamique(LMD), 2013.

- J. Heymann, O. Schneising, M. Reuter, M Buchwitz, V. Rozanov, V. A. Velazco, H. Bovensmann, and J. P. Burrows. SCIAMACHY WFM-DOAS XCO₂: comparison with Carbon-Tracker XCO₂ focusing on aerosols and thin clouds. *Atmos. Meas. Tech.*, 5:1935–1952, 2012a. doi: 10.5194/amt-5-1935-2012.
- J. Heymann, H. Bovensmann, M. Buchwitz, J. P. Burrows, N. M. Deutscher, J. Notholt, M. Rettinger, M. Reuter, O. Schneising, R. Sussmann, and T. Warneke. SCIAMACHY WFM-DOAS XCO₂: reduction of scattering related errors. *Atmos. Meas. Tech.*, 5:2375– 2390, 2012b. doi: 10.5194/amt-5-2375-2012.
- S. Houweling, T. Kaminski, F. Dentener, J. Lelieveld, and M. Heimann. Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model. J. Geophys. Res., 104(D21):26137–26160, 1999.
- J. D. Hunter. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering, 9:90–95, 2007. doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- 2013 IPCC. 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, 2013.
- M. Z. Jacobsen. Correction to "Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming". J. Geophys. Res., 110:D14105, 2005. doi: 10.1029/2005JD005888.
- J. O. Kaplan. Wetlands at the Last Glacial Maximum: Distribution and methane emissions. Geophy. Res. Lett., 29:1079, 2002. doi: 10.1029/2001GL013366.
- S. Kirschke, P. Bousquet, P. Ciais, M. Saunois, J. G. Canadell, E. J. Dlugokencky, P. Bergamaschi, Bergmann D., D. R. Blake, L. Bruhwiler, P. Cameron-Smith, S. Castaldi, F. Chevallier, L. Feng, A. Fraser, M. Heimann, E. L. Hodson, S. Houweling, B. Josse, P. J. Fraser, P. B. Krummel, J.-F. Lamarque, R. L. Langenfelds, C. Le Quéré, N. Vaishali, S. O'Doherty, P. I. Palmer, I. Pison, D. Plummer, B. Poulter, R. G. Prinn, M. Rigby, B. Ringeval, M. Santini, M. Schmidt, D. T. Shindell, I. J. Simpson, R. Spahni, L. P. Steele, S. A. Strode, K. Sudo, S. Szopa, G. R. van der Werf, A. Voulgarakis, M. van Weele, R. F. Weiss, J. E. Williams, and G. Zeng. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6: 813–823, 2013. doi: 10.1038/ngeo1955.
- M. Krol, S. Houweling, B. Bregman, M. van den Broek, A. Segers, P. van Velthoven, W. Peters, F. Dentener, and P. Bergamaschi. The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(2):417–432, 2005. ISSN 1680-7316.
- A. Kuze, H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamazaki. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Appl. Opt.*, 48(35):6716–6733, 2009.
- J. F. Meirink, H. J. Eskes, and A. P. H. Goede. Sensitivity analysis of methane emissions derived from SCIAMACHY observations through inverse modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, 6(5):1275–1292, 2006. ISSN 1680-7316.

- M. Meyer. Siganalverarbeitung Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter. Springer Vieweg, 7.Auflage edition, 2014. doi: 10.1007/978-3-658-02612-7.
- K. J. Millman and M. Aivazis. Python for Scientists and Engineers. Computing in Science & Engineering, 13:9–12, 2011. doi: 10.1109/MCSE.2011.36.
- T. E. Oliphant. Python for Scientific Computing. Computing in Science & Engineering, 9: 10–20, 2007. doi: 10.1109/MCSE.2007.58.
- R. Parker, H. Boesch, A. Cogan, A. Fraser, L. Feng, P. I. Palmer, J. Messerschmidt, N. Deutscher, D. W. T. Griffith, J. Notholt, P. O. Wennberg, and D. Wunch. Methane observation from Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations. *Geophy. Res. Lett.*, 38:L15807, 2011. doi: 10.1029/2011GL047871.
- R. Parker, H. Boesch, and A. Cogan. Algorithm Theoretical Basis Document Version 2 The University of Leicester Full-Physics Retrieval Algorithm for the retrieval of XCO₂ and XCH₄ – ESA Climate Change Initiative (CCI) for the Essential Climate Variable (ECV). Technical report, University of Leicester, 2013.
- Wouter Peters, Andrew R. Jacobson, Colm Sweeney, Arlyn E. Andrews, Thomas J. Conway, Kenneth Masarie, John B. Miller, Lori M. P. Bruhwiler, Gabrielle Petron, Adam I. Hirsch, Douglas E. J. Worthy, Guido R. van der Werf, James T. Randerson, Paul O. Wennberg, Maarten C. Krol, and Pieter P. Tans. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104(48):18925– 18930, NOV 27 2007. ISSN 0027-8424. doi: 10.1073/pnas.0708986104.
- M. J. Prather, C. D. Holmes, and J. Hsu. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophys. Res. Lett.*, 39: L09803, 2012. doi: 10.1029/2012GL051440.
- M. Reuter, M Buchwitz, O. Schneising, J. Heymann, H. Bovensmann, and J. P. Burrows. A method for improved SCIAMACHY CO₂ retrieval in the presence of optically thin clouds. *Atmos. Meas. Tech.*, 3:209–232, 2010. URL www.atmos-meas-tech.net/3/209/2010/.
- M. Reuter, H. Bovensmann, M Buchwitz, J. P. Burrows, B. J. Connor, N. M. Deutscher, D. W. T. Griffith, J. Heymann, G. Keppel-Aleks, J. Messerschmidt, J. Notholt, C. Petri, J. Robinson, O. Schneising, V. Sherlock, V. Velazco, T. Warneke, P. O. Wennberg, and D. Wunch. 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, 2011. doi: 10.1029/2010JD015047.
- M. Reuter, M Buchwitz, O. Schneising, F. Hase, J. Heymann, S. Guerlet, A. J. Cogan, H. Bovensmann, and J. P. Burrows. A simple empirical model estimating atmospheric CO₂ background concentrations. *Atmos. Meas. Tech.*, 5:1349–1357, 2012. doi: 10.5194/amt-5-1349-2012.
- M. Reuter, H. Bovensmann, M. Buchwitz, J. P. Burrows, J. Heymann, M. Hilker, and O. Schneising. Algorithm Theoretical Basis Document Version 2 – The Bremen Optimal Estimation DOAS (BESD) algorithm for the retrieval of XCO₂ – ESA Climate Change Initiative (CCI) for the Essential Climate Variable (ECV). Technical report, University of Bremen, 2013.

- M. Rigby, R. G. Prinn, P. J. Francey, P. G. Simmonds, R. L. Langenfelds, J. Huang, D. M. Cunnold, L. P. Steele, P. B. Krummel, R. F. Weiss, S. O'Doherty, P. K. Salameh, H. J. Wang, C. M. Harth, J. Muehle, and L. W. Porter. Renewed growth of atmospheric methane. *Geophy. Res. Lett.*, 35:L22805, 2008. doi: 10.1029/2008GL036037.
- W. Roedel and T. Wagner. *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 4.Auflage edition, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-15729-5.
- O. Schneising. Algorithm Theoretical Basis Document Version 2 SCIAMACHY WFM-DOAS (WFMD) XCO₂ and XCH₄ – ESA Climate Change Initiative (CCI) for the Essential Climate Variable (ECV). Technical report, University of Bremen, 2013.
- O. Schneising, M. Buchwitz, M. Reuter, J. Heymann, H. Bovensmann, and J. P. Burrows. Long-term analysis of carbon dioxide and methane column-averaged mole fractions retrieved from SCIAMACHY. Atmos. Chem. Phys., 11:2863–2880, 2011. doi: 10.5194/acp-11-2863-2011.
- I. J. Simpson, M. P. Sulbaek Andersen, S. Meinardi, L. Bruhwiler, N. J. Blake, H. Detlev, F. S. Rowland, and D. R. Blake. Long-term decline of global atmospheric ethane concentrations and implications for methane. *Nature*, 488:490–494, 2012. doi: 10.1038/nature11342.
- S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, editors. Climate change 2007: The physical science basis, Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, 2007.
- S. van der Walt, S. C. Colbert, and G. Varoquaux. The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation. *Computing in Science & Engineering*, 13:22–30, 2011. doi: 10.1109/MCSE.2011.37.
- G. R. van der Werf, J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla, and A. F. Arellano Jr. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. Atmos. Chem. Phys., 6:3423–3441, 2006. doi: 10.5194/acp-6-3423-2006.
- R. A. Washenfelder, G. C. Toon, J.-F. Blavier, Z. Yang, N. T. Allen, P. O. Wennberg, S. A. Vay, D. M. Matross, and B. C. Daube. Carbon dioxide column abundances at the Wisconsin tall tower site. J. Geophys. Res., 111:D22305, 2006. doi: 10.1029/2006JD007154.
- D. Wunch, G. C. Toon, J.F.L. Blavier, R. A. Washenfelder, J. Notholt, B. J. Connor, D. W. T. Griffith, V. Sherlock, and P. O. Wennberg. The Total Carbon Column Observing Network. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369:2087–2112, 2011. doi: 10.1098/rsta.2010.0240.
- Y. Yoshida, Y. Ota, N. Eguchi, N. Kikuchi, K. Nobuta, H. Tran, I. Morino, and T. Yokota. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmos. Meas. Tech.*, 4: 717–734, 2011. doi: 10.5194/amt-4-717-2011.
- Y. Yoshida, N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Saeki, N. Schutgens, G. C. Toon, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, D. W. T. Griffith, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, J. Robinson, V. Sherlock, B. Connor, F. Hase, S. Dohe, and T. Yokota. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and

XCH₄ and their validation using TCCON data. Atmos. Meas. Tech., 6:1533–1547, 2013. doi: 10.5194/amt-6-1533-2013.