

# **Bestimmung des zeitabhängigen CO<sub>2</sub>- Gasaustauschs über dem globalen eisfreien Ozean unter Verwendung von Winddaten aus satellitengestützten Messungen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften

im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg

vorgelegt von

Iris Hinrichs

aus

Hannover

Hamburg

2013

Als Dissertation angenommen vom Fachbereich Geowissenschaften der Universität  
Hamburg aufgrund der Gutachten von

**Prof. Dr. Detlef Stammer**

und

**Dr. Martin Gade**

Hamburg, den 28. Januar 2014

Prof. Dr. Christian Betzler

Leiter des Fachbereichs Geowissenschaften

korrigierte Fassung



## Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden verbesserte und untereinander vergleichbare Gasaustauschgeschwindigkeiten  $k$  basierend auf Windgeschwindigkeiten  $u_{10}$  aus fünf Satellitenmissionen abgeleitet. Die resultierende Zeitreihe globaler Felder der für den  $\text{CO}_2$ -Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre wichtigen Geschwindigkeit  $k$  liegt über einen Zeitraum von mehr als 21 Jahren vor. Die Ableitung von  $k$  wird in dieser Arbeit unter Verwendung des Ansatzes von Nägler (2009) für drei verschiedene Abhängigkeiten von der  $u_{10}$  vorgenommen. Die so abgeleiteten Gasaustauschgeschwindigkeiten werden sowohl untereinander als auch mit Ergebnissen anderer Arbeiten verglichen, in denen ebenfalls satellitengestützte Windgeschwindigkeiten verwendet werden, deren Gasaustauschgeschwindigkeiten aber einem Ansatz nach Wanninkhof (1992) folgen. Zusätzlich wird der Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeit auf die  $k$  untersucht. Diese Arbeit stellt einen bedeutenden Unterschied zu der Arbeit anderer in Bezug auf das Verhältnis von Gasaustauschgeschwindigkeiten aus zeitlich unterschiedlich aufgelösten Windgeschwindigkeitsfeldern heraus. Die räumliche Verteilung dieses Verhältnisses unterscheidet sich im Nägler-Ansatz wesentlich von der im Wanninkhof-Ansatz. Dieser Kernpunkt setzt sich in der Abschätzung des  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses fort. Basierend auf klimatologischen Feldern der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz zwischen Ozean und Atmosphäre wird im Nägler-Ansatz der globale jährliche  $\text{CO}_2$ -Nettofluss unter Verwendung von  $k$  aus zeitlich verschieden aufgelösten  $u_{10}$ -Feldern betrachtet und mit dem  $\text{CO}_2$ -Nettofluss aus dem Wanninkhof-Ansatz verglichen. Diese Arbeit zeigt, dass im Nägler-Ansatz der Nettofluss auf Grundlage zeitlich geringer aufgelöster Windgeschwindigkeiten unterschätzt wird; konträr dazu wird er im Wanninkhof-Ansatz überschätzt. Bekannte Unterschiede zwischen einzelnen  $u_{10}$ -Produkten hinsichtlich des Betrags der mittleren globalen Windgeschwindigkeit werden durch den Nägler-Ansatz in Bezug auf  $k$  ausgeglichen. Allerdings wird angenommen, dass die zeitliche Variabilität der Windgeschwindigkeit unterschiedlich gut in den satellitengestützten und den Reanalyse-Winddaten (NCEP) wiedergegeben ist. In dieser Arbeit wird deswegen untersucht, welchen Einfluss die monatliche Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten basierend einerseits auf dem QuikSCAT- und andererseits auf dem NCEP-Windgeschwindigkeitsprodukt auf die monatliche Variabilität des  $\text{CO}_2$ -Flusses hat. Hierzu wird eine Zeitreihe globaler Felder der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz aus einer Modellsimulation verwendet. Die Arbeit zeigt, dass die Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten in Form von Varianz, Kovarianz und Kovariation mit der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz globalen Einfluss mit Ausnahme einiger subtropischer Gebiete hat. Regionen, die in dieser Frage eine Empfindlichkeit gegenüber der Wahl des Windgeschwindigkeitsproduktes zeigen, sind der südliche Ozean und der äquatoriale Pazifik. Für die monatliche Variabilität des global integrierten  $\text{CO}_2$ -Flusses jedoch zeigt sich die Wahl des Windgeschwindigkeitsproduktes unbedeutend. Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der Frage, ob eine Aussage darüber getroffen werden kann, welche der drei verwendeten Gasaustauschgeschwindigkeits-Parametrisierungen den  $\text{CO}_2$ -Austausch im Nordatlantik am besten beschreibt. Hierfür wird entlang von virtuellen Trajektorien in einem Lagrange'schen Ansatz der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck im Wasser simuliert. Dafür werden u.a. die verbesserten Gasaustauschgeschwindigkeiten aus dem ersten Teil der Arbeit verwendet. Die Trajektorien wurden zuvor auf Grundlage von Geschwindigkeitsfeldern eines Ozeanzirkulationsmodells ermittelt. Ein Versuch der Diskriminierung der Gasaustauschgeschwindigkeits-Parametrisierungen wird durch den Vergleich vereinheitlichter Messungen und in dieser Arbeit simulierter Werte des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks vorgenommen. Keine der drei Parametrisierungen zeigt sich in diesem Ansatz und in diesem Gebiet überlegen gegenüber den anderen. Jedoch bietet der hier vorgestellte Ansatz eine wertvolle Grundlage zur Analyse der auf den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck im Wasser wirkenden Prozesse.



## Abstract

This work presents improved and comparable gas transfer velocities based on wind speeds from five satellite missions. The resulting time series of the gas transfer velocities, that are important for the exchange of CO<sub>2</sub> between the ocean and the atmosphere, exists of global fields that comprise a period of more than 21 years and can be continued in the future. The gas transfer velocities presented here are based on an approach by Nägler (2009) and are derived from wind speed by applying three different relationships between gas transfer velocity and wind speed. The derived gas transfer velocities are both compared to each other and to the results by others, who also used satellite-borne wind speeds, but whose gas transfer velocities follow an approach by Wanninkhof (1992). Additionally, the impact of temporal resolution of the wind speed fields on the derived gas transfer velocities is examined. Comparing to the results by others, this work carves out a major difference that refers to the ratio of gas transfer velocities from temporally variably resolved wind speeds. The spatial distribution of this ratio differs markedly in the Nägler approach from that in the Wanninkhof approach. This issue propagates into the estimation of the CO<sub>2</sub> net flux. Based on climatological fields of the difference in CO<sub>2</sub> partial pressure between the atmosphere and the ocean by Takahashi et al. (2009a,b), the CO<sub>2</sub> net flux estimated in the Nägler approach through application of gas transfer velocities from temporally variably resolved wind speed fields is considered and compared to the CO<sub>2</sub> net flux in the Wanninkhof approach. This work shows that the CO<sub>2</sub> net flux based on temporally less resolved wind speed fields is underestimated in the Nägler approach; contrary to that, it is overestimated in the Wanninkhof approach. Known differences concerning the magnitude of the global mean wind speed are balanced by the Nägler approach with respect to the gas transfer velocities. It is assumed, however, that the temporal variability of the wind speed is variably well represented in the satellite-borne and the reanalysis wind speed (NCEP). Therefore, this work analyzes globally and regionally the impact of the monthly variability of the gas transfer coefficient based on, on the one hand, the QuikSCAT- and, on the other hand, the NCEP-wind speed product on the monthly variability of the CO<sub>2</sub> flux. For this purpose, a time series of global fields of CO<sub>2</sub> partial pressure from a model simulation is applied. This work shows that the variability of the gas transfer coefficient in terms of variance, covariance and co-variation with the difference in CO<sub>2</sub> partial pressure has a global influence with the exception of a few regions in the subtropics. Regions that show a sensitivity to the choice of the wind speed product with regard to the variability question are the Southern Ocean and the equatorial Pacific. Concerning the monthly variability of the globally integrated CO<sub>2</sub> flux, the choice of the wind speed product is minor. The second part of this work addresses the question if a statement can be made about which of the three applied gas transfer velocity parametrizations better describes the CO<sub>2</sub> flux in the North Atlantic. For this purpose, the oceanic CO<sub>2</sub> partial pressure is simulated along virtual trajectories in a Lagrangian approach. The improved gas transfer velocities described in the first part of this work are applied for this. Prior to this, the trajectories were determined on the basis of velocity fields from an ocean circulation model. An attempt to discriminate the gas transfer velocity parametrizations is made by comparing uniform measurements and simulated values of the CO<sub>2</sub> partial pressure. Yet, none of the three parametrization shows to be superior to the others in this approach and in this region. The Lagrangian approach presented here, however, yields the valuable basis for the analysis of processes influencing the CO<sub>2</sub> partial pressure in water.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Hintergrund</b>	<b>9</b>
2.1. Der Gasaustausch . . . . .	9
2.2. Partialdruckdifferenz von Kohlenstoffdioxid zwischen Ozean und Atmosphäre . . . . .	12
2.3. Die Gasaustauschgeschwindigkeit als Funktion der Windgeschwindigkeit . . . . .	15
2.4. Die Ansätze . . . . .	18
2.5. Windgeschwindigkeiten als Grundlage der Gasaustauschgeschwindigkeit . . . . .	22
<b>3. Zeitreihe verbesserter Gasaustauschgeschwindigkeiten</b>	<b>25</b>
3.1. Daten und Methoden . . . . .	26
3.2. Ergebnisse . . . . .	40
3.3. Abschließende Diskussion . . . . .	70
<b>4. Diskriminierung der Gasaustauschparametrisierung im Nordatlantik</b>	<b>77</b>
4.1. Daten und Methoden . . . . .	78
4.2. Ergebnisse . . . . .	87
4.3. Abschließende Diskussion . . . . .	100
<b>5. Erkenntnisgewinn und Ausblick</b>	<b>103</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>109</b>
A.1. Rayleigh-Verteilung . . . . .	109
A.2. Umrechnung von $\text{CO}_2$ -Partialdruck in $\text{CO}_2$ -Fugazität . . . . .	109
A.3. Alkalinität im Nordatlantik . . . . .	110
A.4. csys.m . . . . .	110
<b>B. Danksagung</b>	<b>117</b>

<b>C. Hilfsmittel</b>	<b>119</b>
<b>D. Eidesstattliche Versicherung</b>	<b>121</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>139</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>141</b>





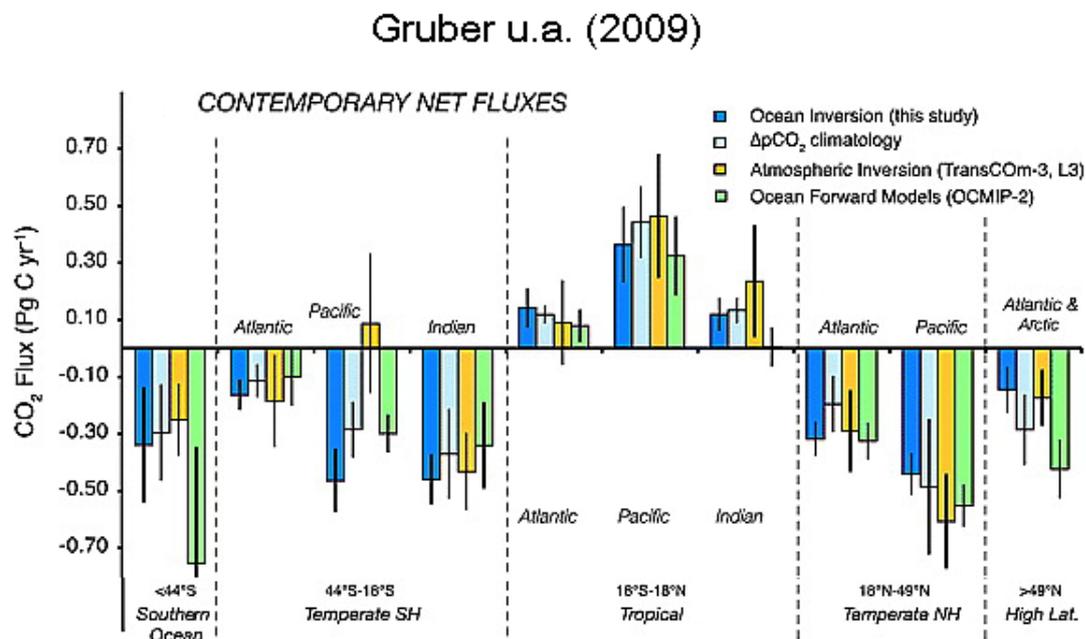
# 1. Einleitung

Die Reservoirs Ozean und Atmosphäre sind wichtige Komponenten der globalen Gaskreisläufe und durch den Gasaustausch diesbezüglich miteinander verbunden. Klimarelevante Gase wie z.B Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) werden so zwischen den beiden globalen Speichern ausgetauscht.  $\text{CO}_2$  ist in der Atmosphäre treibhauseffektiv und somit bedeutsam für die Wärmebilanz und das Leben im Erdsystem. Menschliche Aktivitäten wie veränderte Landnutzung, Zementproduktion und besonders das verstärkte Verbrennen fossiler Brennstoffe seit Beginn der industriellen Revolution haben den  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre erhöht und damit die Gleichgewichte im globalen Kohlenstoffkreislauf erheblich verändert: In vorindustrieller Zeit war der globale Ozean eine Quelle für  $\text{CO}_2$ ; er gab also mehr Kohlenstoff in Form von  $\text{CO}_2$  ab, als er aus der Atmosphäre aufnahm; heutzutage übersteigt die ozeanische Aufnahme von atmosphärischem Kohlenstoff die Abgabe und der heutige Ozean ist eine Senke für anthropogenes  $\text{CO}_2$  (Denman u. a., 2007)(siehe dazu Abbildung 1.1 zum globalen Kohlenstoffkreislauf im Wandel von vorindustrieller zu heutiger Zeit). In einem Zeitraum zwischen ~1800-1994 hat der Ozean  $118 \pm 19$  Petagramm Kohlenstoff aufgenommen, das entspricht 50% der anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe und durch Zementproduktion in diesem Zeitraum (Sabine u. a., 2004). Der terrestrische Speicher hingegen (in Abbildung 1.1 als „Vegetation, Erdboden & Detritus“ bezeichnet) erscheint in diesem Zeitraum als Nettoquelle für atmosphärisches  $\text{CO}_2$ : Sabine u. a. (2004) geben an, dass  $39 \pm 28$  Petagramm Kohlenstoff in dem oben genannten Zeitraum vom terrestrischen Speicher abgegeben wurden. Damit kommt dem Ozean als Senke für anthropogenes atmosphärisches  $\text{CO}_2$  eine bedeutende Rolle zu.

Aufgrund des nach wie vor steigenden  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre und den damit verbundenen Folgen für das Erdsystem, bleibt es eine wissenschaftliche Herausforderung und eine global-gesellschaftliche Notwendigkeit, die ozeanische  $\text{CO}_2$ -Senke in ihren Einzelheiten zu verstehen und zu beschreiben.

Dem Gasaustausch als der Prozess, der Ozean und Atmosphäre im Kohlenstoffkreislauf miteinander verbindet, kommt damit eine große Bedeutung zu. Ozean und Atmosphäre tauschen Gas aus, sobald ein Unterschied im Partialdruck herrscht.





**Abbildung 1.2.:** Abgeschätzte regionale CO<sub>2</sub>-Jahresnettoflüsse verschiedener Methoden (Gruber u. a. (2009))

beschriebenen Methoden resultierenden Ergebnisse, die Übereinstimmungen im CO<sub>2</sub>-Fluss zeigen, aber regional auch unterschiedlich stark voneinander abweichen. Jede dieser beiden Methoden enthält als Baustein den Gasaustauschkoeffizienten. Die Quantifizierung der ozeanischen CO<sub>2</sub>-Senke wird deswegen umso genauer, je besser die Abschätzung des Gasaustauschkoeffizienten gelingt.

Da der Gasaustauschkoeffizient nicht direkt gemessen werden kann, muss er parametrisiert werden. Zur Herleitung des Gasaustauschkoeffizienten bedarf es daher zweier grundlegender Elemente: zum einen der Parameter, von dem der Gasaustauschkoeffizient abgeleitet wird und zum anderen die Parametrisierung, also der mathematische Zusammenhang, der den Gasaustauschkoeffizienten und den Parameter in Beziehung zueinander setzt. Weil sich der globale CO<sub>2</sub>-Nettofluss aus der Summe regionaler Quellen und Senken unterschiedlicher Größenordnung ergibt, wie sie in Abbildung 1.2 gezeigt sind, müssen Einflüsse des Grundlagen-Parameters und der Parametrisierung global und regional betrachtet werden. Üblicherweise wird die Windgeschwindigkeit als Grundlage benutzt und der Gasaustauschkoeffizient in Abhängigkeit von dieser ausgedrückt. Ein Verhältnis zwischen Gasaustauschgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit wird angenommen, weil Wind als Haupterzeuger von Turbulenz in der Oberflächenschicht des Wassers angesehen wird. Mehrere Studien, sowohl unter Laborbedingungen als auch über natürlichen Wasserflächen unterstützen diesen Zusammenhang, z. B. Nightingale u. a.

(2000); Wanninkhof u. a. (1987, 2004); Ho u. a. (2006); Liss u. Merlivat (1986); McGillis u. a. (2001); Miller u. a. (2009). Windgeschwindigkeitsdaten liegen aus unterschiedlichen Quellen vor. Für die Bestimmung des Gasaustauschkoeffizienten werden häufig die NCEP-Reanalyse-Daten als Grundlage verwendet (Olsen u. a., 2005; Wanninkhof u. a., 2002; Takahashi u. a., 2009a; Wetzell u. a., 2005). Jedoch stellen auch Windgeschwindigkeiten aus Satellitenmissionen von ERS-1 und 2, QuikSCAT, MetOp-A und Oceansat-2 durch ihre hohe zeitliche Auflösung und die globale Verfügbarkeit dieser quasi-synoptischen Windgeschwindigkeitsfelder eine wertvolle Basis dar und werden zur Ableitung von Gasaustauschkoeffizienten empfohlen (Wanninkhof u. a., 2002). Es ist bekannt, dass Unterschiede zwischen den Windgeschwindigkeitsprodukten, was den Betrag der Windgeschwindigkeit angeht, bestehen (Nägler u. a., 2006). Nägler (2009) präsentiert hierzu einen Ansatz, nach dem die Parametrisierung des Gasaustauschkoeffizienten so angepasst werden, dass sich die Unterschiede zwischen den Windgeschwindigkeitsprodukten ausgleichen und so im globalen Mittel vergleichbare Gasaustauschkoeffizienten aus unterschiedlichen Windprodukten abgeleitet werden können. Die Arbeit von Nägler (2009) basiert auf einer grundlegenden Überarbeitung der globalen Randbedingung der Parametrisierung des Gasaustauschkoeffizienten und somit stellt dieser Ansatz eine Verbesserung in der Ableitung des Gasaustauschkoeffizienten dar. Wanninkhof (2007) nimmt Bezug auf eine vorhergehende Arbeit von Nägler u. a. (2006) und betont, dass aufgrund von Unterschieden zwischen den Windgeschwindigkeitsprodukten die Anpassung der Parametrisierung an das Windgeschwindigkeitsprodukt vorgenommen werden sollte.

Ein älterer Ansatz zur Bestimmung der Parametrisierung ist der von Wanninkhof (1992). Auf diesem Ansatz basieren zwei häufig verwendete Parametrisierungen der Gasaustauschgeschwindigkeit (Wanninkhof, 1992; Wanninkhof u. McGillis, 1999). Der wesentliche Unterschied zum Nägler-Ansatz ist der, dass eine Anpassung an unterschiedliche Windgeschwindigkeitsprodukte hier nicht vorgenommen wird. Eine detaillierte Gegenüberstellung des einen bzw. des anderen Ansatzes mit den Implikationen für die daraus resultierenden Gasaustauschgeschwindigkeiten und den CO<sub>2</sub>-Flüssen existiert noch nicht. Diese ist besonders wichtig, um bisher veröffentlichte Ergebnisse zum Gasaustausch auf Grundlage des Wanninkhof-Ansatzes (Boutin u. a., 2002, 2009; Carr u. a., 2002; Fangohr u. a., 2008; Takahashi u. a., 2009a; Olsen u. a., 2005) ins Verhältnis zu Ergebnissen aus der Verwendung des Nägler-Ansatzes setzen zu können. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei der Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeit auf den CO<sub>2</sub>-Fluss. Fangohr u. a. (2008) verwenden Parametrisierungen auf Grundlage des Wanninkhof-Ansatzes

und stellen dazu fest, dass der  $\text{CO}_2$ -Nettofluss basierend auf monatlich aufgelösten Windgeschwindigkeiten höher ist, als der aus täglichen Windgeschwindigkeiten. Es bleibt zu zeigen, wie sich der Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeit im Nägler-Ansatz darstellt.

Zwischen den einzelnen Windgeschwindigkeitsprodukten bestehen nicht nur Unterschiede, was den Betrag der Windgeschwindigkeit angeht. Zusätzlich gibt es Unterschiede in den NCEP- und den Satellitenwindgeschwindigkeiten im Hinblick auf die Abbildung der zeitlichen Variabilität. NCEP-Windgeschwindigkeiten, obwohl zeitlich hoch aufgelöst, bilden nicht die kleinskaligen Starkwindereignisse ab, die in Satellitenmessungen erfasst werden (Wanninkhof u. a., 2002). Die Frage stellt sich, ob diese nicht erfasste zeitliche Variabilität einen Einfluss auf die zeitliche Variabilität des Gasaustauschs hat. Hierzu gilt es generell zu klären, wie sich der Einfluss der zeitlichen Variabilität sowohl des kinetischen (Gasaustauschkoeffizient) und als auch des thermodynamischen Antriebs ( $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz) des Gasaustauschs darstellt. Olsen u. a. (2005) stellen dazu fest, dass die zwischenjährige Variabilität der Gasaustauschkoeffizienten aus QuikSCAT- bzw. NCEP-Winddaten im zonalen Mittel keine signifikanten Unterschiede aufweist und damit ein Einfluss der in den Windprodukten unterschiedlich dargestellten zeitlichen Variabilität für die zwischenjährige Variabilität des Gasaustauschs unerheblich ist. Eine Betrachtung auf einer feineren als der zwischenjährigen Zeitskala und in regionaler Auflösung ist jedoch noch nicht erfolgt.

Was die Parametrisierung der Gasaustauschgeschwindigkeit angeht, so existiert für diese eine Fülle von veröffentlichten Zusammenhängen. Häufig verwendet werden die beiden funktionalen Zusammenhänge, die ursprünglich von Wanninkhof (1992) und Wanninkhof u. McGillis (1999) publiziert wurden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer werden diese beiden Zusammenhänge in dieser Arbeit verwendet. Zusätzlich wird ein neuerer Zusammenhang (Wanninkhof u. a., 2009) in seinen Auswirkungen auf die Gasaustauschgeschwindigkeit und den Gasaustausch betrachtet und mit den anderen beiden Zusammenhängen verglichen.

Zur Diskriminierung dieser auf theoretischen Überlegungen basierenden Abschätzungen des Gasaustauschkoeffizienten bedarf es einer praktischen Überprüfung der Zusammenhänge unter realistischen Bedingungen. Über Abschätzungen des Gasaustauschs unter Laborbedingungen (wie z.B. in Arbeiten von Broecker u. a. (1978); Garbe u. a. (2004); Lüger u. a. (2006); Goldman u. a. (1988); Hara u. a. (2007); Harrison u. a. (2012); Herlina u. Jirka (2007); Ho u. a. (2000, 2004, 2007); Jähne u. a. (1979); Jähne u. a. (1987); Liss (1973); Zappa u. a. (2004)) und unter na-

türlichen Bedingungen durch Anwenden der Eddy-Kovarianz-Technik (durch z. B. Fairall u. a. (2000); McGillis u. a. (2001); Weiss u. a. (2007)) können Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit und Gasaustauschkoeffizient abgeleitet und validiert werden. Dabei stellt die Eddy-Kovarianz-Methode (auch Eddy-Korrelations-Technik) eine mikrometeorologische Messmethode dar, bei der aus zeitlichen Fluktuationen der Konzentration des betrachteten Gases und der Vertikalgeschwindigkeit der Luft der Gasaustausch abgeleitet werden kann. Auch Tracer-Experimente (wie durchgeführt von z.B. Asher u. Wanninkhof (1998); Nightingale u. a. (2000); Ho u. a. (2006); Wanninkhof u. a. (1987, 1985)) bieten die Möglichkeit, den Gasaustausch zu studieren und Rückschlüsse auf das Verhältnis zwischen Windgeschwindigkeit und Gasaustausch zu ziehen. Diese drei Methoden bergen jeweils Stärken und Schwächen: Der Vorteil der Labormessungen sind die Kontrollmöglichkeiten der Bedingungen, unter denen der Gasaustausch gemessen wird. Ein und dasselbe Wasservolumen kann so mehrmals unter verschiedenen Bedingungen beprobt und der Gasaustausch abgeschätzt werden. Der Nachteil der Laborbedingungen ist, dass sie nicht den in situ Bedingungen entsprechen und die Extrapolation der Ergebnisse aus Laborexperimenten auf Ozeanbedingungen schwierig ist (Nightingale, 2009). Eddy-Kovarianzmessungen und Tracer-Experimente wiederum können auf dem offenen Ozean stattfinden. Allerdings ist es bei den Eddy-Kovarianzmessungen unwahrscheinlich, dass ein Wasserkörper mehrmals beprobt wird. Das genau ist zwar bei den Tracer-Experimenten der Fall, allerdings sind diese Messungen räumlich und zeitlich stark begrenzt. Für die Diskriminierung der Zusammenhänge zwischen Gasaustauschkoeffizient und Windgeschwindigkeit ist es jedoch von Vorteil, ein Wasservolumen mehrmals über einen längeren Zeitraum und unter natürlichen Bedingungen zu beproben und es bezüglich des Gasaustauschs eines natürlichen Gases zu untersuchen.

Die Fülle der Messungen von Kohlenstoffdioxidparametern des Oberflächenwassers im erst kürzlich veröffentlichten „Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas“ (SOCAT, Pfeil u. a., 2012) über einen Zeitraum von mehreren Dekaden lässt vermuten, dass es Wasservolumina gibt, die in einem Zeitraum der SOCAT-Messungen mehrmals beprobt wurden. Werden diese Wasservolumina identifiziert, so bieten sie eine wertvolle Grundlage zur Diskriminierung der Zusammenhänge zwischen Gasaustauschkoeffizient und Windgeschwindigkeit. In dieser Arbeit wird mit Hilfe von simulierten Strömungsgeschwindigkeiten aus einem Ozeanzirkulationsmodell für den Nordatlantik gezeigt, wie mehrmals beprobte Wasservolumina in diesem Gebiet identifiziert werden können. Unter Verwendung der im ersten Teil der Arbeit abgeleiteten verbesserten Gasaustauschgeschwindigkeiten aller drei Zusammenhänge werden in

einem Lagrange'schen Ansatz zeitlich hoch aufgelöst zwischen dem Zeitpunkt der einen Beprobung und dem Zeitpunkt der anderen Beprobung die Änderungen des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks im Wasser abgeschätzt. Zum Zeitpunkt der zweiten Beprobung wird der simulierte mit dem tatsächlich gemessenen CO<sub>2</sub>-Partialdruck verglichen. Es wird erörtert, inwieweit sich die hier verwendete Methode eignet, um die Gasaustauschkoeffizient-Windgeschwindigkeitszusammenhänge zu validieren.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Verwendung von Windgeschwindigkeitsprodukten aus Satelliten-Scatterometer-Messungen zur Abschätzung des Gasaustauschkoeffizienten. Zum ersten Mal werden hier Zeitreihen von Gasaustauschgeschwindigkeiten aus der Kombination von Windgeschwindigkeiten aus Satelliten-Scatterometer-Messungen des Nögler-Ansatzes vorgestellt. Erstmals werden in dieser Arbeit Gasaustauschkoeffizienten aus Windgeschwindigkeitsdaten der Satellitenmissionen MetOp-A und Oceansat-2 berechnet und vorgestellt. Die Gesamtheit der für die Ableitung der Gasaustauschkoeffizienten verwendeten Satellitenwindgeschwindigkeiten umfasst einen Zeitraum von 1991 bis 2012. Die Zeitreihe globaler Felder vergleichbarer und verbesserter Satelliten-Gasaustauschgeschwindigkeiten für CO<sub>2</sub> auf Grundlage des Nögler-Ansatzes kann durch die andauernden Missionen MetOp-A und Oceansat-2 in Zukunft fortgesetzt werden.

## **Ziel und Fragestellungen der Arbeit**

Das Ziel der Arbeit ist die Ableitung einer Zeitreihe verbesserter Gasaustauschgeschwindigkeiten auf der Grundlage von Satellitenwinddaten. Die Fragen dazu, die sich aus der Einleitung ergeben und in dieser Arbeit beantwortet werden, sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Wie stellen sich die Unterschiede zwischen dem Wanninkhof- und dem Nögler-Ansatz in der abgeleiteten Gasaustauschgeschwindigkeit und im CO<sub>2</sub> -Nettofluss dar?
2. Welche Unterschiede in der Gasaustauschgeschwindigkeit und dem resultierenden CO<sub>2</sub> -Nettofluss ergeben sich aus den drei angewendeten Zusammenhängen zwischen der Windgeschwindigkeit und der Gasaustauschgeschwindigkeit?
3. Welche Bedeutung hat die monatliche Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten auf die monatliche Variabilität des globalen und des regionalen CO<sub>2</sub>-Flusses?

4. Spielt die Wahl zwischen Windgeschwindigkeit von NCEP oder von QuikSCAT diesbezüglich eine Rolle?

5. Kann mit der hier verwendeten Methode eine Diskriminierung der verbesserten Gasaustauschparametrisierungen vorgenommen werden, um eine Aussage darüber zu treffen, welche Form der Parametrisierung die  $\text{CO}_2$  -Flüsse im Nordatlantik am besten beschreibt?

## Struktur der Arbeit

Nach dem ersten Kapitel - der Einleitung - folgen fünf weitere. Kapitel 2 umfasst die Hintergrundinformationen zum Gasaustausch, zur Gasaustauschgeschwindigkeit und zu den Ansätzen, Zusammenhängen und Grundlagen. Kapitel 3 beschreibt die in dieser Arbeit verwendeten Daten und Methoden zur Ableitung der Zeitreihe verbesserter Gasaustauschgeschwindigkeiten und des  $\text{CO}_2$ -Flusses. Hier werden außerdem die daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Die verwendeten Daten und Methoden und schließlich die Ergebnisse des Lagrang'schen Ansatzes werden in Kapitel 4 vorgestellt, erläutert und diskutiert. In Kapitel 5 werden die Schlussfolgerungen präsentiert und ein Ausblick gegeben.

Es ist geplant, Ergebnisse dieser Arbeit als wissenschaftliche Artikel zu veröffentlichen. Kapitel 3 ist bereits zur Veröffentlichung vorbereitet.

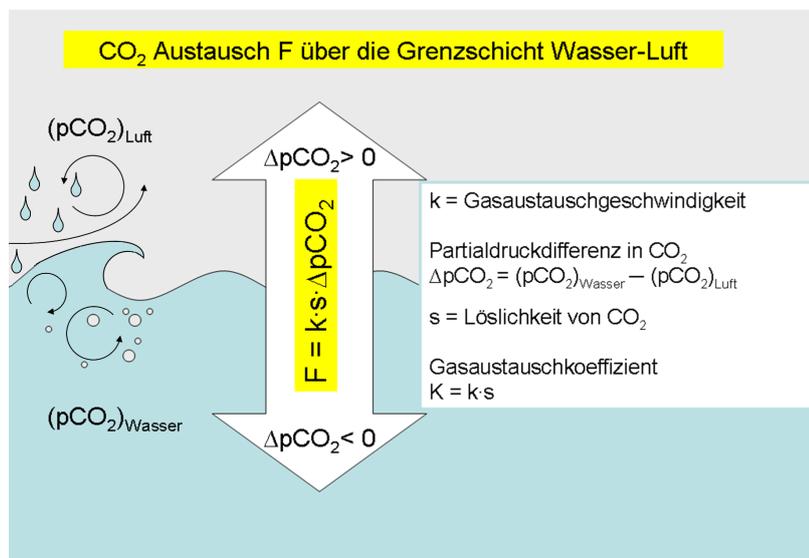
## 2. Hintergrund

### 2.1. Der Gasaustausch

Der Fluss  $F$  von Kohlenstoffdioxid zwischen Ozean und Atmosphäre wird beschrieben als das Produkt aus Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$ , Löslichkeit  $s$  und der Partialdruckdifferenz in  $\text{CO}_2$  zwischen den beiden Phasen,  $\Delta p\text{CO}_2$ :

$$F = k \cdot s \cdot \Delta p\text{CO}_2 \quad (2.1)$$

Sobald ein Unterschied im  $\text{CO}_2$ -Partialdruck zwischen Ozean und Atmosphäre besteht, wird  $\text{CO}_2$  zwischen diesen beiden Medien ausgetauscht. Die Gasaustauschgeschwindigkeit stellt in diesem Zusammenhang den kinetischen Antrieb dar und unterliegt verschiedenen Einflüssen. Eine schematische Darstellung des  $\text{CO}_2$ -Austauschs zeigt Abbildung 2.1.



**Abbildung 2.1.:** Schematische Darstellung des  $\text{CO}_2$ -Austauschs über die Grenzschicht zwischen Wasser und Luft

Der Fluss wird allgemein angegeben als die Masse an Kohlenstoff, die während

einer Zeiteinheit eine Flächeneinheit der Grenzschicht überwindet, in SI-Einheiten also  $\frac{gC}{m^2s}$ .

Die Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss aus anderen messbaren Größen abgeleitet werden. Ein oft verwendeter Zusammenhang ist der zwischen Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe,  $u_{10}$ .

Eine allgemeine Form dieser  $k$ - $u_{10}$ -Beziehung ist

$$k = f(u_{10}) \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \quad (2.2)$$

wobei  $Sc$  die dimensionslose Schmidt-Zahl ist. Sie ist das Verhältnis aus kinematischer Viskosität des Wassers und der molekularen Diffusivität von  $CO_2$  und ist hauptsächlich bestimmt von der Temperatur. Für Kohlenstoffdioxid in Meerwasser von  $20^\circ C$  beträgt die Schmidt-Zahl 660. Konventionell wird die Einheit der Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  in  $\frac{cm}{h}$  angegeben; die Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  wird dafür in der Einheit  $\frac{m}{s}$  angewendet.

Bei absolut ruhiger Wasseroberfläche und Windstille wäre allein die molekulare Diffusion der Kohlenstoffdioxidmoleküle im jeweiligen Medium (Wasser bzw. Luft) bestimmend für die Geschwindigkeit, mit der  $CO_2$  ausgetauscht wird. Für schwer lösliche Gase wie  $CO_2$ , Sauerstoff und Methan ist die molekulare Diffusion im Wasser wesentlich geringer als die in Luft bei gleicher Temperatur. Die Gasaustauschgeschwindigkeit für diese Gase ist deswegen durch die Gasaustauschgeschwindigkeit in Wasser bestimmt. Da unter natürlichen Bedingungen die Wahrscheinlichkeit absoluter Windstille und absolut ruhiger Wasseroberfläche gering ist, wird die Gasaustauschgeschwindigkeit zu einem erheblichen Anteil von der Turbulenz an der Grenzschicht bestimmt.

Im Ozean hängt die Turbulenz in der Oberflächenschicht hauptsächlich von der Windgeschwindigkeit ab. Zusätzlich spielen aber auch Strömungen, Auftrieb, konvektive Prozesse und Seegang eine Rolle.

Des weiteren induziert Regen Turbulenz an der Wasseroberfläche. Dieser Effekt ist somit bedeutsam in Regionen mit hohen Regenraten.

Wellenbrechen ist ein weiterer Prozess, der den Gasaustausch beschleunigt. Durch Brechen der Oberflächenwellen werden Luftbläschen ins Wasser gebracht, die während des Aufsteigens mit dem umliegenden Wasser Gas austauschen und somit die Gasaustauschrate erhöhen. Außerdem erzeugen wieder aufsteigende Luftbläschen Turbulenz in der Grenzschicht.

Ebenfalls verstärkt wird die Gasaustauschgeschwindigkeit durch Reaktion des im Wasser gelösten  $\text{CO}_2$  mit Hydroxidionen ( $\text{OH}^-$ ). Dieser Prozess wird auch als „chemische Verstärkung“ (chemical enhancement) bezeichnet und ist entscheidend in Gebieten mit hoher Oberflächenwassertemperatur und bei niedrigen Windgeschwindigkeiten.

Der Einfluss von biogenen und anthropogenen Oberflächenfilmen führt zu einer Reduzierung der Gasaustauschgeschwindigkeit. Oberflächenfilme hemmen den Gasaustausch hauptsächlich dadurch, dass sie Turbulenz in der Oberflächenschicht des Ozeans dämpfen.

Nähere Informationen zu den hier beschriebenen Prozessen finden sich in Sarmiento u. Gruber (2006); Emerson u. Hedges (2008); Wanninkhof u. a. (2009); Nightingale (2009).

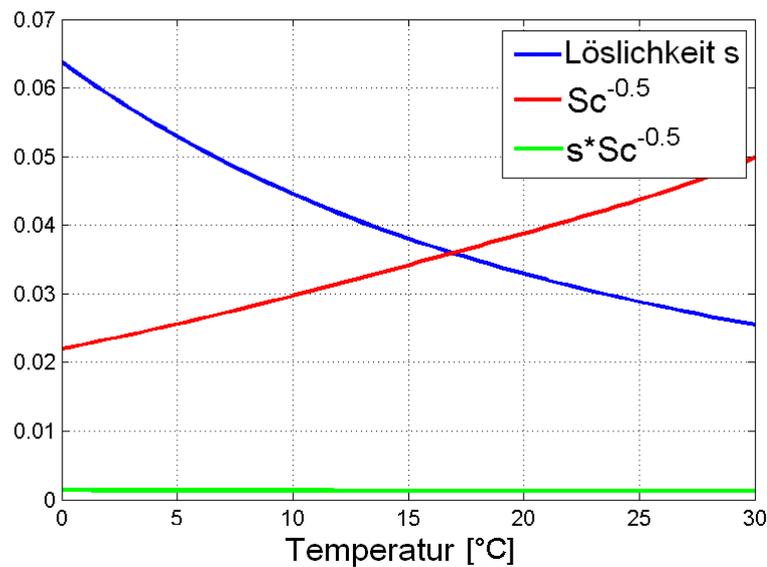
Alle turbulenz erzeugenden Effekte, die nicht mit der Windgeschwindigkeit zusammenhängen, werden in der Form der Gasaustauschgeschwindigkeit wie in Gleichung 2.2 nicht erfasst.

### 2.1.1. Der Gasaustauschkoeffizient

Das Produkt aus Löslichkeit  $s$  und Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  bildet den Gasaustauschkoeffizienten  $K$ :

$$K = k \cdot s \tag{2.3}$$

Im Gasaustauschkoeffizienten geht der Einfluss der Temperatur zweifach ein: zum einen in der Löslichkeit  $s$  und zum anderen im Schmidt-Zahl-Term, der in der Gasaustauschgeschwindigkeit enthalten ist (siehe Gleichung 2.2). Die beiden Effekte der Temperatur sind dabei gegenläufig: während bei steigender Temperatur die Löslichkeit sinkt, nimmt der Schmidt-Zahl-Term zu. Über den Temperaturbereich von  $0^\circ\text{C}$  bis  $30^\circ\text{C}$  macht das eine Änderung des Gasaustauschkoeffizienten von weniger als 10 % aus (siehe Abbildung 2.2 und Takahashi u. a., 2009a). Der Salzgehalt wird in dieser Form der Abschätzung des Gasaustauschkoeffizienten in der Löslichkeit berücksichtigt. Diese ändert sich in einem Salzgehaltsbereich des globalen Ozeans von 32 - 37 PSU (Antonov u. a., 2010) und im o. g. Temperaturbereich um wenig mehr als 2%. Die Schmidt-Zahl wurde hierfür nach Wanninkhof (1992), die Löslichkeit nach Weiss (1974) berechnet. Somit ist der Gasaustauschkoeffizient, wie in Gleichung 2.3 definiert, hauptsächlich eine Funktion der Windgeschwindigkeit.



**Abbildung 2.2.:** Einfluss der Temperatur auf den Gasaustauschkoeffizienten, vergleiche Gleichung 2.2 und 2.3.

keit.

Die Löslichkeit wird nach Weiss (1974) in  $\frac{mol}{l \cdot atm}$  angegeben; für den Gasaustauschkoeffizienten ergibt sich dann (unter Anwendung des entsprechenden Umwandlungsfaktors) die Einheit  $\frac{mol}{m^2 \cdot s \cdot atm}$ .

## 2.2. Partialdruckdifferenz von Kohlenstoffdioxid zwischen Ozean und Atmosphäre

Das Gas Kohlenstoffdioxid löst sich in Wasser. Ein Großteil des gelösten  $CO_2$  reagiert mit dem Wasser und bildet Kohlensäure. Diese spaltet sich auf in Hydrogencarbonat und Carbonat. Im Meerwasser kommen also die drei Spezies gelöstes  $CO_2$ , Carbonat und Hydrogencarbonat vor. Es ist das gelöste  $CO_2$ , welches den Partialdruck von  $CO_2$  ( $pCO_2$ ) im Wasser bestimmt. Da  $CO_2$  kein ideales Gas ist, muss, streng genommen, „ $pCO_2$ “ ersetzt werden durch den Begriff „Fugazität von  $CO_2$ “,  $fCO_2$ . Die Fugazität berücksichtigt das nicht-ideale Verhalten eines Gases und ist im Falle eines idealen Gases gleichbedeutend mit dem Partialdruck. Die Fugazität und der Partialdruck von  $CO_2$  (beide werden üblicherweise in der nicht SI-konformen Einheit  $\mu atm$  angegeben) sind betragsmäßig jedoch fast gleich mit einer Abweichung von wenigen Promille (Zeebe u. Wolf-Gladrow, 2001), weswegen häufig vom Partialdruck gesprochen wird, wenn eigentlich Fugazität gemeint ist.

Das im Wasser gelöste  $\text{CO}_2$  ist die Spezies, die mit der Atmosphäre ausgetauscht werden kann. Dieses geschieht, sobald ein Unterschied im Partialdruck im Wasser und im Partialdruck in der darüber liegenden Luft besteht. Die Partialdruckdifferenz in Kohlenstoffdioxid zwischen Ozean und Atmosphäre,  $\Delta p\text{CO}_2$ , ist wie folgt definiert:

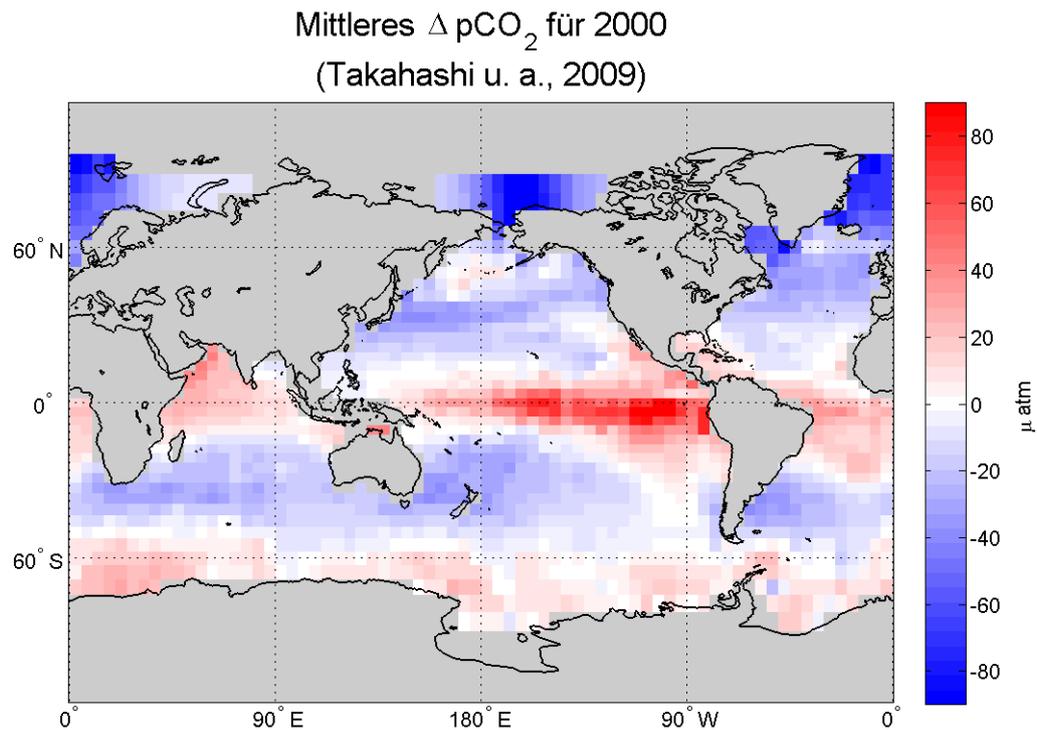
$$\Delta p\text{CO}_2 = (p\text{CO}_2)_O - (p\text{CO}_2)_A \quad (2.4)$$

mit den Indizes  $O$  und  $A$  für Ozean und Atmosphäre. Das Vorzeichen der Partialdruckdifferenz gibt die Richtung des  $\text{CO}_2$ -Austausch an, wie in Abbildung 2.1 dargestellt: negative  $\Delta p\text{CO}_2$ -Werte bedeuten, der Ozean nimmt  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre auf, positive Werte für  $\Delta p\text{CO}_2$  stehen für ein Kohlendioxid-Ausgasen des Ozeans in die Atmosphäre.

Über dem globalen Ozean sind saisonale und geographische Änderungen des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks in der oberen Schicht des Ozeans größer als die des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks und somit werden Richtung und Größenordnung des  $\text{CO}_2$ -Austauschs hauptsächlich durch den ozeanischen  $\text{CO}_2$ -Partialdruck bestimmt (Takahashi u. a., 2002). Dieser unterliegt unterschiedlichen Einflüssen. So führt z.B. biologische Aktivität in Form von Photosynthese durch Organismen im Oberflächenwasser zu einem Verbrauch von gelöstem  $\text{CO}_2$  und damit zu einer Verringerung des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks. Dieser biologische Einfluss ist besonders ausgeprägt in höheren Breiten des globalen Ozeans, dort, wo saisonale Algenblüten auftreten. In nährstoffarmen Regionen, wie z.B. in den subtropischen Wirbeln, ist der biologische Einfluss auf den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck gering. Auch in Auftriebsgebieten, wie z. B. das stark ausgeprägte äquatoriale Auftriebsgebiet im Pazifik, spielt die biologische Aktivität eine Rolle für den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck. Hier ist aber auch ein physikalischer Prozess wirksam: In diesen Gebieten wird kaltes,  $\text{CO}_2$ -gesättigtes Wasser aus tieferen Schichten an die Oberfläche gebracht und erwärmt. Die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  in Wasser ist u.a. eine Funktion der Temperatur; je niedriger die Temperatur, desto höher die Löslichkeit. In Folge der Erwärmung des auftriebenden Wassers gibt dieses also  $\text{CO}_2$  an die Atmosphäre ab. Dieser physikalische Effekt überwiegt den biologischen, so dass die Auftriebsgebiete, obwohl nährstoffreich, Gebiete sind, in denen der Ozean  $\text{CO}_2$  abgibt. Der Löslichkeitseffekt kommt außerdem zum Tragen in den höheren Breiten, in denen wärmeres Wasser aus den westlichen Randströmen z.B. des Golfstroms oder des Kuroshiostroms abkühlt und dadurch mehr  $\text{CO}_2$  aufnehmen kann. Weitere Faktoren, die Einfluss auf den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck

haben, sind außerdem der Austausch von  $\text{CO}_2$  über die Grenzschicht Wasser-Luft, Süßwasserflüsse und Änderungen in der chemischen Zusammensetzung des Meerwassers. Abbildung 2.3 zeigt eine globale Übersicht der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz nach Takahashi u. a. (2009b).

Als Abweichungen von dem in Abbildung 2.3 dargestellten Mittelwert der Par-



**Abbildung 2.3.:** Mittlere  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz ( $\Delta p\text{CO}_2$ ) zwischen Ozean und Atmosphäre für das Jahr 2000. Basis sind die Takahashi2009-Daten, siehe auch Abschnitt 3.1.2.

tialdruckdifferenz für das Jahr 2000 sind zum einen der ausgeprägte Jahresgang in  $\Delta p\text{CO}_2$  in Gebieten mit biologischer Aktivität zu erwähnen. Außerdem unterliegt die Partialdruckdifferenz von  $\text{CO}_2$  in den äquatorialen Auftriebsgebieten zeitlichen Schwankungen, die durch das ENSO-Phänomen hervorgerufen werden. ENSO („El Niño Southern Oscillation“) ist eine gekoppelte Ozean-Atmosphären-Schwingung auf mehrjährigen Zeitskalen, die sich in den äquatorialen Gebieten u. a. sowohl durch Änderungen der atmosphärischen Zirkulation als auch in Änderungen der Stärke des ozeanischen Auftriebs zeigt (Philander, 1990). Durch verringerten Auftrieb während der sogenannten „El Niño“-Phasen der Oszillation ist die  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz in diesen Zeiten und in diesen Gebieten verringert und

damit auch das Ausgasen. Das Gegenteil ist der Fall in der „La Niña“-Phase. In dieser Zeit ist der Auftrieb verstärkt und damit die Partialdruckdifferenz ebenso wie das Ausgasen erhöht.

Und schließlich ist noch der langfristige positive Trend in der atmosphärischen Konzentration des  $\text{CO}_2$  zu erwähnen, der einen Einfluss auf die  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz hat. Von einer vorindustriellen Konzentration in der Atmosphäre von 280 ppmv ist die Konzentration auf einen Wert von 394 ppmv für November 2012 gestiegen <sup>1</sup>. Dies hat dazu geführt, dass der Ozean von einer Nettoquelle für atmosphärisches  $\text{CO}_2$  in vorindustrieller Zeit zu einer Nettosenke für Kohlenstoffdioxid in heutiger Zeit geworden ist (siehe auch Abbildung 1.1).

### 2.3. Die Gasaustauschgeschwindigkeit als Funktion der Windgeschwindigkeit

Abbildung 2.4 zeigt Zusammenhänge zwischen  $k$  und  $u_{10}$  aus Veröffentlichungen der letzten Jahrzehnte.

Hierbei sind die unterschiedlichen funktionalen Zusammenhänge zu bemerken: Es gibt sowohl lineare oder teilweise lineare Zusammenhänge (dargestellt in blau), eine quadratische Abhängigkeit zwischen  $k$  und  $u_{10}$  (in rot), kubische Zusammenhänge (grün) und  $k$  als Polynomial-Funktion der Windgeschwindigkeit (dargestellt in schwarz). Zu bedenken ist, dass die Ableitungen dieser Zusammenhänge basieren auf

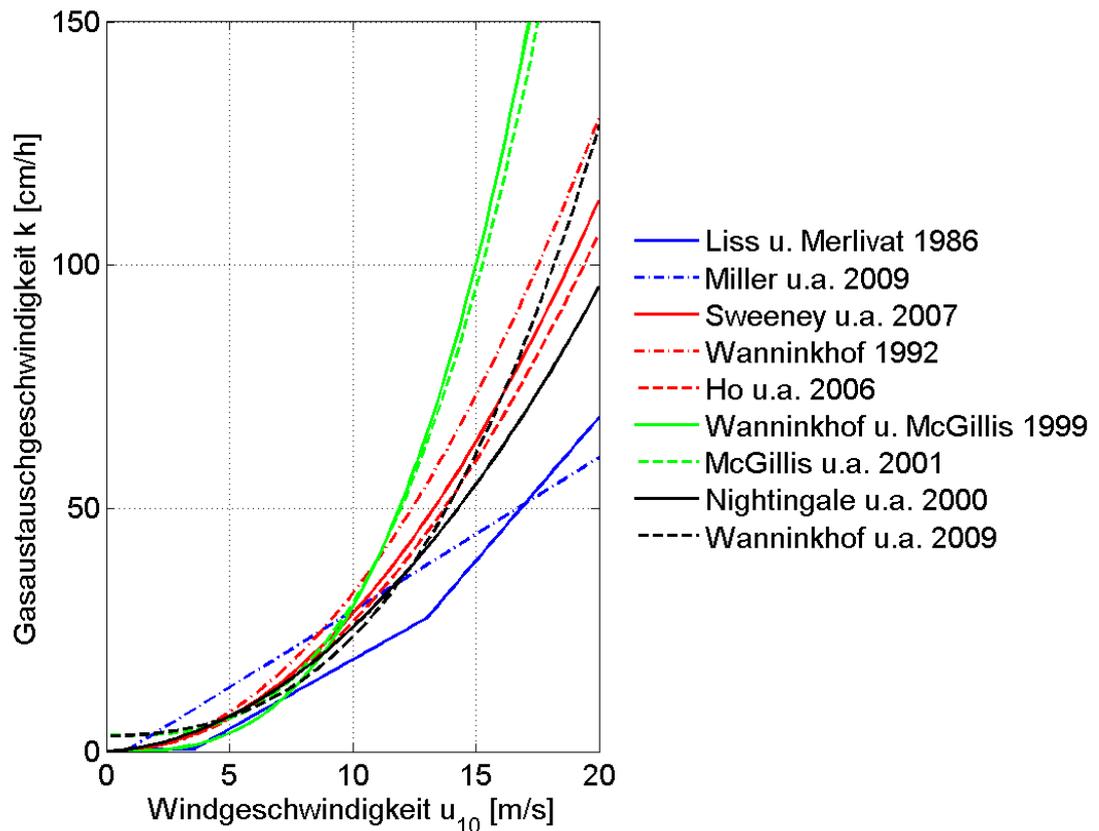
1. unterschiedlichen Bedingungen (Labor / natürliche Wasserflächen),
2. Betrachtungen unterschiedlicher räumlicher Skalen und
3. Beobachtungen in verschiedenen Ozeangebieten mit unterschiedlichen physikalischen Gegebenheiten,

und dass

4. unterschiedliche globale Randbedingungen zugrunde gelegt wurden.

Dies und die oben beschriebenen Einflüsse auf die Turbulenz in der Ozeanoberflächenschicht (und damit auf den Gasaustausch), die in den Parametrisierungen auf Grundlage der Windgeschwindigkeit nicht erfasst sind, erklären die Vielfältigkeit in den veröffentlichten Zusammenhängen zwischen Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  und Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$ .

<sup>1</sup>Thomas Conway and Pieter Tans, NOAA/ESRL ([www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/))



**Abbildung 2.4.:** Gasaustauschgeschwindigkeit als Funktion der Windgeschwindigkeit  $u_{10}$ : ein Ausschnitt der über die letzten Jahrzehnte veröffentlichten Zusammenhänge.

Wird eine Größe über einen nichtlinearen Zusammenhang ermittelt, so ist diese Größe von der zeitlichen und räumlichen Auflösung der in der Parametrisierung verwendeten Felder abhängig. Hierbei bestimmt die Variabilität (sowohl zeitlich als auch räumlich) den Grad der Abhängigkeit.

*Beispiel:*

Eine Variable  $a = a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  hat den Mittelwert  $\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$ . Bildet man diese Variable  $a$  über eine quadratische Funktion  $f$  auf eine andere Variable  $b$  ab, mit

$$b = b_1, b_2, b_3, \dots, b_n = f(a_1), f(a_2), f(a_3), \dots, f(a_n) = a_1^2, a_2^2, a_3^2, \dots, a_n^2,$$

so gilt für den Mittelwert

$$\begin{aligned}\bar{b} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2\end{aligned}$$

Dieser Mittelwert  $\bar{b}$  ist verschieden vom Quadrat des Mittelwertes  $\bar{a}$ , wenn die Varianz von  $a$ ,  $\text{var}(a)$ , ungleich 0 ist. Denn es gilt

$$\text{var}(a) = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n a_i^2 \right) - \bar{a}^2 \quad (2.5)$$

Für die Variable  $a$  können z.B. 30 Werte der täglichen Windgeschwindigkeit in einem Monat angenommen werden, aus denen ein monatlicher Mittelwert für eben diesen Monat berechnet wird. Der entspricht dann dem Mittelwert  $\bar{a}$ . Es können aber auch Windgeschwindigkeiten auf einem räumlichen Gitter sein, dessen Auflösung durch räumlich Mittelwertbildung der entsprechenden Windgeschwindigkeiten verringert wird. Der Mittelwert über die Quadrate der Windgeschwindigkeiten in der feineren zeitlichen bzw. räumlichen Auflösung ist dann nach Gleichung 2.5 unter der Bedingung, dass die zeitliche bzw. räumliche Varianz verschieden von Null ist, verschieden vom Quadrat über den zeitlichen bzw. räumlichen Mittelwert der Windgeschwindigkeit. Große zeitliche bzw. räumliche Variabilität ist daher gleichbedeutend mit einem großen Unterschied zwischen Größen, die jeweils aus den unterschiedlich zeitlich bzw. räumlich aufgelösten Windgeschwindigkeiten abgeleitet wurden. Dieses gilt nicht nur für quadratische Zusammenhänge, sondern auch für andere nichtlineare Zusammenhänge.

In der Arbeit von Fangohr u. a. (2008) wird der Einfluss der räumlichen und zeitlichen Auflösung der verwendeten Windgeschwindigkeitsfelder auf die hieraus abgeleitete Gasaustauschgeschwindigkeit und folglich auf den CO<sub>2</sub>-Netto-Austausch quantifiziert: Die Verwendung täglicher Windfelder von AMSR-E (Advanced Scanning Microwave Radiometer) auf einem 5°x4°-Gitter im Vergleich zu täglichen AMSR-E-Windfeldern auf einem feineren 0.25°x0.25°-Gitter resultiert in einer Abweichung im globalen Netto-CO<sub>2</sub>-Austausch

von -6.3%. Monatliche Windfelder wiederum ergeben einen um 30% höheren Netto-Austausch als tägliche Windfelder. Diese beiden Abweichungen gelten bei Verwendung der kubischen Parametrisierung nach Wanninkhof u. McGillis (1999); für den quadratischen Zusammenhang ergeben sich Abweichungen von -1% bzw. 6%.

Zur Berechnung von Gasaustauschgeschwindigkeiten empfehlen (Wanninkhof u. a., 2002) im Hinblick auf die zeitliche Auflösung der Windgeschwindigkeit, keine zeitlich gemittelten Felder zu verwenden.

### 2.4. Die Ansätze

Zur Ableitung der globalen Randbedingung zur Berechnung von Gasaustauschgeschwindigkeiten wird die globale  $^{14}\text{C}$ -Inventur verwendet, die im Folgenden näher erläutert wird.

Kohlenstoff kommt im Erdsystem in drei verschiedene Isotopenformen vor:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  (beides stabile Isotope) und  $^{14}\text{C}$  (Radiokohlenstoff). Auf natürliche Weise entsteht  $^{14}\text{C}$  durch kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre. Dieses Isotop ist nicht stabil und zerfällt mit der Zeit. Die Zerfallskonstante  $\lambda$  ist  $1/8267 \text{ Jahr}^{-1}$ ; das ist gleichbedeutend mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. Das Verhältnis von  $^{14}\text{C}$  zu  $^{12}\text{C}$  (auch  $\Delta^{14}\text{C}$ ) in der Atmosphäre und im Ozean und der Bestand von  $^{14}\text{C}$  im Ozean sind natürlicherweise zeitlich nahezu konstant. Seit Beginn des Industriezeitalters jedoch treten menschengemachte Störungen dieser Verhältnisse und des ozeanischen  $^{14}\text{C}$ -Bestands auf. Das Verbrennen fossiler Brennstoffe und die veränderte Landnutzung führen zu einem Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration und damit zu einer erhöhten Aufnahme von Kohlenstoff und folglich auch von Radiokohlenstoff durch den Ozean. Hierdurch erhöht sich die Menge an  $^{14}\text{C}$  im Ozean. Zusätzlich jedoch führt das Verbrennen fossiler Brennstoffe, die aufgrund ihres Alters kein  $^{14}\text{C}$  mehr enthalten, zu einer Abnahme des atmosphärischen  $\Delta^{14}\text{C}$  (Suess, 1955). Dieser Effekt ist auch bekannt als Suess-Effekt, und bedingt eine Abnahme des ozeanischen  $^{14}\text{C}$ -Bestands. Eine zweite Störung aufgrund menschlicher Aktivität stellen Atombombentests in der Atmosphäre dar, wie sie zwischen 1945 und 1980 vorgenommen wurden. Diese Tests führten zu einer Anreicherung von  $^{14}\text{C}$  in der Atmosphäre und damit auch im Ozean.

Änderungen im globalen Bestand von  $^{14}\text{C}$  im Ozean von einem Zeitpunkt zu einem anderen sind äquivalent zu dem in diesem Zeitraum global integrierten Austausch von  $^{14}\text{C}$  zwischen Ozean und Atmosphäre. Somit stellt diese  $^{14}\text{C}$ -Bestandsänderung eine wichtige globale Randbedingung für die Berechnung der Gasaustauschgeschwindigkeit dar. Um diese Änderung genau zu bestimmen, müssen die oben ge-

nannten Einflüsse beachtet werden. Aus dieser ozeanischen  $^{14}\text{C}$ -Bestandsänderung lässt sich dann eine mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit ableiten. Nägler u. a. (2006) und Nägler (2009) überprüfen und korrigieren die bisher veröffentlichten  $^{14}\text{C}$ -Bestandsänderungen und bringen diese in Übereinstimmung.

Daraus ermittelt Nägler (2009) eine mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit von  $k_{av} = 16.5$  cm/h. Diese entspricht der mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit für den Zeitraum 1950-1995 und wird in dieser Arbeit als globale Randbedingung für die Bestimmung der Gasaustauschgeschwindigkeit verwendet. Eine früher veröffentlichte  $^{14}\text{C}$ -Bestandsänderungen ist die von Broecker u. a. (1985). Sie ist die globale Randbedingung für sowohl die häufig verwendete quadratische  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen nach Wanninkhof (1992) als auch die kubische Abhängigkeit nach Wanninkhof u. McGillis (1999); beide sind auch in Abbildung 2.4 dargestellt. Die für diese  $^{14}\text{C}$ -Bestandsänderung abgeleitete mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit beträgt 21.9 cm/h. Sie ist somit um ein Drittel höher als die von Nägler (2009).

Diese unterschiedlichen globalen Randbedingungen stellen die Grundlage der beiden in dieser Arbeit verwendeten Ansätze zur Bestimmung der Gasaustauschgeschwindigkeit dar, die hier gegenübergestellt werden. Tabelle 2.1 fasst diese Gegenüberstellung zusammen und wird im Folgenden erklärt.

Der erste Ansatz wurde von Wanninkhof, 1992 vorgestellt und wird im Weiteren „Wanninkhof-Ansatz“ genannt. Für zeitlich hoch aufgelöste Windgeschwindigkeiten geht der Wanninkhof-Ansatz davon aus, dass die globale Windgeschwindigkeit einer Rayleigh-Verteilung (siehe Anhang A) um die mittlere Windgeschwindigkeit von 7.4 m/s über einen Windgeschwindigkeitsbereich von 0- 30 m/s entspricht. Mit dieser Verteilung werden die Quadrate (Wanninkhof (1992)), bzw. die Kubik (Wanninkhof u. McGillis (1999)) der Windgeschwindigkeiten multipliziert, die Summe darüber wird als proportional zur mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit gesetzt und der Proportionalitätsfaktor wird ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Gasaustauschgeschwindigkeit und langzeit-gemittelter Windgeschwindigkeit wird bestimmt, indem die mittlere globale Windgeschwindigkeit zum Quadrat (Wanninkhof (1992)) als proportional zur mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit angenommen wird. Die mittlere globale Windgeschwindigkeit basiert in diesem Ansatz auf Schiffsmessungen. So kann der Proportionalitätsfaktor ermittelt werden und es ergibt sich der quadratische Zusammenhang zwischen der Gasaustauschgeschwindigkeit und langzeit-gemittelter Windgeschwindigkeit. Der kubische Zusammenhang für langzeit-gemittelten Wind, wie in Wanninkhof u. McGillis (1999) in deren Formel 5 veröffentlicht, wurde auf eine

Ansatz	Nägler-Ansatz	Wanninkhof-Ansatz
$k_{av}$ [cm/h]	16.5	21.9
zeitl. Variabilität der Windgeschwindigkeit	ergibt sich aus den verwendeten Feldern	vorgegeben, Rayleigh-Verteilung
individuelle Anpassung an Windgeschwindigkeitsprodukte	ja	nein
Variabilität der Schmidt-Zahl enthalten	ja	nein, $Sc = 660$
Nachteil	Berechnung der Proportionalitätsfaktoren ist zeitaufwendig	keine Anpassung an unterschiedliche Windgeschwindigkeitsprodukte
Vorteil	Verbesserung der $k-u_{10}$ -Parametrisierung	fertige $k-u_{10}$ -Parametrisierung, einfach anzuwenden

**Tabelle 2.1.:** Die Ansätze nach Wanninkhof (1992) und Nägler (2009) zur Ermittlung der Gasaustauschgeschwindigkeit aus der Windgeschwindigkeit

andere Art ermittelt und ist zudem noch falsch (persönliche Kommunikation mit Rik Wanninkhof) und wird deswegen ignoriert.

Der zweite Ansatz, der von Nägler (2009) vorgestellt wurde, wird im weiteren als „Nägler-Ansatz“ bezeichnet. In diesem Ansatz wird keine Rayleigh-Verteilung der globalen Windgeschwindigkeit angenommen. Stattdessen werden die jeweiligen globalen Windgeschwindigkeitsfelder, auf deren Grundlage Gasaustauschgeschwindigkeiten berechnet werden sollen, quadriert und mit dem Schmidt-Zahl-Term, der ebenfalls als globales Feld berechnet werden kann, multipliziert. Das globale räumliche und zeitliche Mittel hierüber wird in Proportionalität zu  $k_{av}$  gesetzt und so der Proportionalitätsfaktor ermittelt. So ergibt sich der quadratische Zusammenhang zwischen Gasaustauschgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit nach Nägler (2009). Der kubische Zusammenhang kann analog ermittelt werden und ist

in Unterabschnitt 3.1.4 ausführlich erklärt. Die zeitliche Variabilität der Windgeschwindigkeit ist in diesem Ansatz nicht vorgegeben, sondern ergibt sich aus den Feldern selber. Außerdem trägt der Nägler-Ansatz dem Umstand Rechnung, dass Unterschiede zwischen Windgeschwindigkeitsprodukten existieren und erlaubt eine individuelle Anpassung des  $k$ - $u_{10}$ -Zusammenhangs an das jeweilige Produkt. Zudem ist die zeitliche und räumliche Variabilität der Schmidt-Zahl in diesem Ansatz zur Ermittlung der Proportionalitätsfaktoren enthalten. Der Wanninkhof-Ansatz geht hingegen von einer räumlich und zeitlich konstanten Schmidt-Zahl von 660 aus. Das bedeutet, dass Wanninkhof die mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit aus der  $^{14}\text{C}$ -Bestandsaufnahme, die eine variable Schmidt-Zahl impliziert, gleichsetzt mit einer mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit mit konstanter Schmidt-Zahl. Der Einfluss der als global konstant angenommenen Schmidt-Zahl von 660, wie im Wanninkhof-Ansatz, wurde von Nägler (2009) abgeschätzt. In der Arbeit von Nägler (2009) wird das Verhältnis der mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit mit  $Sc = 660$  zu der mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit mit variabler Schmidt-Zahl mit 1.1 angegeben. Das heißt also, dass der im Wanninkhof-Ansatz ermittelte Proportionalitätsfaktor um 10% unterschätzt wurde und damit die Gasaustauschgeschwindigkeiten aufgrund der als konstant angenommenen Schmidt-Zahl in diesem Ansatz um 10% unterschätzt werden. Der Nägler-Ansatz mit einer variablen Schmidt-Zahl stellt also eine Verfeinerung und somit eine Verbesserung in der Ableitung der  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierung dar. Allerdings ist die Ableitung der Proportionalitätsfaktoren zeitaufwendig. Der Wanninkhof-Ansatz bietet im Gegensatz dazu eine Formel der Gasaustauschgeschwindigkeit, die sofort auf Windgeschwindigkeitsfelder angewendet werden kann. Der größte Nachteil an diesem Ansatz ist, dass eine Anpassung an unterschiedliche Windgeschwindigkeitsprodukte nicht gegeben ist und es damit Gasaustauschgeschwindigkeiten aus unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsprodukten an Vergleichbarkeit mangelt.

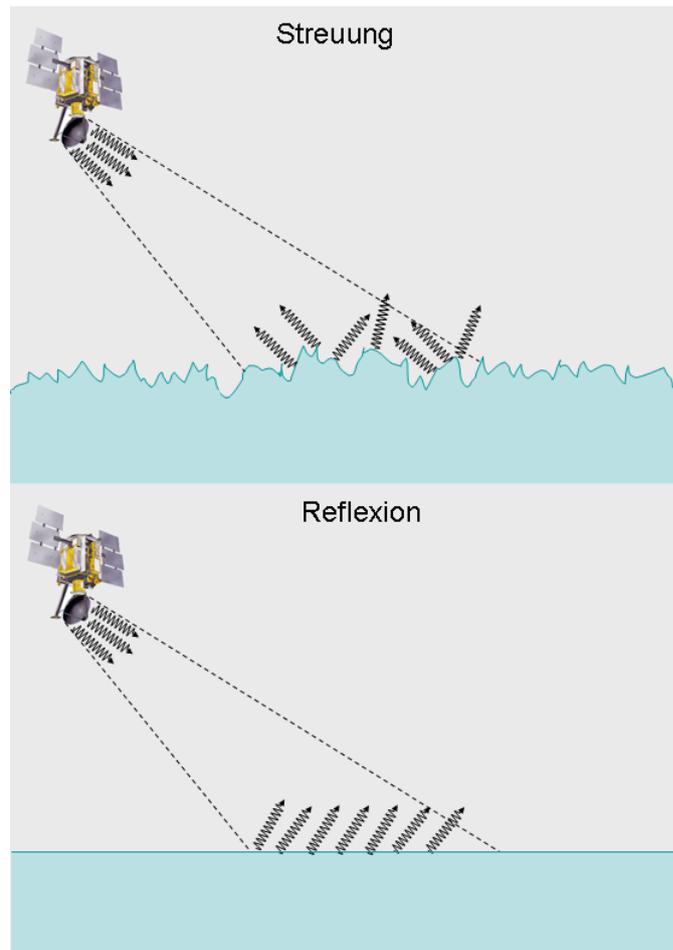
## **2.5. Windgeschwindigkeiten als Grundlage der Gasaustauschgeschwindigkeit**

### **2.5.1. Windgeschwindigkeit aus Satelliten-Scatterometermessungen**

Satellitenfernerkundung ermöglicht wiederholte Messungen, die den Globus umspannen und die besonders auch schwer erreichbare Gebiete abdecken. So können im Verlauf von Satellitenmissionen über dem Ozean kontinuierlich Messungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung stattfinden. Ein Messprinzip, das in der Satellitenfernerkundung angewendet wird, ist die Scatterometrie, die im folgenden Absatz kurz erläutert wird.

Die Sensoren, welche in der Scatterometrie benutzt werden, sind Antennen, die elektromagnetische Wellen (EM-Wellen) im Bereich der Radar-Frequenzen senden und empfangen. Die in der Scatterometrie häufig angewendeten Radarfrequenzen liegen im C-Band (4-8 GHz) und im Ku-Band (12-18 GHz). Das empfangene Signal ist abhängig vom Untergrund, der mit den EM-Wellen „beleuchtet“ wird: Im Fall einer glatten, spiegelnden Oberfläche würden die ausgesendeten EM-Wellen reflektiert und wären somit nach dem Reflexionsgesetz von der empfangenden Antenne weg gerichtet, veranschaulicht im unteren Teil von Abbildung 2.5. Bei bestehender Rauigkeit der Oberfläche, wie im oberen Teil von Abbildung 2.5 dargestellt, werden die EM-Wellen gestreut, so dass ein Teil der ausgesendeten Strahlung von der Antenne wieder empfangen wird. Für den eisfreien Ozean ist die Rauigkeit der Oberfläche eng verknüpft mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit, der mit Hilfe sogenannter geophysikalischer Modellfunktionen (GMF) aus dem an der Antenne empfangenen Signal abgeleitet werden kann.

Über eisbedeckten Wasserflächen kann die Ableitung der Windgeschwindigkeit aus der Scatterometrie nicht sinnvoll angewendet werden. Die Rückstreueigenschaften der Oberfläche werden hier von der Struktur des Eises bestimmt und erlauben somit keine realistischen Rückschlüsse auf die herrschende Windgeschwindigkeit. Scatterometer-Windfelder sind damit auf den eisfreien Ozean beschränkt. Im folgenden werden die aus satellitengestützter Scatterometrie abgeleiteten Windgeschwindigkeitsfelder kurz als „Satellitenwindgeschwindigkeiten“ bezeichnet.



**Abbildung 2.5.:** Prinzip der Scatterometrie

Mehrere Arbeiten verwenden Satellitenwindgeschwindigkeiten zur Berechnung globaler  $\text{CO}_2$ -Flüsse; diese Arbeiten sind bezüglich der verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Beziehungen und Winddaten in Tabelle 2.2 aufgelistet. Zu bemerken ist, dass die in diesen Arbeiten verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen so verwendet wurden, wie sie jeweils im Original veröffentlicht wurden. Das bedeutet, dass dem Umstand der bestehenden Unterschiede zwischen den einzelnen Windgeschwindigkeitsprodukten hier nicht Rechnung getragen wurde und dass Versätze zwischen den Gasaustauschgeschwindigkeiten aus unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsprodukten zu berücksichtigen sind. Im Fall der W92- und der WM99-Parametrisierung (siehe Tabelle 2.2) bedeutet das auch, dass der oben beschriebene Wanninkhof-Ansatz verwendet wurde. Einzelheiten zu den Satellitenmissionen ERS und QuikSCAT folgen in Abschnitt 3.1.1.

Veröffentlichung	k-u <sub>10</sub> -Beziehung	Winddaten aus Satelliten-Scatterometrie
Boutin u. a. (2002)	LM86, N00, WM99, W92	ERS-1
Carr u. a. (2002)	W92	QuikSCAT
Olsen u. a. (2005)	LM86, W92, WM99	QuikSCAT
Fangohr u. a. (2008)	W92, WM99	ERS, QuikSCAT
Boutin u. a. (2009)	LM86, W92, N00, H06	QuikSCAT

**Tabelle 2.2.:** Veröffentlichungen, die Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage von Satellitenwindgeschwindigkeiten berechnen. Abkürzungen der k-u<sub>10</sub>-Beziehungen beziehen sich auf ursprünglichen Veröffentlichungen: „LM86“: Liss u. Merlivat (1986), „N00“: Nightingale u. a. (2000), „WM99“: Wanninkhof u. McGillis (1999), „W92“: Wanninkhof (1992), „H06“: Ho u. a. (2006)

### 2.5.2. Windgeschwindigkeits-Daten von NCEP

Vielfach verwendete Windgeschwindigkeitsdaten sind die aus dem Reanalyse-Projekt der NCEP (National Centers for Environmental Prediction) stammenden. Hier wurden neben Feldern der Windgeschwindigkeiten auch andere atmosphärische Felder durch Assimilation der vorher qualitätsgeprüften Daten aus unterschiedlichen Quellen erzeugt. Näher beschrieben sind diese Daten in Kalnay u. a. (1996). Die Winddaten sind im Gegensatz zu den Scatterometer-Winddaten nicht auf den eisfreien Ozean begrenzt, sondern stehen global zur Verfügung.

# 3. Zeitreihe verbesserter Gasaustauschgeschwindigkeiten

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie verbesserte Gasaustauschgeschwindigkeiten mit dem Nögler-Ansatz berechnet werden. Dazu werden Scatterometerwinddaten der Satellitenmissionen ERS-1, ERS-2 und QuikSCAT verwendet, die bisher in anderen Arbeiten (siehe Tabelle 2.2) zur Bestimmung von Gasaustauschgeschwindigkeiten und CO<sub>2</sub>-Nettoflüssen verwendet wurden. Erstmals werden in der vorliegenden Arbeit Winddaten der Scatterometer auf den Satelliten MetOp-A und Oceansat-2, die seit 2007 bzw. 2009 im Orbit sind, benutzt, um Gasaustauschgeschwindigkeiten zu berechnen.

Zusätzlich zu den Windgeschwindigkeitsdaten sind zur Berechnung der Gasaustauschkoeffizienten Salzgehalts- und Temperaturdaten der Ozeanoberfläche nötig. Um die Auswirkungen der verbesserten Gasaustauschkoeffizienten auf die Abschätzung des globalen CO<sub>2</sub>-Nettoflusses zu bestimmen und so eine Vergleichbarkeit der bisher in der Literatur abgeschätzten Nettoflüsse aus dem Wanninkhof-Ansatz zu schaffen, sind klimatologische Felder der CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz nötig, mit denen die Felder der Gasaustauschkoeffizienten verknüpft werden.

Und schließlich, um die Frage des Einflusses der monatlichen Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten auf die monatliche Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses zu beantworten, wird die Zeitreihe der verbesserten Gasaustauschkoeffizienten verknüpft mit einer Zeitreihe kontemporärer CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenzen aus einer Modellsimulation. Hierzu wird zusätzlich zu den Scatterometer-Winddaten das Windprodukt der NCEP-Reanalyse verwendet.

Das Kapitel gliedert sich in die Beschreibung der verwendeten Windgeschwindigkeitsdaten, Daten der CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz und der Wasseroberflächendaten des Salzgehalts und der Temperatur (Unterabschnitt 3.1.1, 3.1.2 und 3.1.3). Danach folgt in Unterabschnitt 3.1.4 die detaillierte Beschreibung der Anwendung des Nögler-Ansatzes zur Ermittlung verbesserter Gasaustauschgeschwindigkeiten. Der Ansatz wird auf drei verschiedenen k-u<sub>10</sub>-Zusammenhänge angewendet.

In Unterabschnitt 3.1.5 wird erläutert, wie Jahresnettoflüsse und Zeitreihen von

CO<sub>2</sub>-Nettoflüssen mit den angewendeten Daten abgeschätzt werden, bevor in Unterabschnitt 3.1.6 ausführlich die Vorgehensweise zur Variabilitätsanalyse des CO<sub>2</sub>-Flusses hinsichtlich des Gasaustauschkoeffizienten dargestellt wird.

## 3.1. Daten und Methoden

### 3.1.1. Windgeschwindigkeit

#### Satellitengestützte Ableitung

In dieser Arbeit werden Scatterometer-Windgeschwindigkeitsdaten der Satellitenmissionen QuikSCAT, ERS-1/2, MetOp-A und Oceansat-2 verwendet. Eine Übersicht der verwendeten Daten findet sich in Tabelle 3.1.

Die Satellitenwindgeschwindigkeiten liegen in unterschiedlichen Verarbeitungsstufen vor. Die Daten von MetOp-A und Oceansat-2 werden als Schwad-Daten (auch Orbitaldaten genannt) verwendet, d.h. sie entsprechen in ihrer räumlichen und zeitlichen Zuordnung dem Aufnahmestreifen des Satelliten. Die verwendeten Daten von QuikSCAT und ERS hingegen sind gerastert, d.h. die ursprünglichen Schwad-Daten dieser Mission wurden auf ein Längengrad-Breitengradgitter interpoliert.

Mission	Dauer	Auflösung	
		zeitlich	räumlich
ERS-1	05.08.1991 - 02.06.1996	w und m	1°x1°
ERS-2	25.03.1996 - 15.01.2001	w und m	1°x1°
QuikSCAT	19.07.1999 - 19.11.2009	t, w und m	0.25°x0.25°
MetOp-A	28.03.2007 - 30.12.2012	Schwad-Daten	25 km
Oceansat-2	01.07.2011 - 30.12.2012	Schwad-Daten	50 km

**Tabelle 3.1.:** Übersicht der Satellitenwindgeschwindigkeiten, die Abkürzungen t, w und m stehen für täglich, wöchentlich und monatlich.



## QuikSCAT

Die QuikSCAT Daten werden von Remote Sensing Systems (RSS) hergestellt und sind durch das NASA Ocean Vector Winds Science Team gefördert. Die Daten stehen unter [www.remss.com](http://www.remss.com) zur Verfügung. Die QuikSCAT Windgeschwindigkeitsdaten beginnen im Juli 1999 und sind bis November 2009 verfügbar.

Die globalen Felder der QuikSCAT-Windgeschwindigkeit, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind tägliche, wöchentliche und monatliche Mittelwerte. Die Größe der Gitterzellen beträgt  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Das Scatterometer SeaWinds auf dem Satelliten QuikSCAT wird im Ku-Band betrieben; die geophysikalische Modellfunktion, mit der die Windgeschwindigkeiten aus dem empfangenen Radarsignal berechnet wird, ist Ku-2001 (Wentz u. a., 2001). Weitere Informationen zu diesen Windgeschwindigkeitsdaten sind unter [www.remss.com](http://www.remss.com) zu finden. Schwadlücken und Datenlücken aufgrund schlechter Datenqualität in den täglichen Windfeldern wurden durch räumliche lineare Interpolation gefüllt.

Die wöchentlichen und monatlichen Windgeschwindigkeitsfelder, so wie sie von RSS zur Verfügung gestellt werden, sind durch Regen kontaminiert (persönliche Kommunikation mit D. Smith von RSS). Eine Neuprozessierung ist nötig und wird hier vorgenommen.

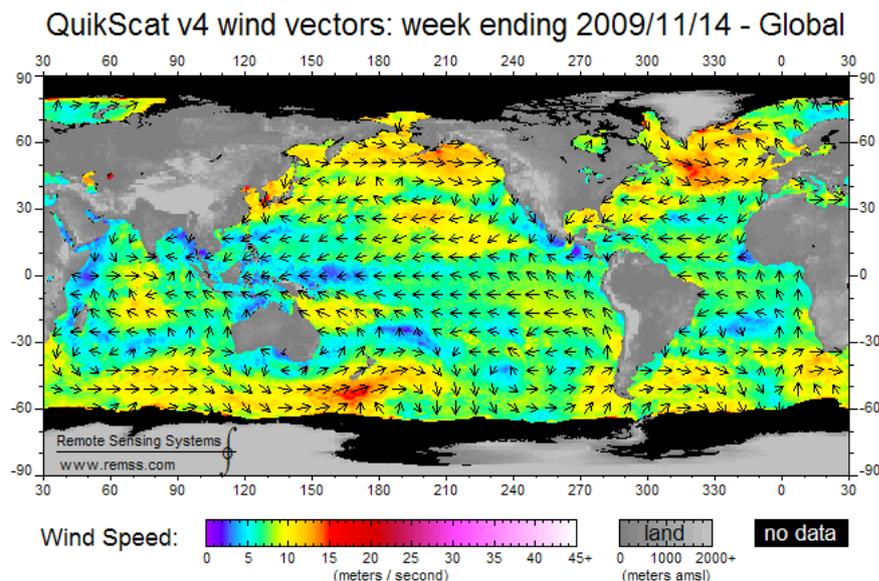
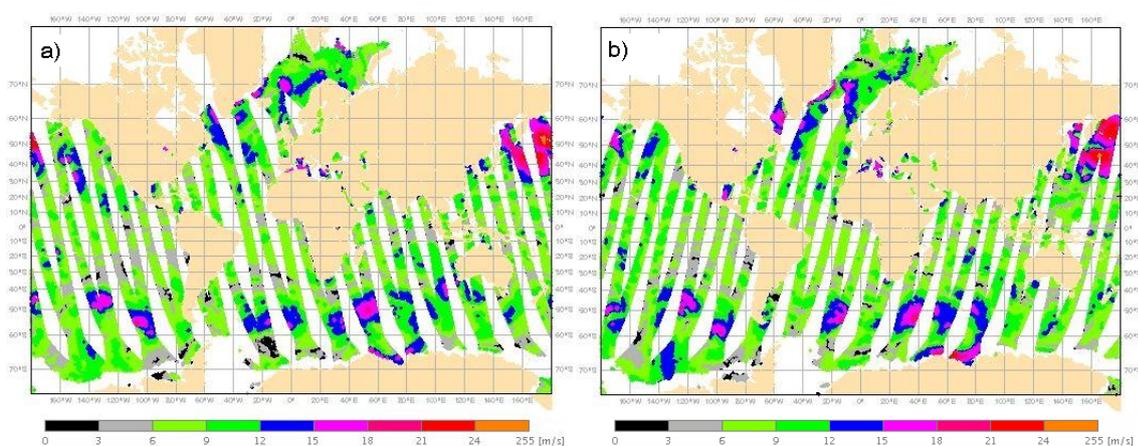


Abbildung 3.2.: QuikSCAT, Wochenmittel für den Zeitraum 8.11.2009-14.11.2009

**Neuprozessierung der QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsdaten** Um den Regeneffekt auf die Windgeschwindigkeitsmessungen zu reduzieren, werden die monatlichen und wöchentlichen Mittelwerte neu berechnet. Hierzu werden über die täglichen Felder entsprechende Mittelwerte gebildet, wobei solche Gitterzellen, die Regen zeigten oder deren Nachbarn Regen zeigten, nicht berücksichtigt werden und vor der Mittelwertbildung durch lineare, räumliche Interpolation gefüllt wurden. Ebenso wurde mit Schwadlücken verfahren. Tägliche Felder, so wie sie hieraus entstehen, bilden die Basis für die Wochenmittel und Monatsmittel, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden.

## MetOp-A

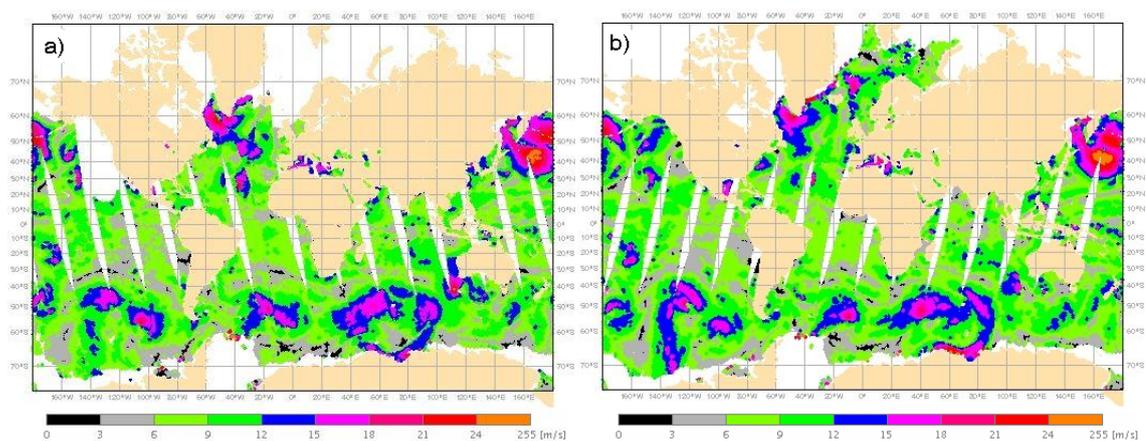
Die Windgeschwindigkeitsdaten basieren auf Messungen der zur Zeit stattfindenden europäischen Satellitenmission MetOp-A und werden vom KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) in den Niederlanden zur Verfügung gestellt. Sie liegen ab März 2007 vor und laufen weiterhin auf. Für diese Arbeit wurden Daten bis einschließlich Dezember 2012 verwendet. Die verwendeten Schwaddaten sind in Gitterzellen von 25 km Kantenlänge unterteilt. Das verwendete Scatterometer ASCAT (Advanced SCATterometer) auf dem Satelliten wird im C-Band betrieben; die Windgeschwindigkeit wird mit Hilfe der GMF CMOD5.n (Verhoef u. Hersbach, 2008) aus der Radarrückstreuung berechnet. Verhoef u. Stoffelen (2012a) bieten weitere Informationen zu diesen Daten.



**Abbildung 3.3.:** MetOp-A, Windgeschwindigkeitsdaten in Schwad-Form für den 16.1.2013, a) aufsteigender Überflug (in nördliche Richtung), b) absteigender Überflug (in südliche Richtung) ©2013 EUMETSAT

#### Oceansat-2

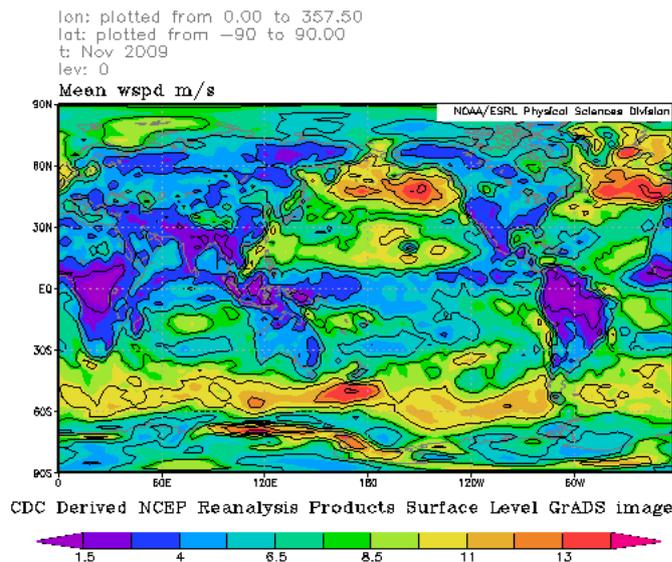
Das KNMI stellt ebenfalls die Windgeschwindigkeitsdaten der laufenden, indischen Satellitenmission Oceansat-2 zur Verfügung. Sie liegen ab Juli 2011 vor und laufen weiterhin auf. Für diese Arbeit werden Daten bis einschließlich Dezember 2012 benutzt. Die verwendeten Schwaddaten sind in Gitterzellen von 50 km Kantenlänge unterteilt. Das verwendete Scatterometer OSCAT auf dem Satelliten wird im Ku-Band betrieben; die Windgeschwindigkeit wird mit Hilfe der GMF NSCAT-3 aus der Radarrückstreuung berechnet. Verhoef u. Stoffelen (2012b) bieten weitere Informationen zu diesen Daten.



**Abbildung 3.4.:** Oceansat-2, Windgeschwindigkeitsdaten in Schwad-Form für den 16.1.2013, a) aufsteigender Überflug (in nördliche Richtung), b) absteigender Überflug (in südliche Richtung) ©2013 EUMETSAT

#### Reanalyse (NCEP)

Die Winddaten stehen global und ab dem Jahr 1948 zur Verfügung und werden laufend fortgesetzt. Diese Daten werden auf einem Gauss'schen Gitter zur Verfügung gestellt und werden hier als tägliche und monatliche Mittelwerte für den Zeitraum verwendet, in dem auch die Satellitenwinde vorliegen. Weitere Dokumentation zu diesen Winddaten findet sich in Kalnay u. a. (1996).



**Abbildung 3.5.:** NCEP Windgeschwindigkeit, Monatsmittel für November 2009, (Die Abbildung wurde von der „Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado“ auf der Web-Seite <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> zur Verfügung gestellt.)

### 3.1.2. CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz

#### Monatliche Karten für 1995 und 2000

Aus Messungen des CO<sub>2</sub> -Partialdrucks im Oberflächenwasser erstellen Takahashi u. a. (2002), Takahashi u. a. (2009a) und Takahashi u. a. (2009b) monatliche globale Karten der CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz zwischen Ozean und Atmosphäre. In dieser Arbeit werden Daten für die Jahre 1995 und 2000 verwendet und im Folgenden als Takahashi2002 und Takahashi2009 bezeichnet. Die Daten liegen auf einem Gitter mit einer Zellengröße von 4° in der geographischen Breite und 5° in der geographischen Länge vor. Abbildung 2.3 stellt ein zeitliches Mittel der Takahashi2009-Daten dar.

#### Simulierte Zeitserie

Zur Berechnung einer Zeitreihe von CO<sub>2</sub>-Flüssen mit den verbesserten Gasaustauschkoeffizienten wird eine Zeitreihe von CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenzen hinzugezogen. Diese stammt aus der Simulation des Kohlenstoffkreislauf-Modells HAMOCC5 (Hamburg Ocean Carbon Cycle Model, Version 5, Maier-Reimer u. a. 2005), welches on-line mit dem Ozean-Meereismodell MPI-OM (Max-Planck-Institute Ocean Model, Marsland u. a. (2003)) gekoppelt ist.

Das Modell simuliert für den Zeitraum 1948-2003 unter Berücksichtigung des steigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts kontemporäre CO<sub>2</sub>-Flüsse zwischen Ozean und Atmosphäre. Außerdem wird eine Zeitserie von Monatsmitteln des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks im Oberflächenwasser erzeugt. Zusammen mit atmosphärischen pCO<sub>2</sub> Messungen wird in dieser Arbeit eine Zeitserie von Monatsfeldern der CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz zwischen Ozean und Atmosphäre erstellt. Das Originalgitter dieser Daten ist ein orthogonal-curvilineares C-Gitter, so wie es von MPI-OM benutzt wird. Die Pole sind dabei über Grönland und der Antarktis, die räumliche Auflösung beträgt ungefähr 3°.

Der Gasaustauschkoeffizient in diesem Modell basiert auf NCEP - Windgeschwindigkeitsdaten (Kalnay u. a., 1996) in täglicher Auflösung und wird in quadratischer Abhängigkeit von dieser berechnet. Der Proportionalitätsfaktor für den quadratischen Zusammenhang ist 0.337. Weitere Informationen zu dem Modell sind in Wetzel u. a. (2005) und Wetzel (2004) zu finden. Nachfolgend wird die Zeitserie von monatlichen globalen Feldern der CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz als HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$  bezeichnet.

### 3.1.3. Temperatur und Salzgehalt

#### Wasseroberflächentemperatur

Zusammen mit den Takahashi2002 und Takahashi2009-  $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten werden Daten der Wasseroberflächentemperatur (SST, "Sea Surface Temperature") zur Verfügung gestellt. Diese SST-Daten haben die gleiche räumliche und zeitliche Auflösung wie die  $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten. Für das Referenzjahr 1995 sind die Quelle dieser Daten monatliche 1°x1°-Karten der NODC World Ocean Database 1998 (Version 2, The National Oceanographic Data Center, NOAA, Washington, DC). Die Daten für das Referenzjahr 2000 basieren auf monatlichen 1°x1°-Karten von NOAA Climate Diagnostic Center Optimum Interpolation.

Zusätzlich wird in dieser Arbeit eine SST-Zeitserie von 1991-2012 verwendet. Die Quelle dafür ist der HadISST-Meereis- und SST-Datensatz des Hadley Centre. Die Daten liegen als monatliche Karten auf einem 1°x1°-Gitter vor. Weitere Informationen sind zu finden in Rayner u. a. (2003).

#### Wasseroberflächensalzgehalt

Analog zu den SST-Daten, werden auch Daten des Wasseroberflächensalzgehalts (SSS, "Sea Surface Salinity") zusammen mit den Takahashi2002 und Takaha-

shi2009  $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten bereitgestellt und in dieser Arbeit verwendet. Für beide Referenzjahre (1995 und 2000) stammen die SSS-Daten aus der NODC World Ocean Database 1998.

Zusammen mit der HadISST-Zeitreihe werden klimatologische SSS des World Ocean Atlas 2009 (Antonov u. a., 2010) verwendet.

**Kombination der Felder** Wenn mathematische Operationen zwischen den oben beschriebenen Feldern durchgeführt werden, müssen diese konsistent sein, was die Feldgröße angeht. Alle Felder außer den HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$ - und den NCEP-Winddaten sind auf regelmäßigen Längengrad-Breitengrad-Gittern.

Für die Berechnung von  $\text{CO}_2$ -Flüssen aus den Takahashi- $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten, werden alle Felder der jeweiligen Kombination räumlich an das Feld mit der höchsten räumlichen Auflösung angepasst. Alle Felder mit einer geringeren räumlichen Auflösung erfahren eine Interpolation auf das höher aufgelöste Gitter durch die 'nearest-neighbour'-Methode. Dasselbe gilt für die zeitliche Interpolation: eine Interpolation nach der 'nearest-neighbour'-Methode wird auf alle Felder mit geringerer zeitlicher Auflösung angewendet.

Für die Berechnung von  $\text{CO}_2$ -Flüssen mit der HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$ -Zeitreihe, werden alle Felder mit der 'nearest-neighbour'-Methode auf das C-Gitter des Modells interpoliert.

### 3.1.4. Gasaustauschgeschwindigkeit

In dieser Arbeit werden drei verschiedene Zusammenhänge zwischen Gasaustauschgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit benutzt: eine quadratische, eine kubische und eine hybride Form, beschrieben in den folgenden Gleichungen:

$$k = b_2 \cdot u_{10}^2 \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \quad (3.1)$$

$$k = b_3 \cdot u_{10}^3 \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \quad (3.2)$$

$$k = \left(3 + 0.1 \cdot u_{10} + b_{hybrid} \cdot u_{10}^2 + 0.011 \cdot u_{10}^3\right) \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \quad (3.3)$$

Die Windgeschwindigkeit wird hierfür in der Einheit m/s verwendet; die resultierende Gasaustauschgeschwindigkeit hat die Einheit cm/h. Der quadratische Zusammenhang wurde zuerst von Wanninkhof (1992) veröffentlicht und steht nach Wanninkhof u. a. (2009) im Einklang mit der Theorie, dass der Gasaustausch von der Windschubspannung<sup>1</sup> abhängt, die wiederum quadratisch abhängig ist von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe. Der kubische Zusammenhang wurde zuerst von Wanninkhof u. McGillis (1999) veröffentlicht und basiert nach Wanninkhof u. McGillis (1999) auf der Theorie, dass der Gasaustausch bei geringen Windgeschwindigkeiten durch Oberflächenfilme gedämpft wird und bei hohen Windgeschwindigkeiten durch die Entstehung von Blasen während des Wellenbrechens verstärkt wird. Die hybride Parametrisierung ist ein Polynom dritten Grades und bildet mehrere Prozesse ab, die zum Gasaustausch beitragen. Diese Parametrisierung ist genauer beschrieben in Wanninkhof u. a. (2009). Es wird davon ausgegangen, dass, unabhängig von der Windgeschwindigkeit, chemische Verstärkung und Auftriebsstrom auf den Gasaustausch wirken. Es wird abgeschätzt, dass diese beiden Einflüsse zusammen 3 cm/h der Gasaustauschgeschwindigkeit ausmachen. Der lineare Term basiert auf der von Deacon (1977) entwickelten Beziehung, nach der die Gasaustauschgeschwindigkeit für niedrige Windgeschwindigkeiten von der Schubspannungsgeschwindigkeit<sup>2</sup> abhängt, die wiederum linear abhängig ist von der Windgeschwindigkeit. Der Koeffizient für diesen Term wird als 0.1 abgeschätzt. Der kubische Term in dieser Beziehung findet seine Begründung darin, dass der Gasaustausch nach Woolf (2005) mit der Bedeckung der Wasseroberfläche mit Schaumkronen linear zusammenhängt und dass diese Bedeckung wiederum von  $u_{10}^3$  abhängt. Der Koeffizient für diesen Term ist 0.011.

$b_2$ ,  $b_3$  und  $b_{hybrid}$  sind Skalierungsfaktoren und werden wie folgt abgeleitet: Es wird zunächst angenommen, dass es keine aktuellere Abschätzung des globalen  $^{14}\text{C}$ -Bestands gibt, als die von Nägler (2009) veröffentlichte. Alle k- $u_{10}$ -Beziehungen werden dann an die aus der  $^{14}\text{C}$ -Inventur abgeleitete mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit von 16.5 cm/h angepasst. Für die quadratische und kubische Abhängigkeit ergeben sich damit die folgenden zwei Gleichungen zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren  $b_2$  und  $b_3$  :

$$b_2 = 16.5 \cdot \frac{1}{\left\langle u_{10}^2(x, t) \cdot \left( \frac{Sc(x, t)}{660} \right)^{-0.5} \right\rangle} \quad (3.4)$$

---

<sup>1</sup>engl.: wind stress

<sup>2</sup>engl.: friction velocity

$$b_3 = 16.5 \cdot \frac{1}{\left\langle u_{10}^3(x, t) \cdot \left(\frac{Sc(x, t)}{660}\right)^{-0.5} \right\rangle} \quad (3.5)$$

Die Klammern  $\langle \rangle$  stehen für ein globales, flächengewichtetes zeitliches Mittel. Die Bestimmung des Skalierungsfaktors  $b_{hybrid}$  für die hybride Parametrisierung folgt dem Verfahren, das in Wanninkhof u. a. (2009) beschrieben wurde. Nach Wanninkhof u. a. (2009) sind drei der Koeffizienten aus veröffentlichten Zusammenhängen zwischen der Gasaustauschgeschwindigkeit und verschiedenen Prozessen abgeleitet. Der vierte Koeffizient, der für den quadratischen Term, wird dann wie folgt durch die globale  $^{14}\text{C}$ -Randbedingung bestimmt:

$$b_{hybrid} = \frac{16.5 - 3 \cdot \left\langle \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \right\rangle - 0.1 \cdot \left\langle u_{10} \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \right\rangle - 0.011 \cdot \left\langle u_{10}^3 \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \right\rangle}{\left\langle u_{10}^2 \cdot \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \right\rangle} \quad (3.6)$$

Aus Übersichtsgründen wurde in Gleichung 3.6 die Abhängigkeit von Ort und Zeit,  $(x, t)$ , der Windgeschwindigkeit und der Schmidt-Zahl nicht ausgeschrieben. Der Zeitraum, über den gemittelt wird, entspricht dem Zeitraum der Satellitenmissionen, siehe auch Tabelle 3.1. Die Felder der Schmidt-Zahl  $Sc$  werden aus den in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Feldern nach der Formel wie in Wanninkhof (1992) berechnet. Tabelle 3.2 fasst die Skalierungsfaktoren, wie sie für die Satelliten-Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen zeitlichen Auflösungen zusammen mit den zuvor beschriebenen SST-Daten bestimmt wurden, zusammen.

SST-Klimatologie (WOD98) (Takahashi2002)	ERS-1		ERS-2		QuikSCAT		
	w	m	w	m	t	w	m
b2	0.2893	0.2945	0.3050	0.3092	0.2441	0.2626	0.2706
b3	0.0332	0.0352	0.0356	0.0375	0.0233	0.0288	0.0312
b_hybrid	0.1284	0.1361	0.1426	0.1493	0.0735	0.1029	0.1141

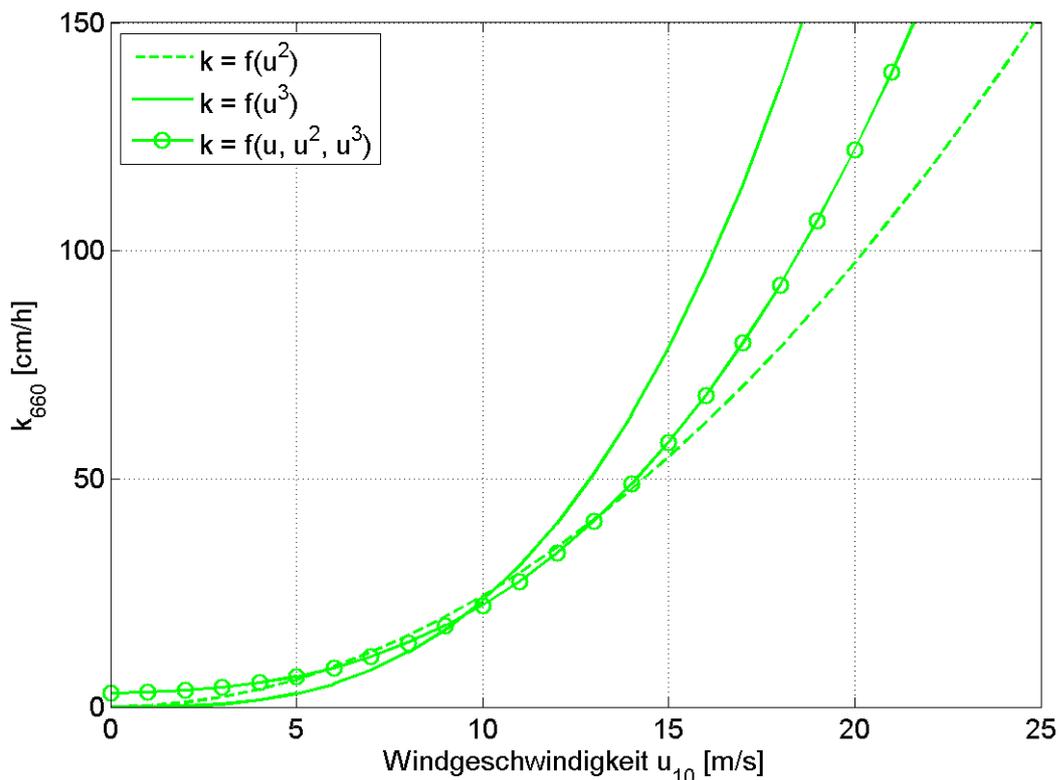
SST-Klimatologie (NOAA) (Takahashi2009)	ERS-1		ERS-2		QuikSCAT		
	w	m	w	m	t	w	m
b2	0.2885	0.2936	0.3041	0.3083	0.2434	0.2619	0.2698
b3	0.0331	0.0351	0.0355	0.0374	0.0233	0.0287	0.0311
b_hybrid	0.1275	0.1352	0.1417	0.1484	0.0728	0.1022	0.1133

SST-Zeitserie (HadISST)	ERS-1		ERS-2		QuikSCAT		
	w	m	w	m	t	w	m
b2	0.2942	0.2996	0.3105	0.3149	0.2452	0.2645	0.2724
b3	0.0342	0.0363	0.0367	0.0387	0.0237	0.0294	0.0319
b_hybrid	0.1324	0.1402	0.1468	0.1537	0.0744	0.1044	0.1155

SST-Zeitserie (HadISST)	MetOp-A	Oceansat-2
b2	0.2472	0.2472
b3	0.0247	0.0244
b_hybrid	0.0817	0.0801

**Tabelle 3.2.:** Skalierungsfaktoren für die  $k-u_{10}$ -Beziehungen nach Gleichung 3.4, 3.5 und 3.6. w, m und t steht für die zeitlichen Auflösungen der Felder: wöchentlich, monatlich und täglich.

In Abbildung 3.6 sind die drei Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit und Gasaustauschgeschwindigkeit nach Gleichung 3.1, 3.2 und 3.3 dargestellt. Für den Vergleich der drei Kurven in Abbildung 3.6 ist es irrelevant, für welches der Windgeschwindigkeitsprodukte die drei Parametrisierungen betrachtet werden. Die Skalierungsfaktoren wurden deswegen hierfür willkürlich gewählt und entsprechen denen für die QuikSCAT-täglichen Windgeschwindigkeiten für die SST-Klimatologie von NOAA (Tabelle 3.2, mittlerer Teil). Im Vergleich der drei Parametrisierungen untereinander stellen sich zwei Regime der Windgeschwindigkeit dar: Im ersten Regime, das einem Windgeschwindigkeitsbereich von 0 - 10 m/s entspricht, liefert die kubische Parametrisierung (Gleichung 3.2) die niedrigsten Gasaustauschgeschwindigkeiten. Für Windgeschwindigkeiten  $> 10$  m/s, also für das zweite Regime der Windgeschwindigkeit, sind die höchsten Gasaustauschgeschwindigkeiten in der kubischen Parametrisierung zu erkennen, die niedrigsten in der quadratischen und die Werte der hybriden Parametrisierung liegen dazwischen.



**Abbildung 3.6.:** Funktionale Zusammenhänge zwischen der Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  und der Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$ . Grundlage sind die in Gleichung 3.1, 3.2 und 3.3 dargestellten Beziehungen. Die Wahl der Faktoren entspricht den täglichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten für die SST-Klimatologie von NOAA.

### 3.1.5. Berechnung des CO<sub>2</sub>-Austauschs

Die oben beschriebenen Satelliten-  $u_{10}$ -Felder, die SST- und SSS-Felder werden verwendet, um Felder der Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  und des Gasaustauschkoeffizienten  $K$  mit den oben genannten Parametrisierungen zu berechnen.

Die Löslichkeit  $s$  wird aus den SSS- und SST- Feldern nach Weiss (1974) berechnet. Für diese Arbeit werden die in diesem Kapitel beschriebenen  $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten mit den Gasaustauschkoeffizienten der verschiedenen Windgeschwindigkeitsprodukte kombiniert und so CO<sub>2</sub>-Flüsse berechnet. Für die Takahashi-2002 und Takahashi-2009-Daten werden die Flüsse für ein Jahr ermittelt, für die HAMOCC5-Daten ergibt sich eine Zeitreihe der CO<sub>2</sub>-Flüsse für den Zeitraum der Überschneidung der Satellitenmissionen und der HAMOCC5-Zeitserie. Dieses entspricht dem Zeitraum von 1991-2003.

### 3.1.6. Variabilitätsanalyse des CO<sub>2</sub>-Flusses

Dieser Abschnitt beschreibt die angewendeten Methoden zur Variabilitätsanalyse des CO<sub>2</sub>-Flusses. Insbesondere dient diese Analyse dazu, zum einen zu klären, welchen Anteil an der zeitlichen Variabilität des globalen und des regionalen CO<sub>2</sub>-Flusses der Gasaustauschkoeffizient hat und zum anderen, darauf aufbauend, mögliche regionale Sensitivitäten der CO<sub>2</sub>-Fluss-Variabilität gegenüber der Wahl des für die Ableitung des Gasaustauschkoeffizienten benötigten Windgeschwindigkeitsprodukts (NCEP oder QuikSCAT) zu identifizieren. Hierfür werden zunächst drei verschiedene Berechnungen der Zeitreihe des CO<sub>2</sub>-Flusses vorgenommen. Diese Berechnungen werden Läufe genannt und sind Kombinationen aus zeitlich variablen und konstanten Feldern des Gasaustauschkoeffizienten ( $K$ ) und  $\Delta p\text{CO}_2$ .  $K$  basiert in diesem Fall auf der quadratischen  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierung nach Gleichung 3.1 unter Verwendung des Nögler-Ansatzes. In einem Lauf werden die  $K$ - Zeitreihe und die HAMOCC5-Zeitreihe miteinander kombiniert. Monatliche Variabilität ist in beiden Feldern gegeben. Dieser Lauf ist der Referenzlauf. Ein zweiter Lauf lässt monatliche Variabilität nur in den  $K$ -Feldern zu. Dieses ist der  $K$ -Lauf. Die hier verwendeten  $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten entsprechen dem zeitlichen Mittel der HAMOCC5-Daten. Der dritte Lauf ist der  $\Delta p\text{CO}_2$ -Lauf und kombiniert die HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$ -Zeitreihe mit dem zeitlichen Mittel des Gasaustauschkoeffizienten. Dieser Lauf ist der  $\Delta p\text{CO}_2$ -Lauf. Tabelle 3.4 auf Seite 62 gibt eine Übersicht über die Läufe. Aus diesen drei Läufen werden sowohl der global integrierte Nettofluss als auch die über einzelne Regionen integrierten Nettoflüsse betrachtet und hinsichtlich der Variabilität analysiert. In regionaler Betrachtung wird der Einfluss

der monatlichen Variabilität von  $K$ , von  $\Delta pCO_2$  und der Einfluss der Kovariation der beiden im Hinblick auf die monatliche Variabilität des  $CO_2$ -Flusses untersucht. Nach Brown u. Alexander (1991), die eine Methode zeigen, mit der die totale Varianz eines Produktes in den Beitrag der einzelnen Faktoren und der Kovarianz der Faktoren aufgeteilt werden kann, ist die totale skalierte Varianz des  $CO_2$ -Flusses,  $var(F)^*$ , wie folgt beschrieben:

$$\begin{aligned}
 var(F)^* &= \frac{var(F)}{\bar{K}^2 \cdot \overline{\Delta pCO_2}^2} \\
 &= \underbrace{\frac{var(\Delta pCO_2)}{\overline{\Delta pCO_2}^2}}_A + \underbrace{\frac{var(K)}{\bar{K}^2}}_B + \underbrace{\frac{2 \cdot cov(K, \Delta pCO_2)}{\bar{K} \cdot \overline{\Delta pCO_2}}}_C + D
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Die Überstriche stehen hierbei für die zeitliche Mittelwertbildung und  $cov(K, \Delta pCO_2)$  steht für die Kovarianz von  $K$  und  $\Delta pCO_2$ . Der Term D setzt sich aus Kovariationstermen höherer und gemischter Ordnung zusammen und ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 D &= 2 \cdot \overline{\delta K \cdot \delta \Delta pCO_2^2} + 2 \cdot \overline{\delta K^2 \delta \Delta pCO_2} \\
 &\quad + \overline{\delta K^2 \delta \Delta pCO_2^2} - \overline{\delta K \cdot \delta \Delta pCO_2}^2
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

mit  $\delta K = \frac{K - \bar{K}}{\bar{K}}$  und  $\delta \Delta pCO_2 = \frac{\Delta pCO_2 - \overline{\Delta pCO_2}}{\overline{\Delta pCO_2}}$ .

Die totale skalierte Varianz ergibt sich somit als die Summe folgender Terme: der quadrierte Variationskoeffizient<sup>3</sup> von  $\Delta pCO_2$  (im folgenden bezeichnet als A), der quadrierte Variationskoeffizient von  $K$  (Term B), der Kovarianzterm (Term C) und Kovariations-Terme höherer und gemischter Ordnung (zusammengefasst als Term D). Zu erwähnen ist, dass Term A und B aufgrund der Quadrierung immer positiv sind. Das bedeutet, sie sind eine globale Varianz-Quelle. Term C and D hingegen können auch eine Senke von Varianz sein. Das bedeutet, dass sowohl das Vorzeichen von Term C als auch das von Term D regional wechseln kann.

<sup>3</sup>Der quadrierte Variationskoeffizient einer Variablen  $a$  ist definiert als  $varcoeff^2 = (\frac{\sigma_a}{\bar{a}})^2$ , also dem quadrierten Quotienten aus Standardabweichung und Mittelwert

Tabelle 3.6 auf Seite 66 fasst die wesentlichen Aspekte der totalen skalierten Varianz des  $\text{CO}_2$ -Flusses als Summe der Terme A bis D zusammen.

Randbemerkung zu den Termen A und B: Es ist leicht zu zeigen, dass die totale skalierte Varianz des  $\Delta p\text{CO}_2$ -Laufs bzw. des K-Laufs dem Term A bzw. dem Term B entspricht.

## 3.2. Ergebnisse

### 3.2.1. Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten

Es bestehen Unterschiede zwischen den Windgeschwindigkeitsfeldern aus den beiden Satellitenmissionen ERS-1/2 und QuikSCAT (siehe auch Nägler u. a. (2006)). Um dieses näher zu verdeutlichen, zeigt der obere Teil der Abbildung 3.7 eine Zeitserie der arithmetisch mittleren globalen Windgeschwindigkeit aus den drei Satellitenmissionen, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Die Felder der Monatsmittel der Windgeschwindigkeit bilden die Basis für diese Zeitreihe, ein Flächengewicht für die Felder wurde bei der räumlichen Mittelwertbildung berücksichtigt.

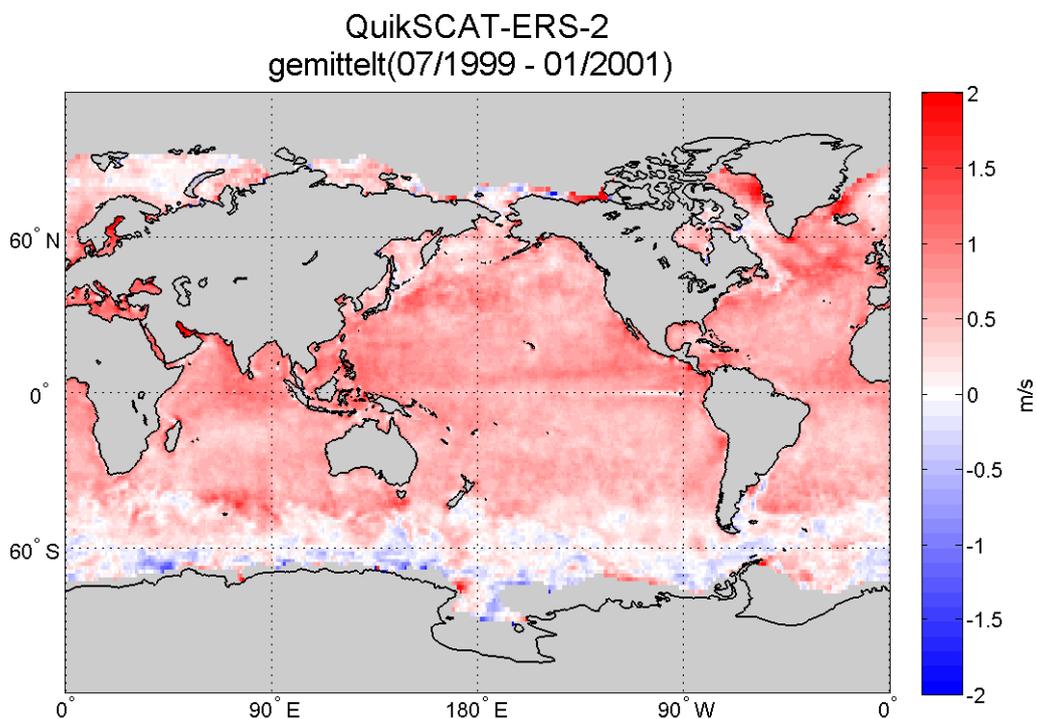
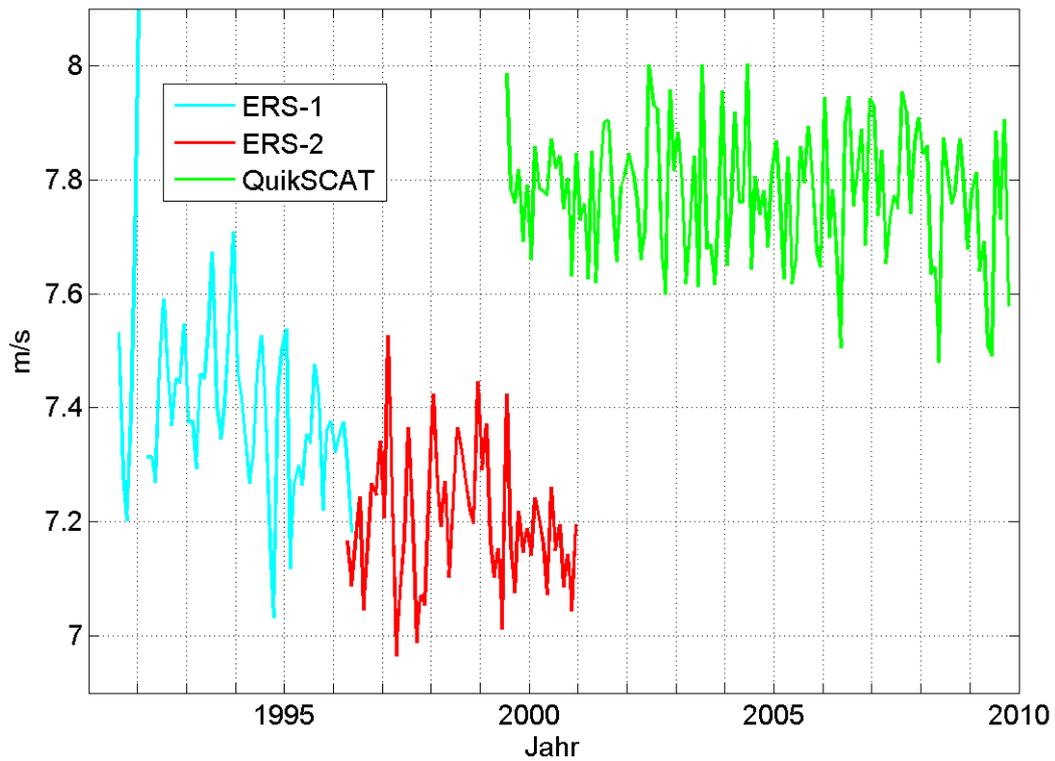
Zu erkennen ist, dass die mittlere Windgeschwindigkeit der QuikSCAT-Mission deutlich über denen der ERS-Missionen 1 und 2 liegt. Die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für den Zeitraum der einzelnen Missionen sind 7.8 m/s für QuikSCAT, 7.4 m/s für ERS-1 und 7.2 m/s für ERS-2.

In der räumlichen Verteilung der Windgeschwindigkeitsunterschiede zwischen ERS-2 und QuikSCAT (dargestellt im unteren Teil von Abbildung 3.7) zeigt sich, dass die QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten fast überall höher sind als die der ERS-2-Mission, zu sehen an der fast durchgehend roten Farbe der Karte. In den hohen südlichen Breiten hingegen sind blau gefärbte Bereiche zu erkennen; sie markieren Gebiete, in denen die ERS-2-Windgeschwindigkeiten höher sind als die der QuikSCAT-Mission.

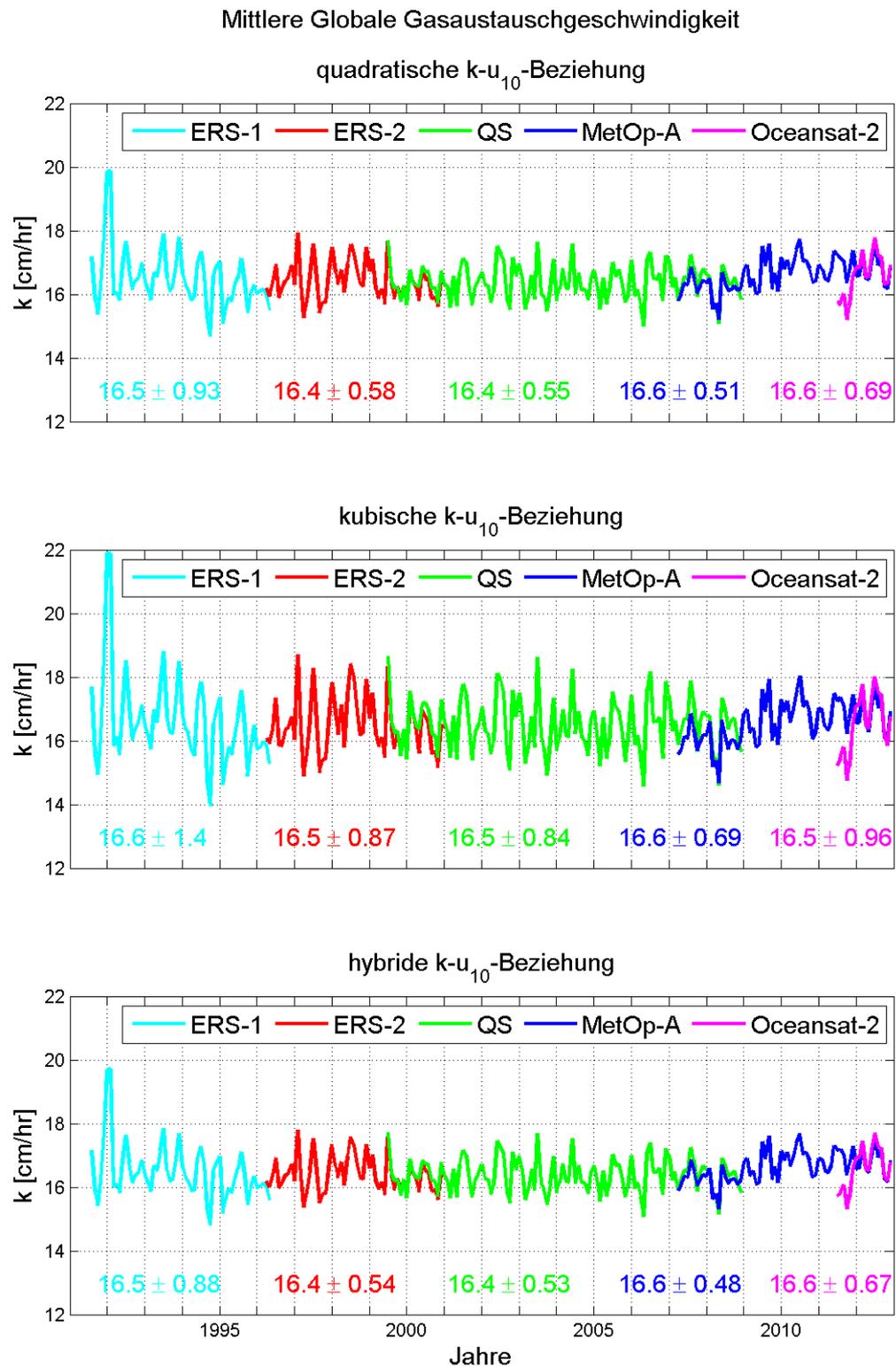
### 3.2.2. Gasaustauschgeschwindigkeit

Die nach Gleichung 3.1, 3.2 und 3.3 ermittelte Gasaustauschgeschwindigkeit für die Zeit der Satellitenmissionen ist in Abbildung 3.8 als monatlicher globaler Mittelwert dargestellt.

Die Unterschiede, wie sie zwischen den Windgeschwindigkeiten in Abbildung 3.7 zu erkennen sind, sind in den Gasaustauschgeschwindigkeiten aus den verschiedenen Satellitenmissionen auf Grund der Anpassung der  $k\text{-}u_{10}$ -Parametrisierungen



**Abbildung 3.7.:** Oben: Flächengewichtetes, arithmetisches, globales Mittel der Windgeschwindigkeit auf Basis der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Satellitenwinde (Monatsmittel).  
Unten: Mittlerer Unterschied in der Windgeschwindigkeit, basierend auf Monatsmitteln



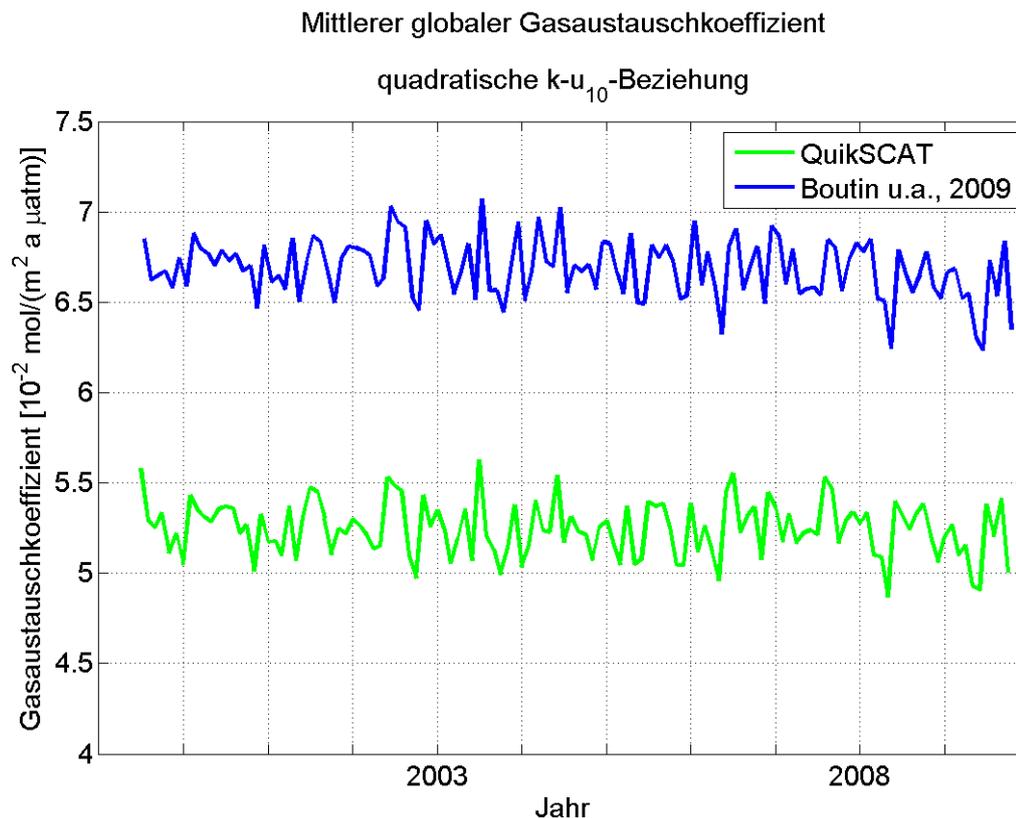
**Abbildung 3.8.:** Zeitreihe der verbesserten Gasaustauschgeschwindigkeiten aus Satelliten-Scatterometer-Winddaten auf Grundlage der Parametrisierungen nach Gleichung 3.1, 3.2 und 3.3. Zusätzlich angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Gasaustauschgeschwindigkeit.

nach Nögler (2009), wie in Unterabschnitt 3.1.4 beschrieben, nicht mehr zu sehen. Eine Vergleichbarkeit mittlerer globaler Gasaustauschgeschwindigkeiten abgeleitet aus verschiedenen Windgeschwindigkeitsprodukten ist damit gegeben. Bisher veröffentlichte, aus Satellitenwinddaten abgeleiteten Gasaustauschgeschwindigkeiten basieren auf den Satellitenmissionen ERS-1, ERS-2 und QuikSCAT (siehe Tabelle 2.2). Erstmals werden in dieser Arbeit Gasaustauschgeschwindigkeiten der aktuell andauernden Satellitenmissionen MetOp-A und Oceansat-2 bis einschließlich Dezember 2012 auf Basis des Nögler-Ansatzes präsentiert. Damit umfasst der Zeitraum, in dem Gasaustauschgeschwindigkeiten aus Satellitenscatterometermessungen vorliegen, fast 22 Jahre.

Zum Vergleich mit den von Boutin u. a. (2009) publizierten Gasaustauschkoeffizienten der QuikSCAT-Mission sind die hier ermittelten Gasaustauschkoeffizienten für die quadratische Parametrisierung in Abbildung 3.9 dargestellt.

Hier zeigt sich deutlich der Unterschied in den Gasaustauschkoeffizienten zwischen der quadratischen Parametrisierung nach dem Nögler-Ansatz und der ursprünglich publizierten (Wanninkhof, 1992). Hauptgrund dafür sind die unterschiedlichen globalen Randbedingungen ( $k_{av}$  von 16.5 cm/h im Vergleich zu 21.9 cm/h), die den Parametrisierungen zugrunde liegen (siehe auch Abschnitt 2.4).

Für das Jahr 2000, das in der Zeit der Überschneidung der QuikSCAT- und der ERS-2-Mission liegt, sind zonale Mittel der Gasaustauschgeschwindigkeit in Abbildung 3.10 dargestellt. Auch hier ist kein Versatz in der Anwendung der einzelnen Windgeschwindigkeitsprodukte zu erkennen. Allerdings fällt auf, dass die QuikSCAT-Gasaustauschgeschwindigkeiten fast überall die ERS-2-k-Werte überschreiten, außer in einem Bereich zwischen ungefähr  $-65^\circ$  und  $-45^\circ$ . Grund hierfür sind die höheren ERS-2-Windgeschwindigkeiten in diesem Gebiet, wie in Abbildung 3.7 zu sehen. In Abbildung 3.10 lässt sich zudem die Betonung der beiden Regime der Windgeschwindigkeit durch die Parametrisierungen erkennen. In dem Bereich  $-60^\circ$  bis  $-40^\circ$  z.B. sind deutlich höhere k-Werte für die kubische Parametrisierung (mittlere Tafel der Abbildung 3.10) zu erkennen als für die anderen beiden k- $u_{10}$ -Beziehungen. In niedrigen Breiten ( $15^\circ\text{S}$ - $15^\circ\text{N}$ ) hingegen liefert die kubische der drei Parametrisierungen die niedrigsten Gasaustauschgeschwindigkeiten. Im Vergleich der kubischen und der quadratischen Parametrisierung sind diese Ergebnisse konsistent mit denen von Boutin u. a. (2002), die Gasaustauschkoeffizienten aus ERS-1-Winddaten vergleichen. Fangohr u. a. (2008) vergleichen Gasaustauschgeschwindigkeiten aus Windgeschwindigkeiten von AMSR-E (Advanced Scanning Microwave Radiometer) mit ähnlichen Ergebnissen wie die hier dargestellten, ebenso Olsen u. a. (2005), die den Vergleich der Gasaustauschgeschwindig-



**Abbildung 3.9.:** Vergleich der hier ermittelten Gasaustauschkoeffizienten aus den Daten der QuikSCAT-Mission mit den von Boutin u. a. (2009) publizierten.

keiten für NCEP-Windgeschwindigkeiten zeigen. Das zonal unterschiedliche Verhältnis der Gasaustauschgeschwindigkeiten der kubischen und der quadratischen Parametrisierung erklärt sich durch die zonal unterschiedliche Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit. Abbildung 3.11 zeigt die Häufigkeitsverteilung in den zwei oben beschriebenen zonalen Bereichen; es ist zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeit in den niedrigen Breiten zum überwiegenden Teil geringere Werte als 10 m/s annimmt. Das bedeutet, dass hier das in Abbildung 3.6 beschriebene erste Windgeschwindigkeitsregime vorherrscht, für welches die kubische Parametrisierung die niedrigsten Gasaustauschgeschwindigkeiten ergibt. In den südlichen hohen Breiten (rechter Teil von Abbildung 3.11) umfasst die relative Häufigkeitsverteilung beide Regime der Windgeschwindigkeit mit dem überwiegenden Anteil im zweiten Regime, also dem, in dem die Windgeschwindigkeiten 10m/s überschreiten und in dem die kubische Parametrisierung die höchsten Gasaustauschgeschwindigkeiten aller drei Parametrisierungen liefert.

Die MetOp-A-Mission überschneidet sich zeitlich mit der QuikSCAT-Mission im

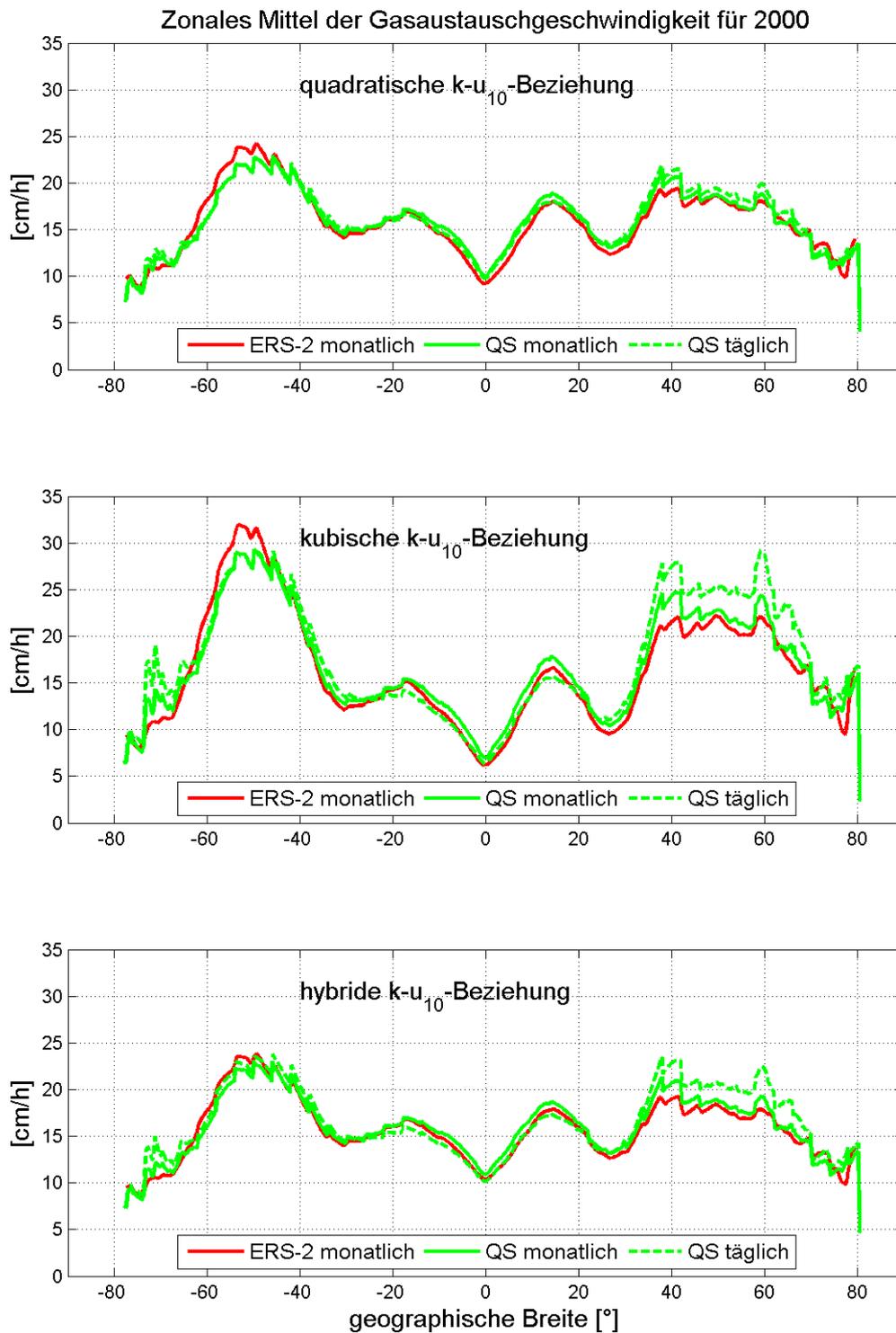
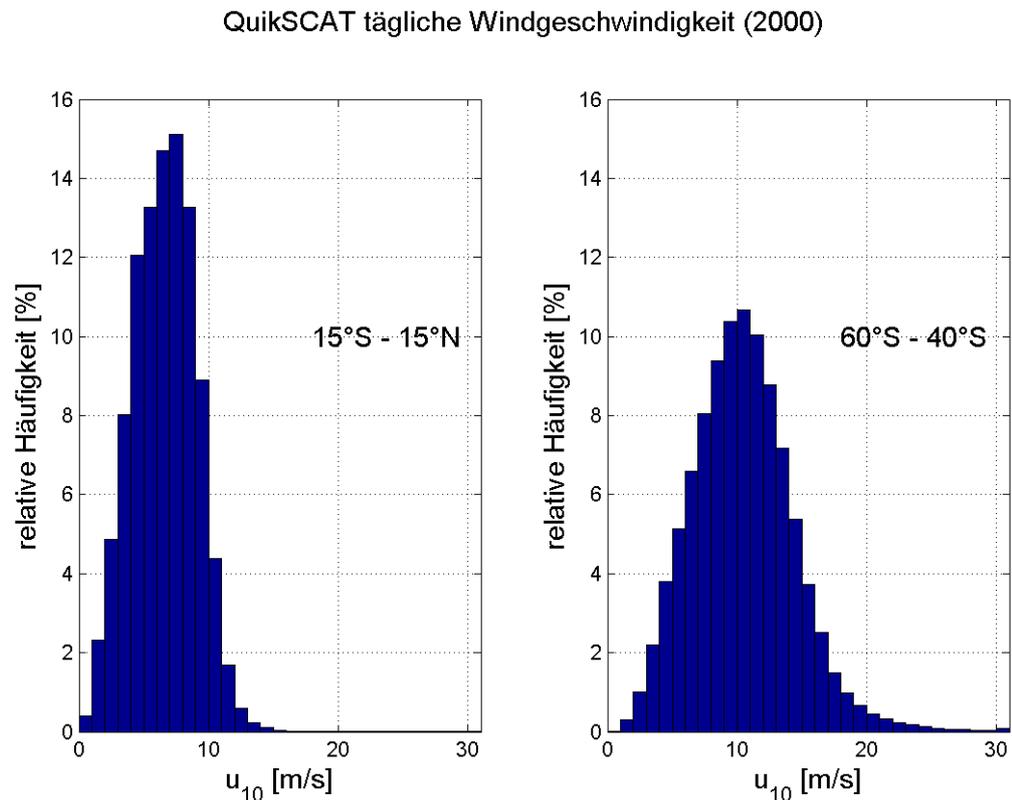


Abbildung 3.10.: Gasaustauschgeschwindigkeit auf Grundlage der QuikSCAT- und ERS-2-Winddaten.



**Abbildung 3.11.:** Relative Häufigkeit der Windgeschwindigkeit in zwei verschiedenen zonalen Bändern. Als Grundlage dienen tägliche QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsfelder für das Jahr 2000.

Jahr 2008 und mit der Oceansat-2-Mission im Jahr 2012. Der Vergleich der zonal gemittelten Gasaustauschgeschwindigkeiten aus den jeweiligen, beiden Satellitenmissionen für diese Jahre ist in Abbildung 3.12 bzw. Abbildung 3.13 gegeben. Die Gasaustauschgeschwindigkeiten in Abbildung 3.12 zeigen im zonalen Mittel eine gute Übereinstimmung in fast allen Bereichen. In den hohen südlichen Breiten jedoch weichen die QuikSCAT-Gasaustauschgeschwindigkeiten von denen der MetOp-A Mission ab. Der Unterschied wird am deutlichsten in der kubischen Parametrisierung. Auch in den gemäßigten nördlichen Breiten zeigen sich in den QuikSCAT-Gasaustauschgeschwindigkeiten höhere Werte. In Abbildung 3.13 zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Gasaustauschgeschwindigkeiten aus der MetOp-A- und der Oceansat-2-Mission. Die stärksten Abweichungen finden sich in der kubischen Parametrisierung in einem schmalen zonalen Band um ca. 80°N.

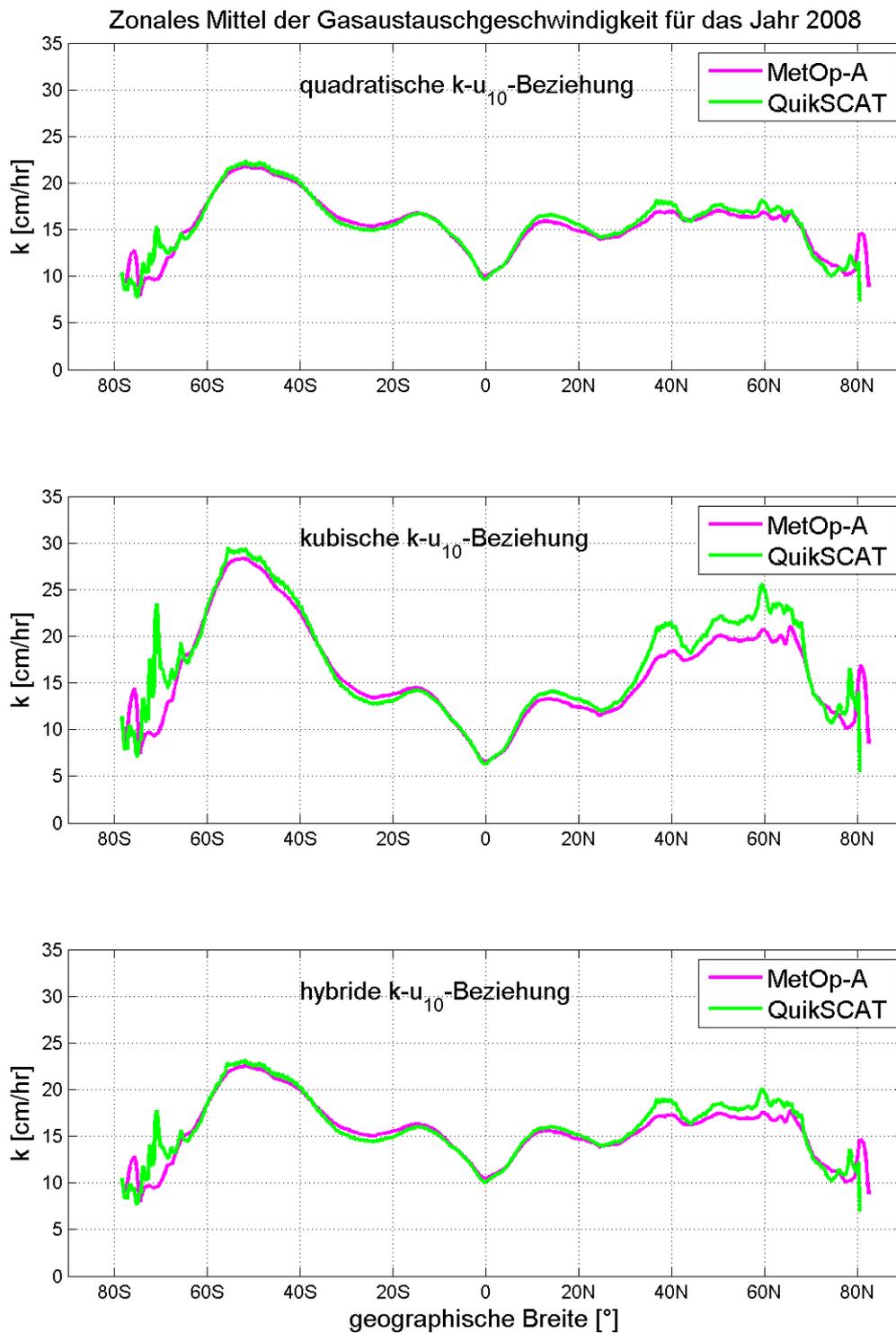


Abbildung 3.12.: Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage der QuikSCAT- und MetOp-A-Winddaten

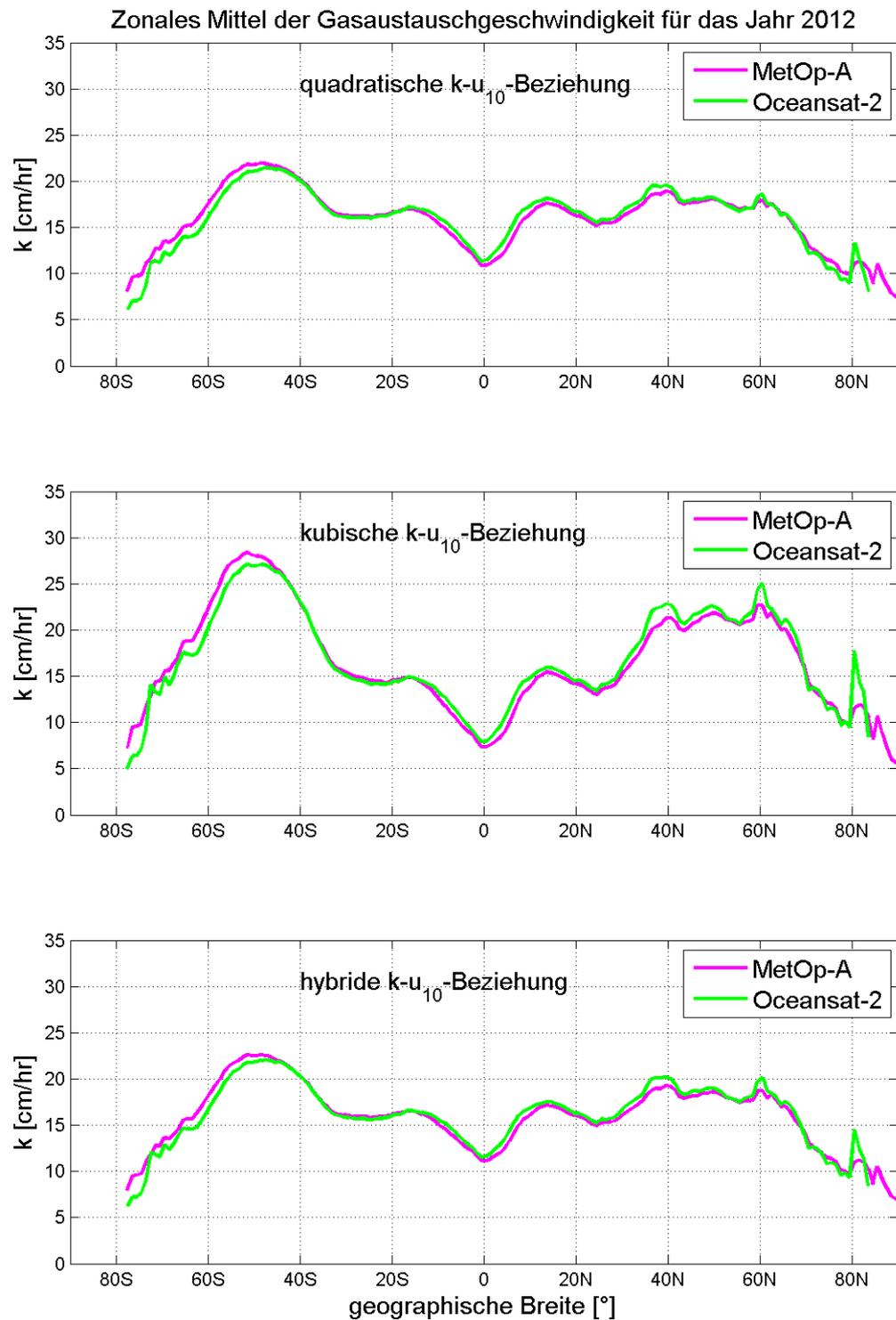


Abbildung 3.13.: Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage der MetOp-A- und Oceansat-2-Winddaten

**Zusammenfassend ist festzuhalten:**

1. Mit dem Nägler-Ansatz sind global gemittelt Gasaustauschgeschwindigkeiten aus unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsprodukten vergleichbar, auch wenn das globale Mittel der Windgeschwindigkeit Versätze zwischen den einzelnen Produkten aufweist.
2. Regional betrachtet setzen sich Unterschiede in den Windgeschwindigkeitsfeldern in den Feldern der Gasaustauschgeschwindigkeit fort.
3. Das Größenverhältnis der Gasaustauschgeschwindigkeiten aus den unterschiedlichen Parametrisierungen ergibt sich regional aus dem lokal vorherrschenden Windgeschwindigkeitsregime.

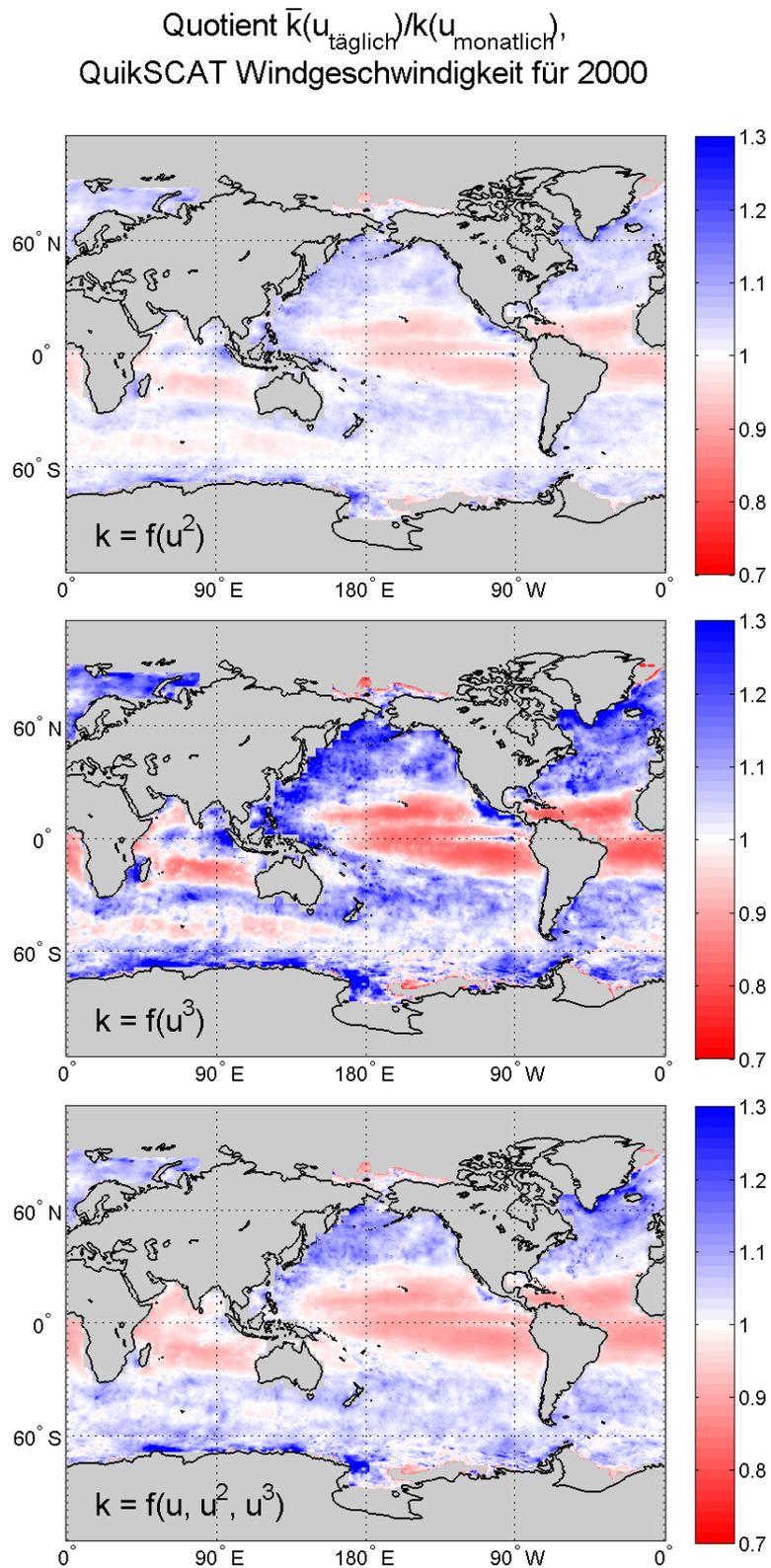
### 3.2.3. Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windfelder

Der Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder ist in Abbildung 3.10 im Vergleich der gestrichelten und der durchgezogenen grünen Linie angedeutet. Verglichen werden hier die zonalen Mittel der Gasaustauschgeschwindigkeiten aus täglichen und aus monatlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsfeldern. Am deutlichsten zeigt sich der Unterschied in der kubischen Parametrisierung. In niedrigen Breiten ( $20^{\circ}\text{S}$  -  $20^{\circ}\text{N}$ ) ergibt die Windgeschwindigkeit in täglicher Auflösung geringere Gasaustauschgeschwindigkeiten als die in monatlicher Auflösung. Im Breitengradbereich von  $30^{\circ}\text{N}$  bis  $70^{\circ}\text{N}$  hingegen ist das Verhältnis umgekehrt: hier liefern die täglichen Windgeschwindigkeitsfelder die höheren  $k$ -Werte.

Näher beleuchtet wird dieser Sachverhalt in Abbildung 3.14. Die globalen Karten stellen den Jahresmittelwert (für das Jahr 2000) der Quotienten solcher Gasaustauschgeschwindigkeiten dar, welche aus täglichen und aus monatlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten abgeleitet wurden. Dabei werden die Monatsmittel der Gasaustauschgeschwindigkeiten aus täglichen Windfeldern als  $\bar{k}(u_{täglich})$  und die Gasaustauschgeschwindigkeiten aus monatlichen gemittelten Windfeldern im Folgenden als  $k(u_{monatlich})$  bezeichnet. (Der besseren Übersicht wegen wurde auf den Index  $_{10}$ , wie z. B. in Gleichung 3.1, verzichtet.)

Klar zu erkennen sind die ausgeprägten roten Bereiche in den niedrigen Breiten, in denen die Werte von  $k(u_{monatlich})$  die von  $\bar{k}(u_{täglich})$  übersteigen. In den blau dargestellten Gebieten ist das Verhältnis umgekehrt; in Gegenden, die in weiß erscheinen, ist das Verhältnis von  $\bar{k}(u_{täglich})$  und  $k(u_{monatlich})$  annähernd 1.

Um dieses zu erklären, ist es sinnvoll, den Quotienten  $Q$  von  $\bar{k}(u_{täglich})$  und  $k(u_{monatlich})$  näher zu betrachten. Dieses geschieht hier exemplarisch für die qua-



**Abbildung 3.14.:** Jahresmittelwert des Verhältnisses der monatlichen Mittelwerte der Gasaustauschgeschwindigkeit berechnet aus täglichen und aus monatlichen Windgeschwindigkeitsfeldern. Aufteilung nach den drei k-Parametrisierungen: obere Tafel: quadratisch, mittlere Tafel: kubisch, untere Tafel: hybrid

dratische  $k$ - $u_{10}$ -Beziehung, ist aber auch auf die anderen beiden Parametrisierungen anwendbar. Der Quotient  $Q$  wird ausgedrückt als

$$Q = \frac{\bar{k}(u_{\text{täglich}})}{k(u_{\text{monatlich}})} = \frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}} \cdot \frac{\overline{u_{\text{täglich}}^2}}{\overline{u_{\text{täglich}}^2}} \quad (3.9)$$

mit

$\bar{k}(u_{\text{täglich}})$ : Monatsmittelwert der auf täglich aufgelösten Windgeschwindigkeiten basierenden Gasaustauschgeschwindigkeit

$k(u_{\text{monatlich}})$ : Gasaustauschgeschwindigkeit auf Grundlage monatlich aufgelöster Windgeschwindigkeit

$b_{\text{täglich}}, b_{\text{monatlich}}$ : 0.2434 bzw. 0.2698, (Skalierungsfaktoren der quadratischen  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierung, siehe Gleichung 3.4 und Tabelle 3.2 mittlerer Teil, tägliche, bzw.monatliche QuikSCAT-Daten)

$\overline{u_{\text{täglich}}^2}$ : Monatsmittelwert der Quadrate über täglich aufgelöste Windgeschwindigkeiten

$\overline{u_{\text{täglich}}^2}$ : Quadrat des Monatsmittelwertes über täglich aufgelöste Windgeschwindigkeiten.

Die Schmidt-Zahl-Terme (siehe Parametrisierung der Gasaustauschgeschwindigkeit, Gleichung 3.1) kürzen sich heraus, da die Schmidt-Zahl in monatlicher Auflösung angewendet wird.

Der Teilquotient  $\frac{\overline{u_{\text{täglich}}^2}}{\overline{u_{\text{täglich}}^2}}$  wird als Verstärkungsfaktor  $R$  (“enhancement factor”, eingeführt von Wanninkhof u. a. (2002)) bezeichnet. In anderen Veröffentlichungen heißt  $R$  auch “scaling factor” (Olsen u. a., 2005) oder “correction factor” (Fangohr u. a., 2008). Mit dieser Bezeichnung ist eine alternative Darstellung von  $Q$  möglich:

$$Q = \frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}} \cdot R \quad (3.10)$$

Die räumliche Ausdehnung der roten Bereiche in Abbildung 3.14 ist nach Gleichung 3.10 direkt bestimmt vom Verhältnis  $\frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}}$ : Das Verhältnis dieser beiden Faktoren bestimmt die Schwelle im  $R$ -Wert, bis zu der  $Q < 1$  gilt, bzw. bis zu der monatliche Windgeschwindigkeitsfelder höhere Gasaustauschgeschwindigkeiten liefern als die täglichen Windgeschwindigkeiten. Mit dem hier im Nägler-Ansatz ermittelten Wert von 0.90 für den Quotienten  $\frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}}$  ( $= 0.2434/ 0.2698$ ) ergibt sich ein Schwellwert für  $R$  von 1.11.

Fangohr u. a. (2008) zeigen eine Karte der globalen Werte für den Korrekturfaktor  $R$  der QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten (hier dargestellt in Abbildung 3.15). Hier kann über den Schwellwert in  $R$  direkt abgelesen werden, in welchen Gebieten höhere Gasaustauschgeschwindigkeiten aus monatlich aufgelösten Windgeschwindigkeiten zu erwarten sind: Für den Nägler-Ansatz sind das alle Gebiete mit einem  $R$ -Wert  $< 1.11$ .

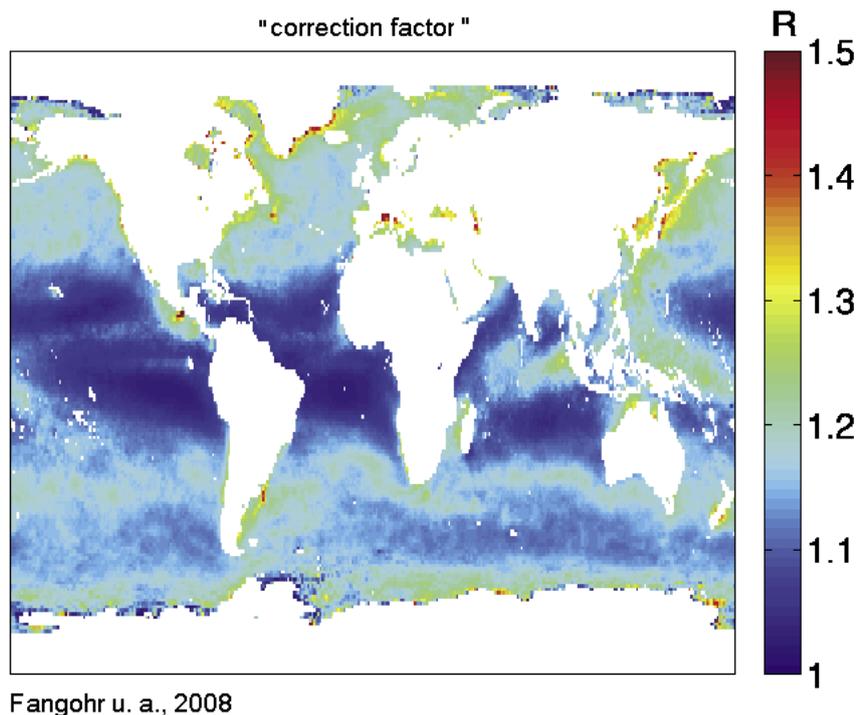
Im Wanninkhof-Ansatz jedoch ergibt sich ein höherer Schwellwert in  $R$ : Die  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen für monatliche (=langzeitgemittelte) und tägliche (=kurzzeitige) Windgeschwindigkeiten wie in Wanninkhof (1992) enthalten die Werte 0.31 und 0.39 für die beiden Faktoren  $b_{\text{täglich}}$  und  $b_{\text{monatlich}}$ . Das Verhältnis der beiden Faktoren ist damit 0.79. Somit ergibt sich ein Schwellwert in  $R$  von 1.26 im Wanninkhof-Ansatz.

Tabelle 3.3 fasst die Ableitung des Schwellwerts für  $R$  für beide Ansätze zusammen.

	$b_{\text{täglich}}$	$b_{\text{monatlich}}$	$\frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}}$	Schwellwert für $R$ ( $Q < 1$ )
Nägler-Ansatz	0.2434	0.2698	0.90	1.11
Wanninkhof-Ansatz	0.31	0.39	0.79	1.26

**Tabelle 3.3.:** Ableitung des Schwellwertes für  $R$  basierend auf  $Q = \frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}} \cdot R$ , wie in Gleichung 3.10.

Gebiete, in denen monatlich aufgelöste Windgeschwindigkeiten höhere Gasaustauschgeschwindigkeiten liefern, als täglich aufgelöste, sind für den Wanninkhof-Ansatz solche, die einen  $R$ -Wert  $< 1.26$  aufweisen. Im Wanninkhof-Ansatz ergibt sich damit, dass Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage monatlich aufgelöster Windgeschwindigkeiten fast überall höher sind als Gasaustauschgeschwindigkeiten aus Windgeschwindigkeiten in täglicher Auflösung. Es lässt sich also feststellen, dass die Ausprägung der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeit in der Gasaustauschgeschwindigkeit zwischen den beiden Ansätzen räumlich unterschiedlich ist. Darin liegt der Schlüssel zur Erklärung, warum das Verhältnis der globalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse aus unterschiedlich zeitlich aufgelösten Windgeschwindigkeitsfeldern sich grundlegend zwischen dem Nägler-Ansatz und dem Wanninkhof-Ansatz unterscheidet, wie in Unterabschnitt 3.2.4 gezeigt werden wird.



**Abbildung 3.15.:** „correction factor“  $R$  nach Fangohr u. a. (2008), Grundlage sind QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten für die Jahre 2003 und 2004

Randbemerkung zum Verstärkungs- (Korrektur-, Skalierungs-) Faktor  $R$ :

$R$  hängt von der zeitlichen Variabilität der täglichen Windgeschwindigkeit ab. Dieses lässt sich mit der Definition des quadrierten Variationskoeffizienten,

$$varcoef f^2 = \left( \frac{std(u_{t\ddot{a}glich})}{mean(u_{t\ddot{a}glich})} \right)^2 = \frac{\overline{u_{t\ddot{a}glich}^2}}{u_{t\ddot{a}glich}^2} - 1,$$

zeigen. Damit gilt  $R = varcoef f^2 + 1$ .

So zeigt sich die direkte Abhängigkeit des Verstärkungsfaktors  $R$  vom Variationskoeffizienten, der, so wie er hier definiert ist, ist ein Maß für die zeitliche Variabilität der täglichen Windgeschwindigkeitsfelder ist.

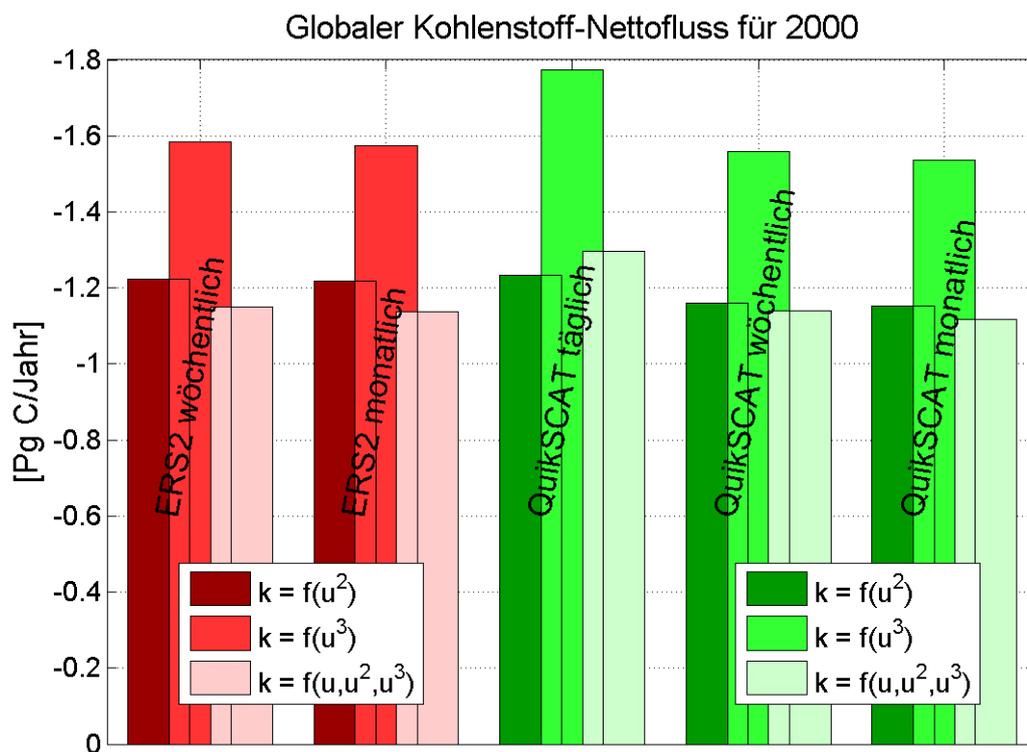
**Die wichtigsten Ergebnisse dieses Abschnitts sind:**

**1. Im Nögler-Ansatz gilt: Je geringer die zeitliche Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder, umso höher ist die daraus abgeleitete Gasaustauschgeschwindigkeit in den niedrigen Breiten und umso geringer ist sie in den hohen Breiten.**

**2. Im Wanninkhof-Ansatz hingegen gilt für nahezu alle Gebiete des globalen Ozeans: Je geringer die zeitliche Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder, umso höher ist die daraus abgeleitete Gasaustauschgeschwindigkeit.**

### 3.2.4. Der globale CO<sub>2</sub>-Nettofluss

Mathematisch betrachtet ist der CO<sub>2</sub>-Nettofluss die gewichtete Summe der CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz über den globalen Ozean. Dem Gasaustauschkoeffizienten kommt dabei die Rolle des Wichtungsfaktors zu. Der Einfluss der Wahl des Windgeschwindigkeitsprodukts und der Wahl der  $k$ - $u_{10}$ -Beziehung sowie der Einfluss der zeitlichen Auflösung auf die Gasaustauschgeschwindigkeit, wie in Unterabschnitt 3.2.1, bzw. 3.2.2 und 3.2.3 erklärt, setzen sich damit in der Abschätzung des globalen CO<sub>2</sub>-Nettoflusses fort und werden im Folgenden beschrieben und diskutiert. Aus den Takahashi2009- Daten zusammen mit den Satellitenwindgeschwindigkeiten ergeben sich Nettoflüsse für das Referenzjahr 2000. Die Nettoflüsse sind in Abbildung 3.16 dargestellt und aufgeteilt nach den verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen sowie den verwendeten Windgeschwindigkeitsprodukten in den unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen.



**Abbildung 3.16.:** Abgeschätzte globale CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse für das Jahr 2000. Grundlage sind die Takahashi2009-Daten (siehe Abschnitt 3.1.2 )

Die CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse betragen zwischen -1.77 PgC/Jahr für die täglichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten in der kubischen Parametrisierung und

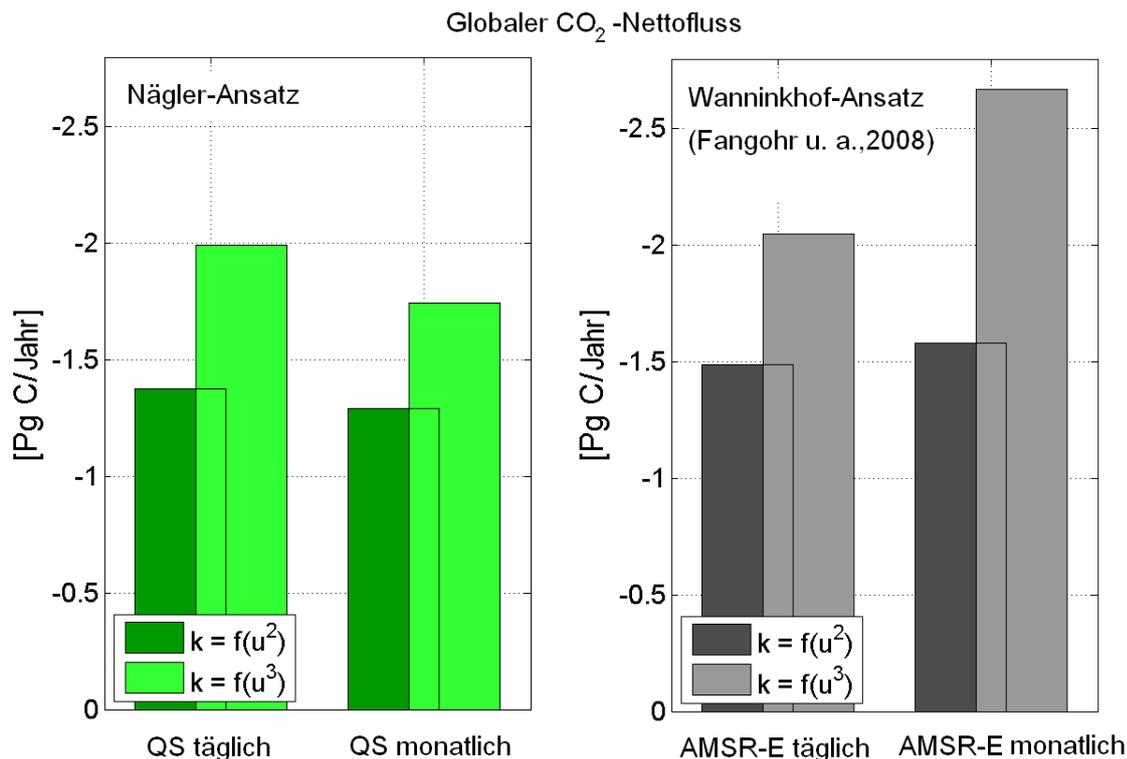
-1.12 PgC/Jahr für die monatlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten, wenn die hybride Form der Parametrisierung verwendet wird. Die Wahl des Windgeschwindigkeitsprodukts hat hier keinen großen Einfluss auf den Kohlenstoff-Nettofluss: Die ERS-2 Windgeschwindigkeiten in wöchentlicher Auflösung ergeben unter Verwendung der quadratischen (kubischen, hybriden) Parametrisierung Nettoflüsse in den Ozean, die um 5.1 (1.6, 0.8) % höher sind als die Nettoflüsse, die aus den wöchentlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden. In monatlicher Auflösung ergeben die ERS-2-Windgeschwindigkeiten Nettoflüsse, die um 5.4 (2.4, 1.8)% höher sind. Der Grund, warum ERS-2 höhere Nettoflüsse liefert, liegt im Zusammenfallen geringerer ERS-2-Gasaustauschgeschwindigkeiten mit positivem  $\Delta p\text{CO}_2$  in niedrigen Breiten und höheren ERS-2-Gasaustauschgeschwindigkeiten in hohen südlichen Breiten, die durch negatives  $\Delta p\text{CO}_2$  gekennzeichnet sind. Das Ausgasen in niedrigen Breiten wird damit als geringer und die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in hohen südlichen Breiten als höher abgeschätzt. Man vergleiche hierzu auch die räumliche Verteilung der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz in Abbildung 2.3 und die zonalen Mittel der Gasaustauschgeschwindigkeiten in Abbildung 3.10. Obwohl die QuikSCAT-Gasaustauschgeschwindigkeiten in hohen nördlichen Breiten höher sind, ist der globale Nettofluss höher, wenn die ERS-2-Windgeschwindigkeiten wie hier beschrieben angewendet werden.

Die Anwendung der unterschiedlichen  $k\text{-}u_{10}$ -Parametrisierungen hingegen hat einen größeren Einfluss auf die Unterschiede in der Abschätzung des  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses. Die kubische Parametrisierung ergibt die höchsten Nettoflüsse in beiden Windgeschwindigkeitsprodukten und allen zeitlichen Auflösungen. Dieses erklärt sich durch die niedrigeren Gasaustauschgeschwindigkeiten dieser Parametrisierung in niedrigen Breiten (= geringer geschätztes Ausgasen) und die höheren Gasaustauschgeschwindigkeiten in hohen Breiten (= höher geschätzte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme). Global integriert ergibt sich damit ein höher abgeschätzter Kohlenstoff-Nettofluss. Die hybride Parametrisierung ergibt die niedrigsten Nettoflüsse in Verwendung beider Windgeschwindigkeitsprodukte und in wöchentlicher und monatlicher Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder, jedoch nicht in täglicher Auflösung. Waninkhof u. a. (2009) benutzen monatliche QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten zur Berechnung des globalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses. Sie finden ebenfalls heraus, dass der Nettofluss, der aus der quadratischen Parametrisierung abgeschätzt wurde, höher ist als der aus der hybriden  $k\text{-}u_{10}$ -Beziehung. Die hier gezeigten, auf täglichen Windgeschwindigkeiten basierenden Nettoflüsse zeigen jedoch, dass sich das Verhältnis der Nettoflüsse aus der quadratischen und hybriden Parametrisierung umkehrt. Die Nettoflüsse, die aus der kubischen Parametrisierung stammen, sind um

37-38 % höher als die aus der hybriden Parametrisierung. Dieses gilt für beide Windgeschwindigkeitsprodukte und alle zeitlichen Auflösungen. Die täglichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten jedoch liefern den geringsten Nettofluss bei Verwendung der quadratischen Parametrisierung. Er wird um 44% vom Nettofluss aus der kubischen und um 5% vom Nettofluss aus der hybriden  $k-u_{10}$ -Beziehung überstiegen.

In Bezug auf die zeitliche Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder ist zu sehen, dass der abgeschätzte Nettofluss von Kohlenstoff umso höher ist, je höher die zeitliche Auflösung ist. Dieses ist am offensichtlichsten im Vergleich der  $\text{CO}_2$ -Flüsse aus den täglichen und monatlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsfeldern. Aus der hybriden (kubischen, quadratischen) Parametrisierung ergeben sich aus den täglichen QuikSCAT-Feldern Abschätzungen für den  $\text{CO}_2$ -Nettofluss, die um 13.8 (13.4, 6.5)% höher sind als die Abschätzung mit Hilfe der monatlichen Windgeschwindigkeiten. Dieses steht im Gegensatz zu den Ergebnissen von Fangohr u. a. (2008), die zeigen, dass der aus monatlichen AMSR-E-Windgeschwindigkeiten abgeschätzte  $\text{CO}_2$ -Nettofluss für das Jahr 2004 höher ist, als der aus täglichen Windgeschwindigkeiten abgeschätzte.

Um vergleichbar mit den Abschätzungen von Fangohr u. a. (2008) zu sein, wurden die Takahashi2002-Daten mit den Gasaustauschgeschwindigkeiten aus den QuikSCAT-Daten für 2004 kombiniert, da in der Arbeit von Fangohr u. a. (2008) diese Daten der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz verwendet wurden. Der hieraus resultierenden abgeschätzten  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse sind in Abbildung 3.17 im Vergleich zu den von Fangohr u. a. (2008) für die kubische und die quadratische Parametrisierung berechneten dargestellt. Mit den täglichen QuikSCAT-Daten ist der Nettofluss unter Verwendung des Nögler-Ansatzes um 7% (14%) höher als der aus den monatlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten abgeschätzte unter Verwendung der quadratischen (kubischen) Parametrisierung. Mit den Betrachtungen zum Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder auf die Gasaustauschgeschwindigkeit und der räumlichen Verteilung dieses Einflusses in dem Wanninkhof- bzw. dem Nögler-Ansatz (Unterabschnitt 3.2.3) kann dieser Unterschied in den Verhältnissen des globalen Kohlenstoffnettoflusses erklärt werden. In die Erklärung muss das globale Muster des  $\Delta p\text{CO}_2$  (siehe Abbildung 2.3) einbezogen werden: Im Wanninkhof-Ansatz erhöhte Gasaustauschgeschwindigkeiten bei Verwendung monatlicher Windgeschwindigkeit sind ein fast globales Phänomen und verstärken damit sowohl die abgeschätzte  $\text{CO}_2$ -Abgabe als auch die abgeschätzte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme des Ozeans. Global integriert ergibt sich eine abgeschätzte erhöhte Netto-Aufnahme. Im Nögler-Ansatz jedoch beschränken sich



**Abbildung 3.17.:** CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse berechnet mit dem Nägler-Ansatz und mit dem Wanninkhof-Ansatz (Grundlage sind QuikSCAT- bzw. AMSR-E-Windgeschwindigkeiten für das Jahr 2004 in täglicher und in monatlicher Auflösung und die Takahashi2002-Daten)

die erhöhten Gasaustauschgeschwindigkeiten bei Verwendung monatlicher Windgeschwindigkeit auf den tropischen Bereich des Ozeans und fallen hier zusammen mit Gebieten der CO<sub>2</sub>-Abgabe. In den übrigen Gebieten, die überwiegend durch eine Aufnahme von CO<sub>2</sub> geprägt sind, sind größtenteils verringerte Gasaustauschgeschwindigkeiten festzustellen. Ein im Nägler-Ansatz abgeschätzter Kohlenstoff-Fluss ist also bei der Verwendung monatlich aufgelöster Windgeschwindigkeiten in den tropischen Gebieten verstärkt und in den anderen Bereichen abgeschwächt, im Vergleich zur Verwendung täglich aufgelöster Windgeschwindigkeitsfelder. Global integriert ergibt sich damit ein geringer abgeschätzter Nettofluss von Kohlenstoff in den Ozean bei Verwendung monatlicher Windgeschwindigkeitsfelder im Nägler-Ansatz. Damit erklärt sich dann das Verhältnis der Nettoflüsse im Nägler-Ansatz unter Verwendung täglicher und monatlicher Windgeschwindigkeiten und auch der Unterschied zu den Ergebnissen von Fangohr u. a. (2008).

**Es lässt sich zusammenfassen:**

1. Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Einflüsse auf

die Gasaustauschgeschwindigkeit (Wahl des Windgeschwindigkeitsprodukts, Wahl der Parametrisierung, zeitliche Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder) spiegeln sich in den CO<sub>2</sub>-Nettoflüssen wider.

2. Der Einfluss der zeitlichen Auflösung der Windgeschwindigkeit auf den CO<sub>2</sub>-Nettofluss im Nägler-Ansatz zeigt sich darin, dass zeitlich höher aufgelöste Windgeschwindigkeitsfelder höhere CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse liefern. Zeitlich geringer aufgelöste Windgeschwindigkeiten liefern höhere Gasaustauschgeschwindigkeiten in Gebieten, die durch ein Ausgasen von CO<sub>2</sub> charakterisiert sind, und begründen so einen global integrierten geringeren CO<sub>2</sub>-Nettofluss in den Ozean.

3. Der abgeschätzte CO<sub>2</sub>-Nettofluss in den Ozean ist am höchsten, wenn QuikSCAT-tägliche Windgeschwindigkeiten in der kubischen Parametrisierung verwendet werden.

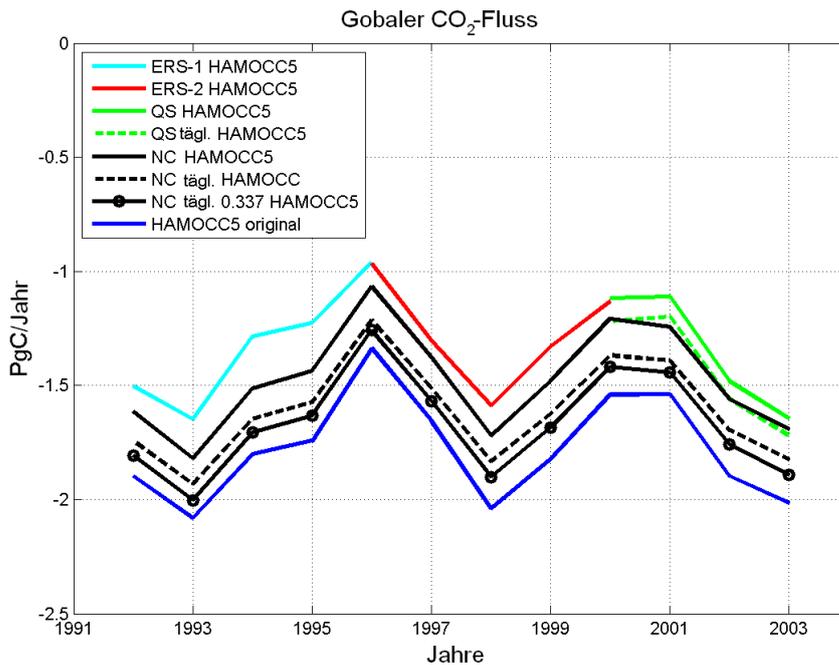
4. Die hybride Parametrisierung liefert einen um 5% höheren Nettofluss für das Jahr 2000, wenn tägliche QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten verwendet werden.

#### 3.2.5. Zeitliche Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde der CO<sub>2</sub>-Nettofluss detailliert für ein Jahr untersucht. In dem aktuellen Abschnitt wird nun die zeitliche Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses sowohl global als auch regional betrachtet und es werden Antworten gesucht auf die eingangs gestellten Fragen nach, zum einen, der Bedeutung des durch den Gasaustauschkoeffizienten induzierten zeitlichen Variabilität im CO<sub>2</sub>-Fluss und, zum anderen, nach der Sensitivität dieser induzierten zeitlichen Variabilität gegenüber der Wahl des Windgeschwindigkeitsprodukts (NCEP bzw. QuikSCAT).

##### Globaler CO<sub>2</sub>-Fluss

Die Zeitreihe globaler CO<sub>2</sub>-Flüsse wird wie in Unterabschnitt 3.1.6 (Referenzlauf) aus der Zeitreihe der Satelliten-Gasaustauschgeschwindigkeiten und der HAMOCC5-Zeitreihe berechnet. Die Länge der Zeitreihe ergibt sich aus der zeitlichen Überschneidung der HAMOCC5-Daten und der Winddaten. Diese Zeitreihe wird zunächst direkt verglichen mit der Zeitreihe der im MPI-OM-HAMOCC5 modellierten CO<sub>2</sub>-Flüsse. Diese werden im Folgenden HAMOCC5-original-Flüsse genannt. Abbildung 3.18 stellt die verschiedenen Zeitreihen der Flüsse dar.



**Abbildung 3.18.:** Vergleich der globalen  $\text{CO}_2$ -Flüsse aus den Kombinationen Satellitenwind-HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$  und NCEP-HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$  mit den HAMOCC5-original- $\text{CO}_2$ -Flüssen. Die verwendete Gasaustauschparametrisierung ist die quadratische (Gleichung 3.1). „QS” steht für QuikSCAT, „NC” für NCEP Soweit nicht anders angegeben, wurden Monatsmittel der Windgeschwindigkeiten verwendet. Näheres siehe Text (Unterabschnitt 3.2.5).

Zum Vergleich ist auch die Zeitreihe aus der Kombination der NCEP-Gasaustauschkoeffizienten und der HAMOCC5- $\Delta p\text{CO}_2$ -Daten gezeigt, da die Gasaustauschgeschwindigkeiten im HAMOCC5-Modell die NCEP-Windgeschwindigkeiten als Grundlage haben. Die Unterschiede zwischen den hier dargestellten  $\text{CO}_2$ -Flüssen der einzelnen Kombinationen haben mehrere Gründe. Unterschiede in der Verwendung täglicher und monatlicher Windgeschwindigkeiten wurden in Unterabschnitt 3.2.3 erklärt und finden sich hier wieder als Unterschied zwischen den gestrichelten und durchgezogenen Linien entsprechender Farbe. Der wesentliche Unterschied zwischen den Satelliten- $\text{CO}_2$ -Flüssen und den anderen hier dargestellten Flüssen liegt in der Beschränkung der Satellitenwindfelder auf den eisfreien Ozean, wie in Unterabschnitt 2.5.1 erklärt. Die NCEP-Winddaten sind global verfügbar und der  $\text{CO}_2$ -Austausch kann mit diesen Windgeschwindigkeiten auch in Gebieten mit Eisbedeckung berechnet werden. Dieser Unterschied entspricht dem zwischen den zwei oberen NCEP-Linien und den Linien, die Satelliten-Flüsse markieren. Ein geringer Unterschied zwischen den HAMOCC5-original-Flüssen und den Satelliten- $\text{CO}_2$ -Flüssen ergibt sich aus der Anwendung des Nögler-Ansatzes.

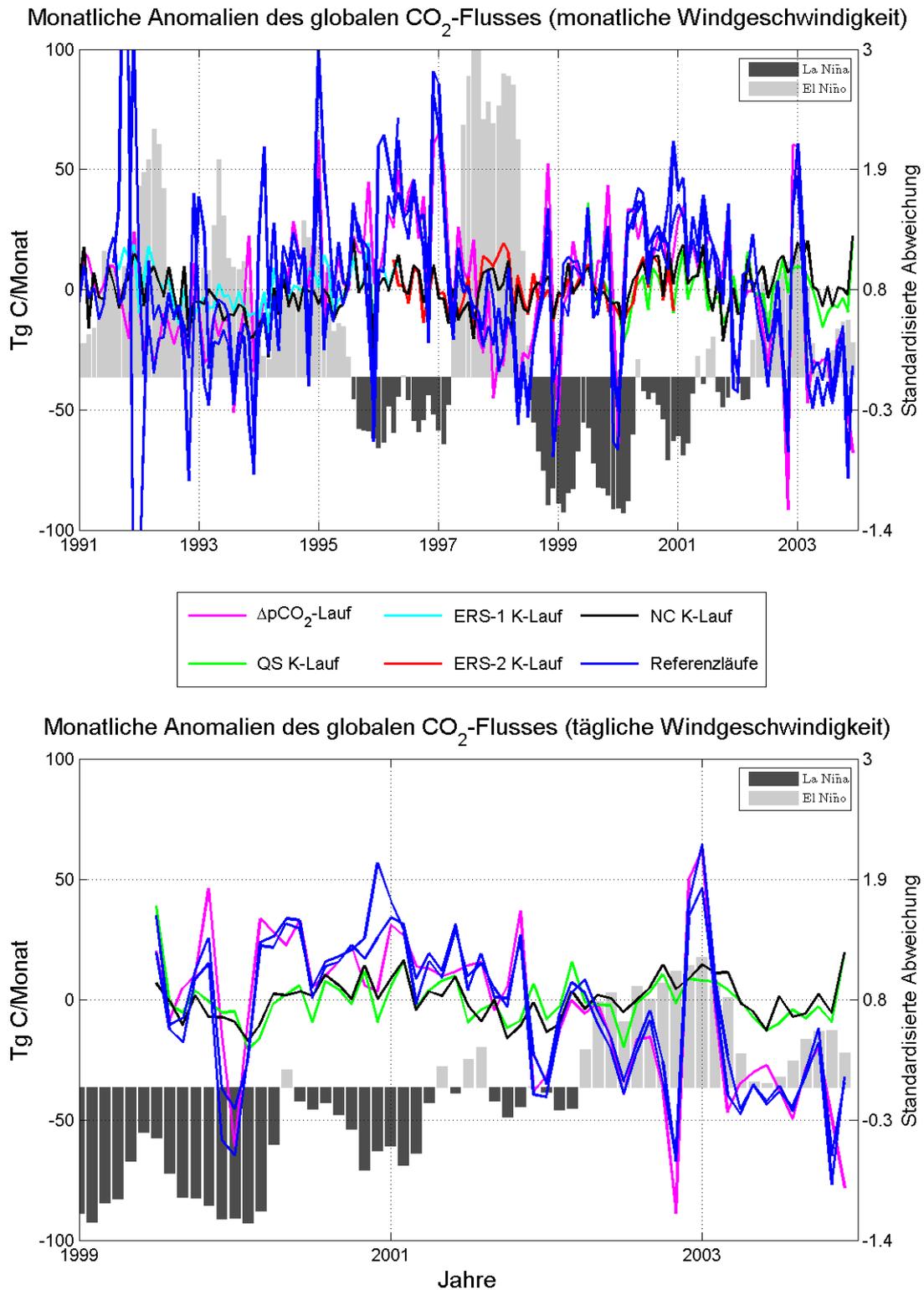
Der in HAMOCC5 verwendete Faktor der quadratischen  $k-u_{10}$ -Beziehung ist 0.337 und somit höher als der hier verwendete Faktor von 0.325 für die quadratische Parametrisierung angewendet auf die NCEP-Winddaten. Der daraus resultierende Unterschied zeigt sich im Abstand zwischen der gestrichelt schwarzen Linie und der schwarzen Linie mit kreisförmigen Markierungen, die für in dieser Arbeit nachberechnete Flüsse mit dem Faktor 0.337 steht. Zuletzt gibt es einen Unterschied in den nachberechneten Flüssen und den HAMOCC-original- $\text{CO}_2$ -Flüssen, der aus der Kombination der unterschiedlich gegitterten Felder entsteht.  $\text{CO}_2$ -Flüsse können nur für die Gitterzellen berechnet werden, für die alle notwendigen Daten vorliegen. Da die Landmasken bei unterschiedlichen räumlichen Auflösungen nicht einheitlich sein können, führt dies zu einer Verminderung der abgeschätzten Nettoflüsse.

In Abbildung 3.18 ist deutlich die zwischenjährliche Variabilität des Kohlenstoffnettoflusses zu erkennen. Diese wird hauptsächlich durch den äquatorialen Pazifik und das hier auftretende Phänomen ENSO beeinflusst (siehe Abschnitt 2.2). Dadurch bestimmt der äquatoriale Pazifik zwischen  $10^\circ$  N und  $10^\circ$  S rund 65% der zwischenjährlichen Variabilität des globalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses (Wetzel u. a., 2005). Die in Tabelle 3.4 zusammengefassten Läufe zur Berechnung der Zeitreihe monatlicher  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse unterscheiden sich in der Darstellung der monatlichen Variabilität im Gasaustauschkoeffizienten bzw. in der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz. Sie werden als nächstes gegenübergestellt, um den Einfluss der zeitlichen Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten auf die zeitliche Variabilität des globalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses zu analysieren. Abbildung 3.19 zeigt die Zeitreihen monatlicher Anomalien der aus den Läufen resultierenden Nettoflüsse zusammen mit dem Multivariaten ENSO-Index (MEI <sup>4</sup>, Wolter u. Timlin, 1993, 1998). Die monatlichen Anomalien sind Abweichungen der monatlichen Nettoflüsse von klimatologischen Monatsmittelwerten der Nettoflüsse.

In La-Niña-Phasen sind verstärkt positive Anomalien des  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses der Referenzläufe zu erkennen, während in den El-Niño-Zeiten negative Anomalien vorherrschen. Die Zeitreihe der  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse aus dem  $\Delta p\text{CO}_2$ -Lauf, welcher monatliche Variabilität ausschließlich in den  $\Delta p\text{CO}_2$ -Feldern repräsentiert, folgt im Wesentlichen dem aus den Referenzläufen (monatliche Variabilität sowohl im Gasaustauschkoeffizient als auch im  $\Delta p\text{CO}_2$ ) und legt nahe, dass die durch ENSO hervorgerufene zwischenjährliche Variabilität durch die Variabilität in der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz hervorgerufen werden, zumal der Verlauf der monatlichen Anomalien aus den K-Läufen dem ENSO-Signal nicht zu folgen scheint. Im K-

---

<sup>4</sup><http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>



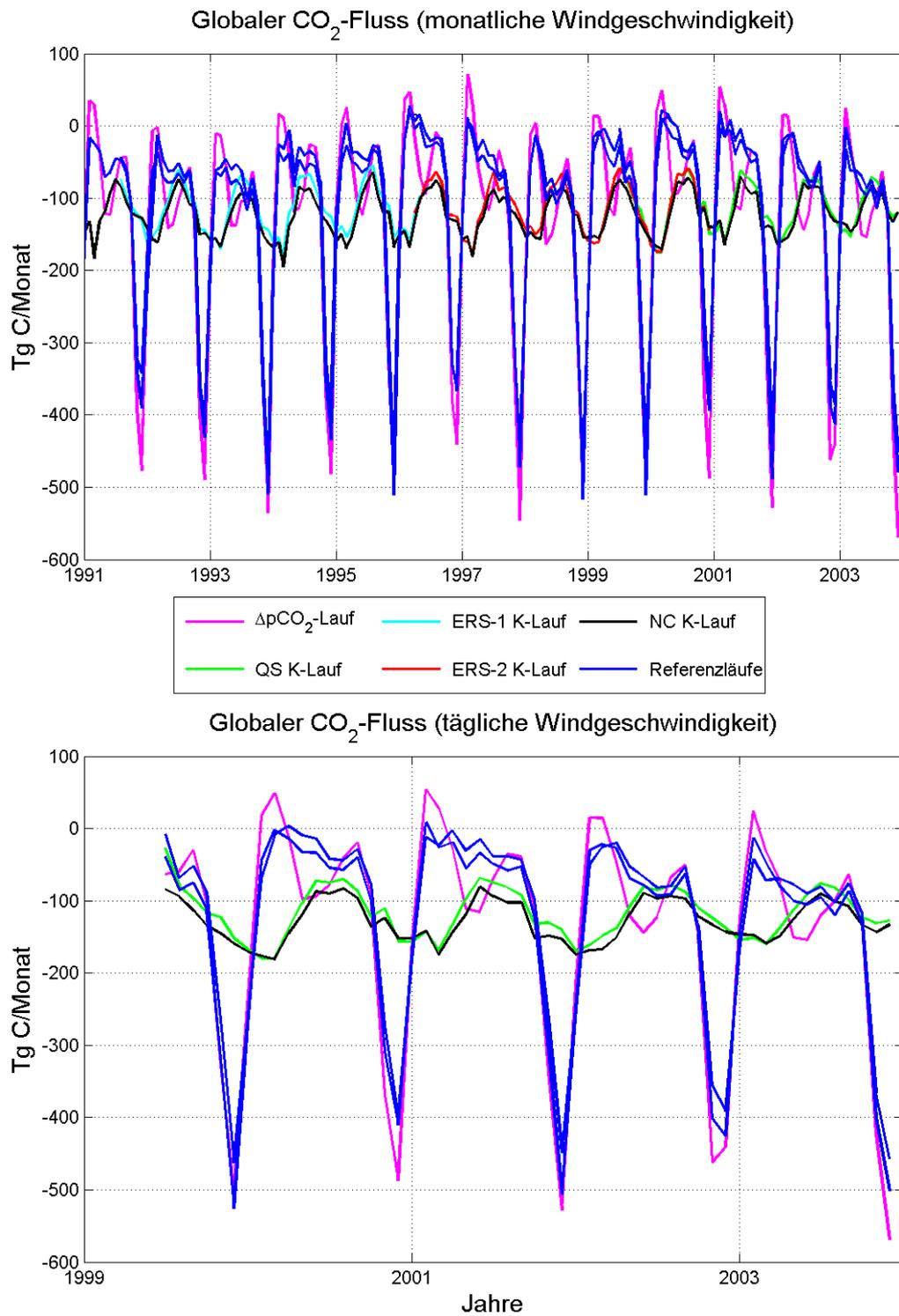
**Abbildung 3.19.:** Monatliche Anomalien des CO<sub>2</sub>-Nettoflusses der einzelnen Läufe (siehe Tabelle 3.4). Der obere Teil bezieht sich auf die gesamte Satellitenzeitreihe. Jedes Windgeschwindigkeitsprodukt hat einen eigenen Referenzlauf. Zusätzlich ist der Multivariate ENSO Index (Wolter u. Timlin, 1993, 1998) hinterlegt.

monatliche Variabilität in	K - Lauf	$\Delta p\text{CO}_2$ - Lauf	Referenzlauf
K	ja	nein	ja
$\Delta p\text{CO}_2$	nein	ja	ja

**Tabelle 3.4.:** Repräsentation der monatlichen Variabilität in den verschiedenen Läufen zur Berechnung des  $\text{CO}_2$ -Flusses

Lauf repräsentierte monatliche Variabilität basiert ausschließlich auf monatlicher Variabilität der Felder des Gasaustauschkoeffizienten K.

Zur Betrachtung der monatlichen Variabilität sind in Abbildung 3.20 die Zeitreihen der aus den Läufen resultierenden Nettoflüsse gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die monatliche Variabilität des  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses bestimmt wird durch die monatliche Variabilität in den  $\Delta p\text{CO}_2$ -Feldern: Die Zeitreihe der Nettoflüsse aus dem  $\Delta p\text{CO}_2$ -Lauf folgt der Zeitreihe aus den Referenzläufen. Die Varianz des globalen Nettoflusses aus den K-Läufen und dem  $\Delta p\text{CO}_2$ -Lauf kann ins Verhältnis gesetzt werden zur totalen Varianz des globalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses aus den Referenzläufen. Eine Übersicht über die Anteile der Varianz der einzelnen Läufe an der totalen Varianz des globalen Nettoflusses ist in Tabelle 3.5 in den ersten zwei Spalten gegeben. Hier wird der Varianzanteil getrennt für die Windgeschwindigkeitsprodukte QuikSCAT und NCEP betrachtet und bezieht sich auf die Läufe, die im unteren Teil von Abbildung 3.20 dargestellt sind. Die Läufe, die auf den ERS-Windgeschwindigkeiten basieren, werden hier nicht mehr betrachtet, da diese nicht in täglicher Auflösung vorhanden sind. Der Varianzanteil des K-Laufs aus den QuikSCAT-Daten beträgt 7% der Varianz aus dem entsprechenden Referenzlauf; für den NCEP-K-Lauf ergeben sich 4% Varianzanteil. Die Varianzanteile des  $\Delta p\text{CO}_2$ -Laufs an den entsprechenden Referenzläufen betragen 146% für QuikSCAT und 123% für NCEP. Das bedeutet, dass die monatliche Varianz des  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses bei Verwendung der QuikSCAT-Winddaten um 93% Prozent unterschätzt wird, wenn monatliche Variabilität ausschließlich durch den Gasaustauschkoeffizienten K gegeben ist. Für NCEP ergibt sich eine Unterschätzung um 96%. Ist die monatliche Variabilität des  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses nur durch die Partialdruckdifferenz  $\Delta p\text{CO}_2$  gegeben, so wird die monatliche Varianz um 46% (QuikSCAT), bzw. 23% (NCEP) überschätzt.



**Abbildung 3.20.:** Zeitreihen der CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse aus den einzelnen Läufen. Jedes Windgeschwindigkeitsprodukt hat einen eigenen Referenzlauf (siehe Tabelle 3.4).

monatliche Variabilität nur in Parameter	Global		Äquat. Pazifik		Äquat. Atlantik		Nord- atlantik		Südl. Ozean	
	NC	QS	NC	QS	NC	QS	NC	QS	NC	QS
<b>K</b>	4	7	26	32	13	11	16	23	2	3
$\Delta p\text{CO}_2$	123	146	106	77	63	90	122	110	137	188

**Table 3.5.:** Prozentuale Anteile an der totalen Varianz des  $\text{CO}_2$ -Flusses. Es wird unterschieden zwischen globalen und regionalen Nettoflüssen. Die zeitliche Variabilität wird entweder ausschließlich in den Feldern des Gasaustauschkoeffizienten (K) oder in den Felder der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz ( $\Delta p\text{CO}_2$ ) zugelassen. Es wird der Einfluss des angewendeten Windgeschwindigkeitsproduktes betrachtet

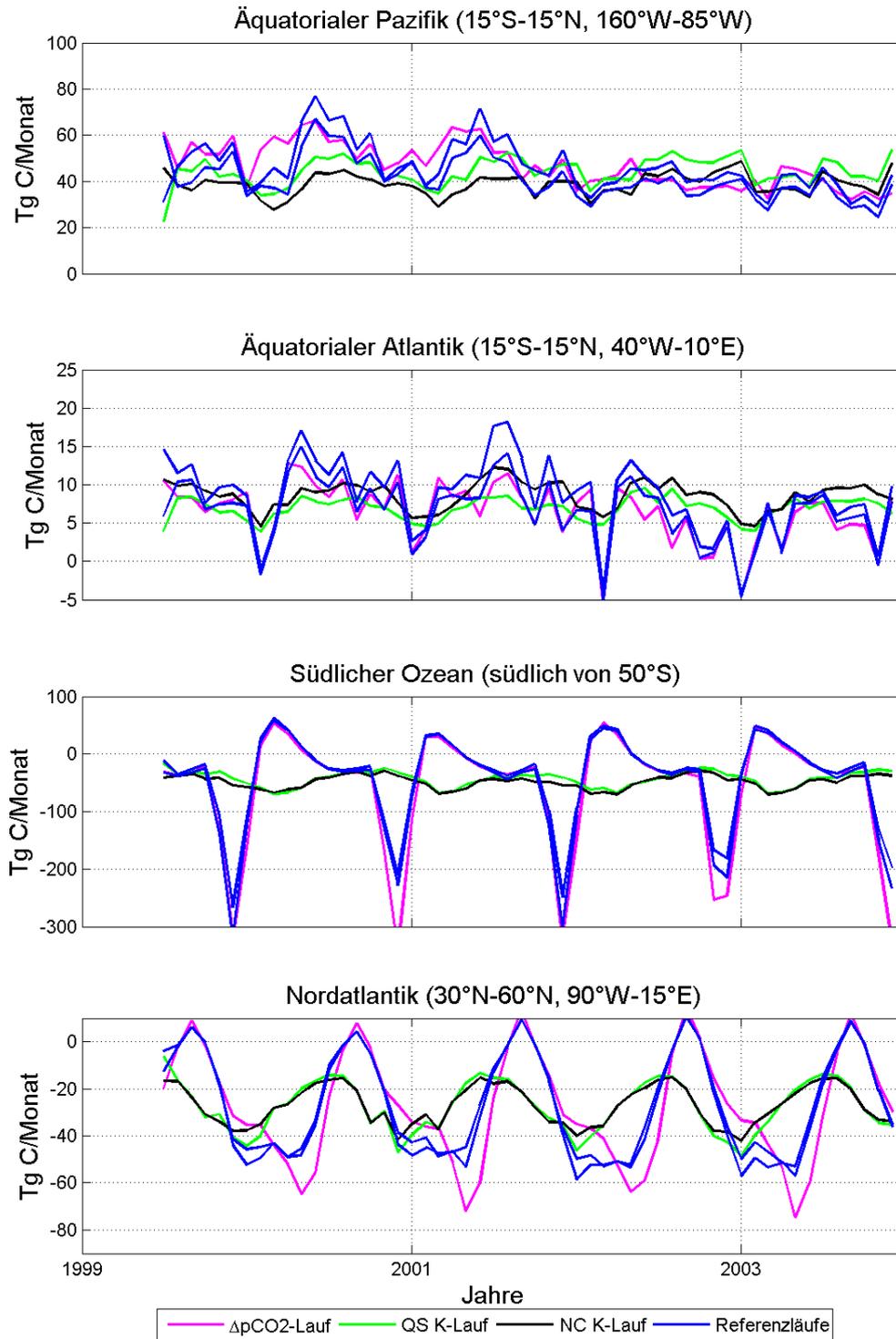
### Regionale $\text{CO}_2$ -Flüsse

Zusätzlich zu den globalen Nettoflüssen werden außerdem regionale Nettoflüsse bei Verwendung der täglichen QuikSCAT und NCEP-Windgeschwindigkeiten betrachtet. Diese regionalen Flüsse sind für die verschiedenen Läufe in Abbildung 3.21 auf der nächsten Seite dargestellt. Es werden vier Gebiete betrachtet:

1. der äquatoriale Pazifik als Region, die durch  $\text{CO}_2$ -Ausgasen geprägt ist,
2. der äquatoriale Atlantik, der ebenso wie der äquatoriale Pazifik durch  $\text{CO}_2$ -Ausgasen charakterisiert ist,
3. der südliche Ozean und
4. der Nordatlantik.

Die beiden letzteren sind gekennzeichnet durch einen ausgeprägten Jahresgang in der  $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz (Takahashi u. a., 2009a) und stellen die Aufnahmegebiete für  $\text{CO}_2$  dar (Wetzel u. a., 2005).

Der Anteil der monatlichen Variabilität der K-Läufe an der Variabilität der Referenzläufe ist in den vier Gebieten unterschiedlich stark. Dieses wird auch in der Übersicht der Varianzanteile der einzelnen Läufe in den vier Gebieten (Tabelle 3.5) deutlich. Die beiden äquatorialen Gebiete zeigen einen höheren Varianzanteil der K-Läufe am  $\text{CO}_2$ -Nettofluss, als das für die globalen Nettoflüsse der Fall ist. Die Varianzanteile des  $\Delta p\text{CO}_2$ -Laufs sind geringer. Auch in der Anwendung der zwei unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsprodukte NCEP und QuikSCAT unterscheiden sich die Varianzanteile der verschiedenen Läufe.



**Abbildung 3.21.:** Zeitreihen der regionalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse aus den einzelnen Läufen. Als Grundlage dienen tägliche Windfelder der QuikSCAT (markiert als QS) und NCEP (markiert als NC) Daten. Jedes Windgeschwindigkeitsprodukt hat einen eigenen Referenzlauf (siehe Tabelle 3.4).

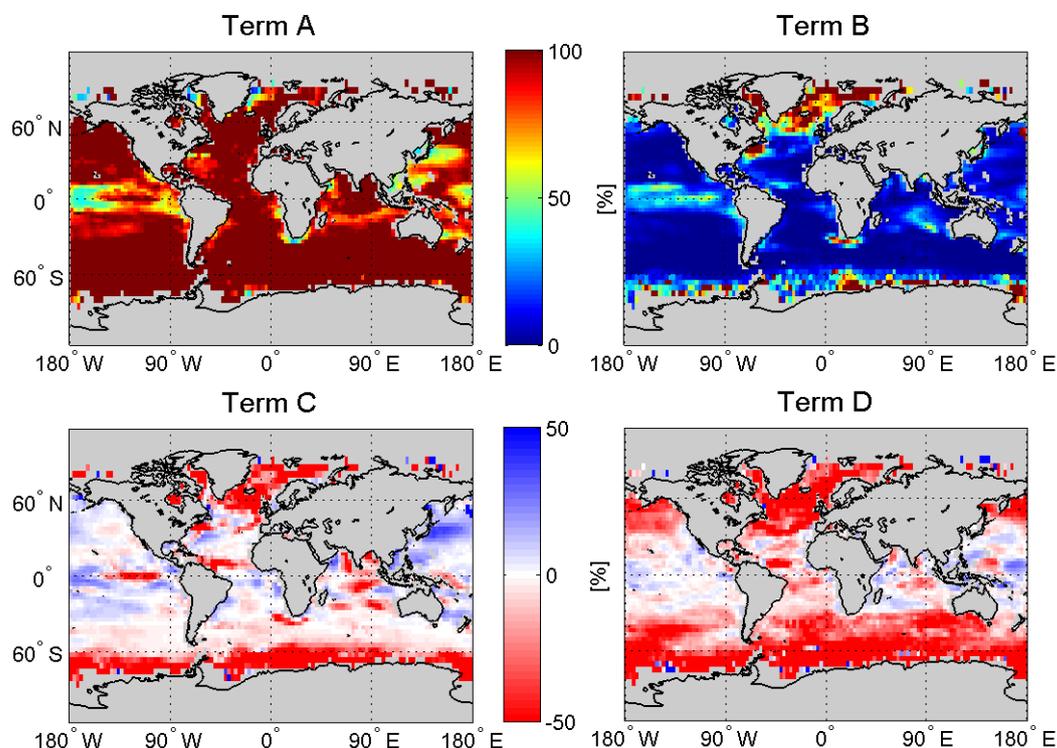
Um die Bedeutung der zeitlichen Variabilität des Windfeldes für die zeitliche Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses regional feiner auflösen zu können, wird wie in Unterabschnitt 3.1.6 beschrieben die totale skalierte Varianz des CO<sub>2</sub>-Flusses in die Terme A, B, C und D aufgeteilt. Eine Übersicht der Charakteristika dieser Terme findet sich in Tabelle 3.6.

Term	Bedeutung	qualitativer Beitrag zu $var(F)^*$
A	zeitliche Variation von $\Delta pCO_2$	globale Quelle
B	zeitliche Variation von K	globale Quelle
C	Kovarianz von K und $\Delta pCO_2$	regionale Quelle bzw. Senke
D	Kovariation höherer und gemischter Ordnung von K und $\Delta pCO_2$	regionale Quelle bzw. Senke

**Tabelle 3.6.:** Terme der totalen skalierten Varianz des CO<sub>2</sub>-Flusses,  $var(F)^* = A + B + C + D$ , siehe Gleichung 3.7 und 3.8 auf Seite 39.

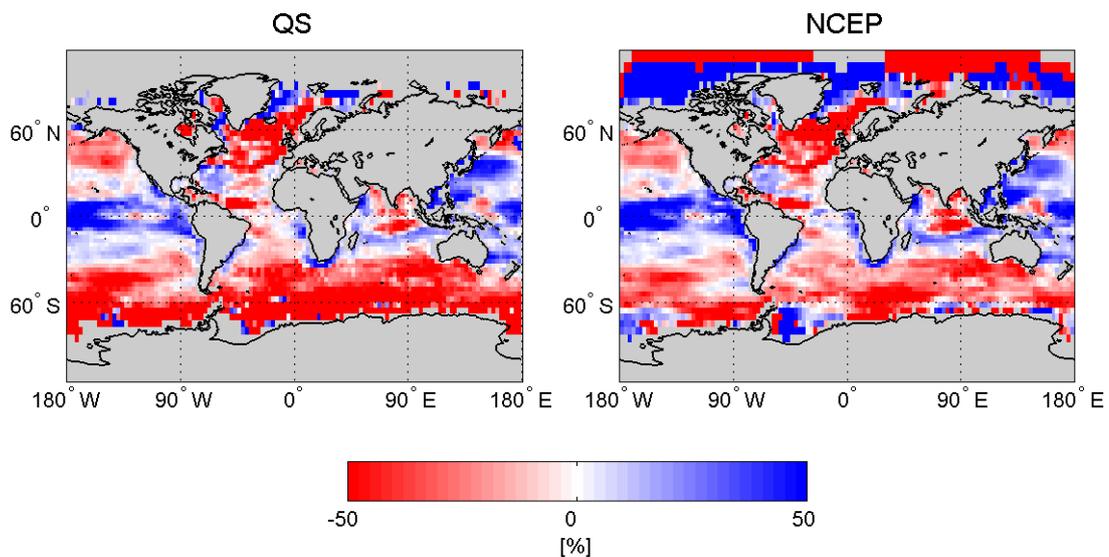
Diese Terme sind für die CO<sub>2</sub>-Flüsse unter Verwendung von QuikSCAT in Abbildung 3.22 als globale Felder dargestellt. Die Variationsterme von  $\Delta pCO_2$  und K (Term A und B) sind in den beiden oberen Tafeln der Abbildungen zu sehen und entsprechen qualitativ der Varianz der CO<sub>2</sub>-Flüsse aus dem  $\Delta pCO_2$ -Lauf bzw. aus dem K-Lauf. Term A hat die höchsten Anteile an der totalen, skalierten Varianz des CO<sub>2</sub>-Flusses ( $var(F)^*$ ): für mehr als 50% der Ozeanoberfläche hat Term A einen Anteil von mindestens 100% an  $var(F)^*$  und sinkt nicht unter 40%. Gebiete mit minimalem Anteil von Term A an  $var(F)^*$  sind im Pazifik zu finden. Term B dagegen ist charakterisiert durch geringe Anteile an  $var(F)^*$ ; mehr als 90% der Ozeanoberfläche zeigen einen Varianzanteil von 30% oder weniger. Hohe Werte sind im Nordatlantik zu finden (bis zu 100%) und auch im äquatorialen Pazifik (40-50%). Der Kovarianzterm C zeigt hohe, positive Werte im nordwestlichen Pazifik und hohe negative Werte in kleinen Bereichen des äquatorialen Ozeans und in den hohen Breiten der nördlichen und südlichen Hemisphäre. Für Term D, welcher die Kovariationen höherer und gemischter Ordnung repräsentiert und welcher in der vierten Tafel von Abbildung 3.22 dargestellt ist, gilt, dass sein Anteil an  $var(F)^*$  im tropischen und subtropischen Bereich zwischen 40°N und 40°S nahezu null ist. Nördlich und südlich davon jedoch ist Term D eine starke Senke

der totalen, skalierten Varianz des  $\text{CO}_2$ -Flusses.



**Abbildung 3.22.:** QuikSCAT, Aufteilung der totalen skalierten monatlichen Varianz des  $\text{CO}_2$ -Flusses in die Terme A, B, C und D (siehe Tabelle 3.6 auf der vorherigen Seite und Unterabschnitt 3.1.6)

Diese Betrachtung macht deutlich, dass eine Sensitivität der monatlichen  $\text{CO}_2$ -Fluss-Variabilität gegenüber der Wahl des Windgeschwindigkeitsprodukts (NCEP oder QuikSCAT) in genau den Gebieten zu erwarten ist, in denen sich die Terme B, C und D nicht gegenseitig aufheben und hohe positive oder negative Werte zeigen. In Abbildung 3.23 ist die globale räumliche Verteilung der Summe dieser drei Terme dargestellt für die QuikSCAT- und für die NCEP-Windgeschwindigkeiten. Die Summe der Terme ist nahezu überall verschieden von 0. Gebiete im äquatorialen Ozean sind durch hohe positive Werte der Summe charakterisiert, wohingegen in den hohen Breiten hohe negative Werte dieser Summe vorherrschen. Die Verwendung der NCEP-Windgeschwindigkeiten erzeugt dabei ähnliche räumliche Muster in der Summe der drei Varianzterme wie die Verwendung der QuikSCAT-Windgeschwindigkeit.

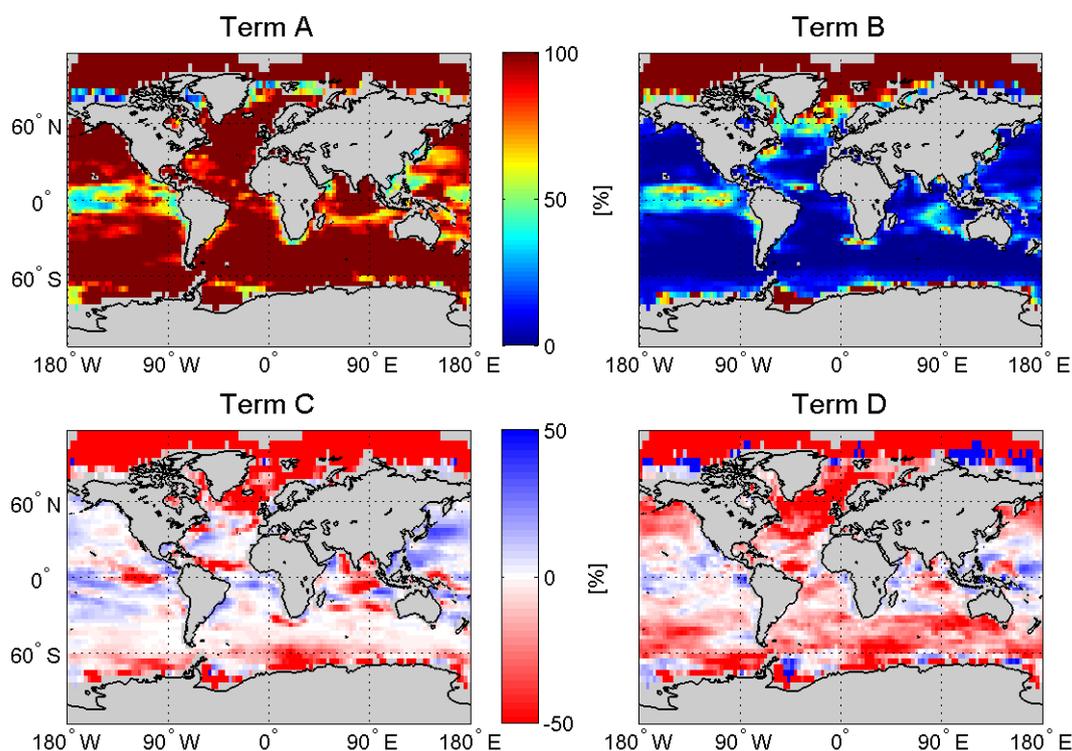


**Abbildung 3.23.:** Summe der Terme B, C und D (siehe Tabelle 3.6 auf Seite 66 und Unterabschnitt 3.1.6)

Was den Betrag der Summe angeht, sind allerdings Unterschiede zu sehen. So zeigen sich in der Verwendung der QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten geringere positive Werte im äquatorialen Ozean und höhere negative Werte im südlichen Ozean. Um diese Unterschiede den einzelnen Termen von  $var(F)$  zuordnen zu können, sind die Varianz-Terme für den  $CO_2$ -Fluss berechnet mit NCEP in Abbildung 3.24 zum Vergleich gezeigt. Die räumlichen Muster in den einzelnen Termen sind ähnlich wie die in Abbildung 3.22. Das Gebiet mit einem hohen Varianzanteil von Term B im äquatorialen Pazifik zeigt höhere Werte (ungefähr 50-60%) als Term B im selben Gebiet bei der Verwendung von QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten (40-50%). Dieses zeigt, dass die monatliche Variabilität im Gasaustauschkoeffizienten  $K$  einen größeren Einfluss auf die  $CO_2$ -Fluss-Variabilität im äquatorialen Pazifik hat, wenn NCEP anstelle von QuikSCAT verwendet wird. Im Fall der NCEP-Windgeschwindigkeiten zeigen Term C und D beide im südlichen Ozean eine geringere Senke der totalen skalierten Varianz als im Fall der QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten. Das bedeutet, dass sowohl die Kovarianz als auch die Kovariation von  $K$  und  $\Delta pCO_2$  für die geringere Senke der totalen skalierten Varianz des  $CO_2$ -Flusses stehen.

**Zur Bedeutung der zeitlichen Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten für die zeitliche Variabilität des  $CO_2$ -Flusses lässt sich zusammenfassen:**

**1. Die zwischenjährliche Variabilität des  $CO_2$ -Nettoflusses wird durch die Variabilität in  $\Delta pCO_2$  bestimmt. Die zwischenjährliche Variabilität**



**Abbildung 3.24.:** NCEP, Aufteilung der totalen skalierten Varianz des CO<sub>2</sub>-Flusses in die Terme A, B, C und D (siehe Tabelle 3.6 auf Seite 66 Unterabschnitt 3.1.6)

des Gasaustauschkoeffizienten ist hierfür zweitrangig.

2. Der Anteil der monatlichen Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten an der monatlichen Variabilität des globalen CO<sub>2</sub>-Nettoflusses beträgt 4% (NCEP) bzw. 7 % (QuikSCAT).

3. Die Varianzanteile Kovarianz und Kovariation von  $\Delta p\text{CO}_2$  und K zeigen, dass der Einfluss der monatlichen Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten K auf die Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses nahezu überall bedeutsam ist.

4. Gebiete, die sich durch Unterschiede im Varianzanteil des Gasaustauschkoeffizienten bei Verwendung der NCEP- bzw. der QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten hervorheben, sind insbesondere der südliche und der äquatoriale Ozean. Damit zeigen diese Gebiete eine Sensitivität der zeitlichen Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses gegenüber der Wahl des Windgeschwindigkeitsprodukts.

### 3.3. Abschließende Diskussion

#### 3.3.1. Aspekte des Nögler-Ansatzes im Vergleich zum Wanninkhof-Ansatz

Der Kern der Arbeit ist die Ableitung der Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  aus der Windgeschwindigkeit  $u_{10}$ . Die Anpassung der  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierung an die mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit als Randbedingung ist dafür notwendig. Ein wesentlicher Unterschied in der Verwendung des Nögler-Ansatzes bzw. des Wanninkhof-Ansatzes besteht in der zugrunde gelegten mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit als Randbedingung. Damit sind die Gasaustauschgeschwindigkeiten aus dem Wanninkhof-Ansatz gegenüber denen aus dem Nögler-Ansatz überschätzt, denn dieser geht von einer höheren mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit aus als der Nögler-Ansatz. In der vorliegenden Arbeit zeigt sich, dass die Verwendung des Nögler-Ansatzes eine Anpassung der  $k$ -Parametrisierung an das verwendete Windgeschwindigkeitsprodukt erlaubt und so die abgeschätzten Gasaustauschgeschwindigkeiten aus verschiedenen Windgeschwindigkeitsprodukten im globalen Mittel vergleichbar macht.

Bemerkenswert ist, wie sich die zeitliche Auflösung der Windgeschwindigkeitsfelder in der Berechnung der  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse unter Verwendung der zwei unterschiedlichen Ansätze auswirkt (siehe Unterabschnitt 3.2.3 und 3.2.4). So kehrt sich das Verhältnis zwischen Nettoflüssen aus täglichen Windgeschwindigkeiten zu Nettoflüssen aus monatlichen Windgeschwindigkeiten um, wenn an Stelle des Wanninkhof-Ansatzes der Nögler-Ansatz verwendet wird. Monatliche Windgeschwindigkeiten liefern im Nögler-Ansatz höhere Gasaustauschgeschwindigkeiten als tägliche Windgeschwindigkeiten in den Bereichen, die mit den Flächen von  $\text{CO}_2$ -Ausgasen in den äquatorialen Breiten zusammenfallen. Dadurch ist das mit monatlichen Windgeschwindigkeiten abgeschätzte Ausgasen erhöht und folglich der abgeschätzte global integrierte Nettofluss in den Ozean verringert. Im Wanninkhof-Ansatz führt die Verwendung monatlicher Windgeschwindigkeiten zu Gasaustauschgeschwindigkeiten, die nahezu über dem gesamten globalen Ozean höher sind, was eine Erhöhung des abgeschätzten globalen  $\text{CO}_2$ -Nettoflusses nach sich zieht. Die Fehlschätzung der Gasaustauschgeschwindigkeiten aus monatlichen Windgeschwindigkeiten hat seine generelle Ursache in der Nicht-Linearität der verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Beziehungen. Jedoch die Ausdehnung des Gebietes, für die eine Erhöhung der Gasaustauschgeschwindigkeiten bei Verwendung monatlicher Windgeschwindigkeitsfelder gilt, ist abhängig vom Verhältnis der Skalierungsfaktoren für die

k-u<sub>10</sub>-Beziehungen für tägliche und für monatliche Windgeschwindigkeit. Dieses Verhältnis unterscheidet sich in den beiden Ansätzen (Wanninkhof versus Nägler).

Der Grund dafür liegt zum einen in der Annahme einer global gültigen Rayleigh-Verteilung der Windgeschwindigkeit. Diese Annahme führt zu einer Unterschätzung des Faktors für die Ableitung der Gasaustauschgeschwindigkeit aus kurzzeitigen (täglichen) Windgeschwindigkeiten, wie im Folgenden gezeigt wird. Am Beispiel der täglichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten wird der Faktor für die Parametrisierung aus dem Langzeitmittel der Windgeschwindigkeit (7.8 m/s) unter der Annahme einer global gültigen Rayleigh-Verteilung ermittelt, analog zur Vorgehensweise in Wanninkhof (1992). Die Rayleigh-Verteilung  $P(u)$  wird wie in Abschnitt A.1 aus der mittleren globalen Windgeschwindigkeit bestimmt; der Windgeschwindigkeitsbereich umfasst wie in Wanninkhof (1992) 0 - 30 m/s. Damit ergibt sich  $16.5 = b_{2Rayleigh} \cdot \sum(P(u) \cdot u^2)$  und daraus folgt  $b_{2Rayleigh} = 0.213$ . Hierbei ist die räumliche Variabilität der Schmidt-Zahl nicht berücksichtigt. Damit der Faktor  $b_{2Rayleigh}$  vergleichbar ist mit  $b_{2täglich}$ , dem Faktor für die täglichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten (Tabelle 3.2), der für die Verwendung der HadISST-Daten 0.2452 beträgt, muss er um 10% (siehe Abschnitt 2.4) erhöht werden. Also ergibt sich ein Verhältnis der Faktoren von  $\frac{1.1 \cdot b_{2Rayleigh}}{b_{2täglich}} \approx 0.96$ . Damit ist ersichtlich, dass der Faktor für kurzzeitgemittelte Windgeschwindigkeiten im Wanninkhof-Ansatz um 4- 5% unterschätzt ist.

Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Verhältnisse der Skalierungsfaktoren ist die fehlende Beachtung monatlicher Variabilität der Windgeschwindigkeit im Wanninkhof-Ansatz. In diesem Ansatz wird die mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit in Proportionalität zum Quadrat (Kubik) der langzeitgemittelten Windgeschwindigkeit gesetzt und so der Proportionalitätsfaktor ermittelt. Der so abgeleitete Zusammenhang ist dann nur für langzeitgemittelte Windgeschwindigkeit gültig. Wanninkhof u. a. (2002) und Fangohr u. a. (2008) wenden allerdings diese Form des Zusammenhangs für Monatsmittel der Windgeschwindigkeit an und überschätzen damit die Gasaustauschgeschwindigkeiten. Zum Vergleich wird der Proportionalitätsfaktor für eine langzeitgemittelte Windgeschwindigkeit von 7.8 m/s (gilt für die QuikSCAT-Mission) abgeleitet:  $16.5 = b_{2langzeit} \cdot 7.8^2$ ; daraus folgt  $b_{2langzeit} = 0.2712$ . Hierbei ist die räumliche Variabilität der Schmidt-Zahl nicht berücksichtigt. Damit dieser Faktor für den langzeitgemittelten Wind vergleichbar ist mit  $b_{2monatlich}$ , dem Faktor für die monatlichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten (Tabelle 3.2), der für die Verwendung der HadISST-Daten 0.2724 beträgt, muss er um 10% (siehe Abschnitt 2.4) erhöht werden. Also ergibt sich ein Verhältnis der Faktoren für die Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit und den langzeit-

gemittelten Wind von  $\frac{1.1 \cdot b_{2langzeit}}{b_{2monatlich}} \approx 1.10$ . Somit ist gezeigt, dass der Skalierungsfaktor für monatliche Windgeschwindigkeiten im Wanninkhof-Ansatz um 9-10% überschätzt wird.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben entspricht die hier im Nägler-Ansatz verwendete globale Randbedingung von  $k_{av} = 16.5$  cm/h dem zeitlichen Mittel der Gasaustauschgeschwindigkeit über den Zeitraum 1950-1995. Der Nägler-Ansatz impliziert, dass diese globale Randbedingung gültig sei für den Zeitraum, in dem das jeweilige, zu verwendende Windgeschwindigkeitsprodukt vorliegt. Er impliziert somit, dass die mittlere globale Gasaustauschgeschwindigkeit stationär sei, also unabhängig vom betrachteten Zeitraum. Gleiches gilt für den Wanninkhof-Ansatz, dessen globale Randbedingung  $k_{av}$  auch aus einer  $^{14}\text{C}$ -Bestandsänderung stammt. Es bleibt offen, welche Ungenauigkeit diese angenommene Stationarität bei der Bestimmung der Gasaustauschgeschwindigkeit und bei resultierenden Gasflüssen zwischen Ozean und Atmosphäre birgt. Mögliche langfristige Trends in der Windgeschwindigkeit, wie sie von Young u. a. (2011) gesehen werden, haben einen Einfluss auf die globale Gasaustauschgeschwindigkeit, die dann gerade nicht mehr stationär ist.

Des weiteren liegt eine Ungenauigkeit in der Anpassung der  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierung an Windgeschwindigkeitsprodukte, die keine verlässlichen Windgeschwindigkeitsdaten über eisbedeckten Flächen liefern, wie z.B. die auf Scatterometrie basierenden, hier verwendeten Satellitenwindgeschwindigkeiten. Die eisbedeckten Flächen tragen zum Gasaustausch bei, da zwischen dem Eis offene Wasserflächen sind, und sind somit in der mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit aus der  $^{14}\text{C}$ -Inventur berücksichtigt. Im Fall der Anpassung der  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierung für die Satellitenwindgeschwindigkeiten geht der Nägler-Ansatz jedoch davon aus, dass das Mittel der globalen Gasaustauschgeschwindigkeit über den eisfreien Flächen gleich der globalen Randbedingung  $k_{av}$  ist. Dieses stellt eine Inkonsistenz im Ansatz dar.

#### 3.3.2. Die Zusammenhänge

Die drei hier verwendeten Zusammenhänge zwischen der Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  und der Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  (siehe Gleichung 3.1, 3.2 und 3.3) zeigen Unterschiede in Bezug auf die Gasaustauschgeschwindigkeit und folglich auch in Bezug auf den  $\text{CO}_2$ -Nettofluss. Die neuere, hybride Parametrisierung nach Wanninkhof u. a. (2009) zeigt höhere  $\text{CO}_2$ -Nettoflüsse in den Ozean als die quadratische Parametrisierung, allerdings nur bei Verwendung täglicher Windgeschwin-

digkeitsfelder. Für Windgeschwindigkeitsfelder in wöchentlicher und monatlicher Auflösung liefert die hybride Parametrisierung die geringsten CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse aller drei Parametrisierungen. Entgegen der Ergebnisse von Wanninkhof u. a. (2009) für den CO<sub>2</sub>-Nettofluss aus dieser Parametrisierung, ist also zu erwarten, dass dieser Zusammenhang für zeitlich hoch aufgelöste Windgeschwindigkeiten höhere Nettoflüsse liefert als die quadratische Parametrisierung. Wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, können in der Beschreibung der Gasaustauschgeschwindigkeit aus der Windgeschwindigkeit nicht alle Prozesse erfasst werden, die einen Einfluss auf den kinetischen Antrieb des Gasaustausches haben. Der hier verwendete hybride  $k-u_{10}$ -Zusammenhang stellt dabei die Variante dar, die die meisten Prozesse (sowohl windgesteuert als auch unabhängig von der Windgeschwindigkeit) vereint.

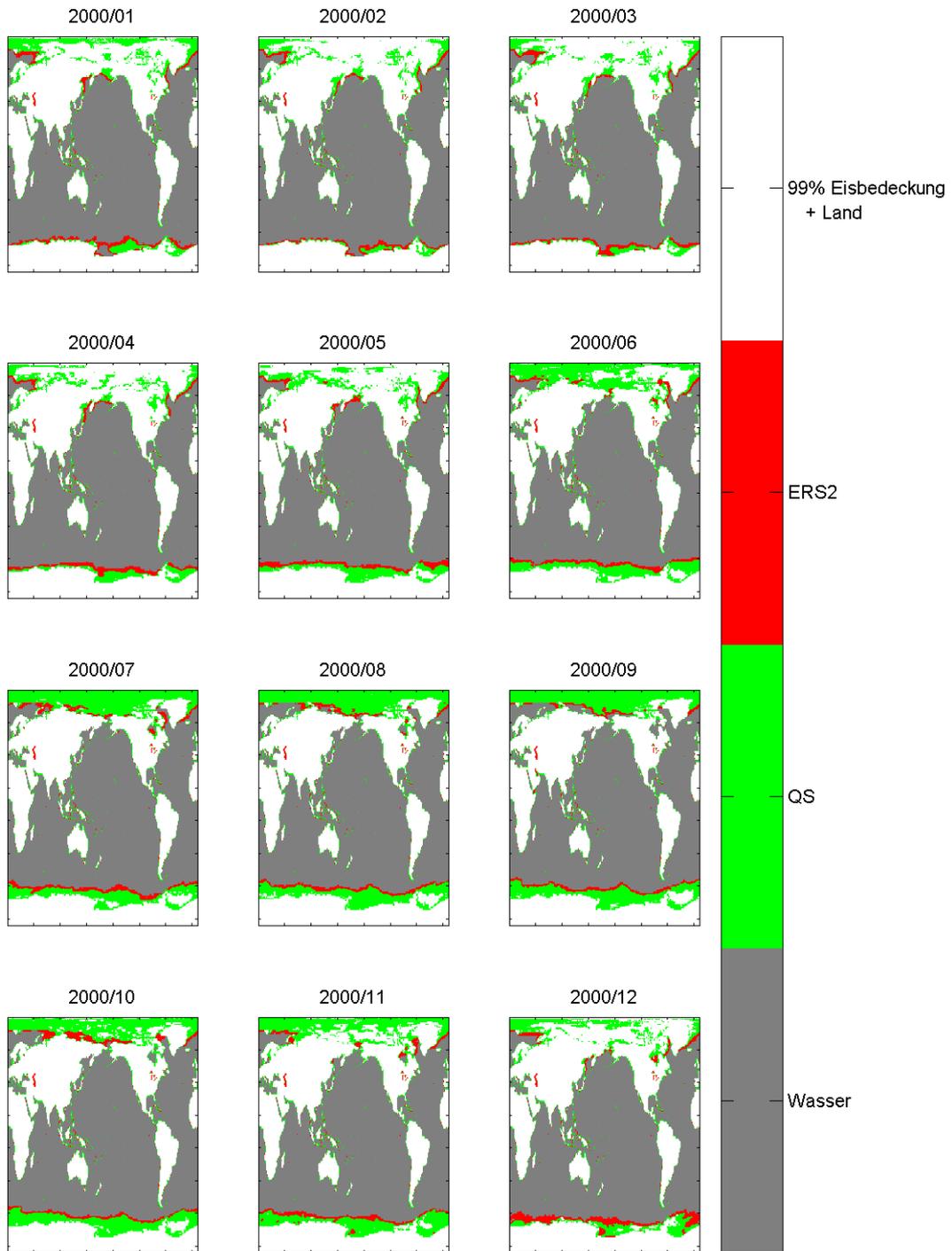
### **3.3.3. Windgeschwindigkeit als Grundlage für die Gasaustauschgeschwindigkeit**

Die Grundlage der in dieser Arbeit abgeschätzten Gasaustauschgeschwindigkeiten bilden sowohl globale Felder von Satellitenwindgeschwindigkeiten als auch globale Reanalyse-Winddaten von NCEP. Das Problem bestehender Unterschiede zwischen den Windgeschwindigkeitsprodukten, was den Betrag der Windgeschwindigkeit an sich angeht, kann mit dem Nögler-Ansatz umgangen werden. Gasaustauschgeschwindigkeiten aus unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsprodukten sind mit dem Nögler-Ansatz im globalen Mittel vergleichbar. Regional sind jedoch Unterschiede in der Gasaustauschgeschwindigkeit aus verschiedenen Windgeschwindigkeitsprodukten zu sehen, die sich auch auf den CO<sub>2</sub>-Nettofluss auswirken (siehe Unterabschnitt 3.2.4).

Die Abbildung der zeitlichen Variabilität in den QuikSCAT und NCEP-Windgeschwindigkeitsdaten ist ein weiterer Aspekt, der im Zusammenhang mit der monatlichen Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses in dieser Arbeit untersucht wurde. Für den Zeitraum der QuikSCAT-Mission ist zu sehen, dass der CO<sub>2</sub>-Fluss in seiner monatlichen Variabilität hauptsächlich durch die monatliche Variabilität im thermodynamischen Antrieb, also in  $\Delta p\text{CO}_2$  bestimmt wird. In Bereichen des äquatorialen Ozeans jedoch hat die monatliche Variabilität im Gasaustauschkoeffizient einen bedeutenden Einfluss auf die Variabilität im CO<sub>2</sub>-Fluss. Dieses sind genau die Gebiete, in denen der Einfluss der in den verschiedenen Windgeschwindigkeitsfeldern abgebildeten monatlichen Variabilität zum Tragen kommt. Das bedeutet, dass die richtige Darstellung der monatlichen Variabilität in der Windgeschwindigkeit erheblich ist für die monatliche Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses in diesen Gebieten.

Ein weiterer Unterschied in den Windgeschwindigkeitsprodukten als Grundlage zur Berechnung des Gasaustauschs liegt in der Tatsache, dass die Scatterometer-Winddaten nicht über dem gesamten globalen Ozean zur Verfügung stehen. Globale Nettoflüsse, die mit diesen Windgeschwindigkeitsdaten abgeschätzt werden, beschränken sich also immer auf die Bereiche, in denen die Ableitung der Windgeschwindigkeit aus den Radarrückstreukoeffizienten nicht von vorhandenem Eis beeinflusst wird. Dieses ist grob gesagt der eisfreie Ozean, aber doch wiederum nicht ganz. Die „Eispunkte“ in den Scatterometer-Windgeschwindigkeitsprodukten, also die Punkte, an denen wegen der Eisbedeckung keine verlässliche Windgeschwindigkeit aus dem Radarrückstreukoeffizienten abgeleitet werden konnte, zeigen sich in Abbildung 3.25. Zum Vergleich ist zusätzlich die in den HadISST-Daten enthaltene Grenze der Eisbedeckung von 99% angegeben. Hier ist zu erkennen, dass die Grenze der Eisbedeckung, bis zu der Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden, zwischen den einzelnen Satelliten-Windgeschwindigkeitsprodukten variiert. Nach Piolle u. Bentamy (2002) liegt die Grenze der Eisbedeckung für ERS-1 und ERS-2 bei ca. 10%. Für die Windgeschwindigkeitsfelder von QuikSCAT finden sich keine konkreten Angaben, aber es ist zu sehen, dass die Grenze der Eisbedeckung in den ERS-Windgeschwindigkeiten weiter äquatorwärts reicht als die Eisbedeckungsgrenze in den QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten, was vermuten lässt, dass die Eisbedeckungsgrenze in den QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten einer Eisbedeckung entspricht, die höher als 10% ist. Für die Windgeschwindigkeitsdaten der MetOp-A- und der Oceansat-2-Mission liegt die Eisbedeckungsgrenze bei ca. 15% (persönliche Kommunikation mit Anton Verhoef von KNMI).

Ein Aspekt, der in der Betrachtung der Einflüsse der monatlichen Variabilität der beiden verschiedenen Antriebe des CO<sub>2</sub>-Flusses auf denselben erwähnt werden muss, ist die Vorgehensweise, wie die CO<sub>2</sub>-Flüsse in dieser Arbeit berechnet werden. Wie auch in anderen Arbeiten, die die Takahashi2002 oder Takahashi2009-Daten zur Berechnung von globalen CO<sub>2</sub>-Flüssen verwenden (z.B. Wanninkhof u. a., 2009; Fangohr u. a., 2008 ), werden in dieser Arbeit die  $\Delta p\text{CO}_2$ -Felder als vorgegeben genommen und durch Multiplikation mit den Feldern der Gasaustauschkoeffizienten werden die Felder des CO<sub>2</sub>-Flusses berechnet. Dabei wird vernachlässigt, dass das  $\Delta p\text{CO}_2$ , wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, u. a. auch abhängig ist vom CO<sub>2</sub>-Fluss über die Wasser-Luft-Grenzschicht. Da allerdings die anderen, die Partialdruckdifferenz von CO<sub>2</sub>beeinflussenden Prozesse, entscheidender sind, macht diese Art der Ableitung des CO<sub>2</sub>-Flusses nur einen geringen Fehler aus. Ein direktes Beispiel für die geringe Abhängigkeit des Gasaustauschs auf den CO<sub>2</sub>-Partialdruck im Wasser und damit auf die CO<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz zeigt sich in



**Abbildung 3.25.:** Grenzen der Eisbedeckung, bis zu der in den Scatterometerwindgeschwindigkeitsprodukten, ERS-2 und QuikSCAT sinnvoll Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden können, für das Jahr 2000. Eisbedeckung nach den HadISST-Daten.

den Ergebnissen von Kapitel 4. Die Entkopplung von  $\Delta p\text{CO}_2$  vom Gasaustausch ist somit möglich, ohne dass es zu großen Inkonsistenzen kommt und die Einflüsse der zeitlichen Variabilität der beiden Antriebe des  $\text{CO}_2$ -Flusses können getrennt betrachtet werden.

## 4. Diskriminierung der Gasaustauschparametrisierung im Nordatlantik

Dieses Kapitel behandelt die Frage, ob die drei verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen im Bereich des Nordatlantiks diskriminiert werden können, d.h., ob eine Aussage darüber getroffen werden kann, welche der drei in Kapitel 3 verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Beziehungen hier den  $\text{CO}_2$ -Fluss besser darstellt. Hierfür wird der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck im Wasser numerisch simuliert. Die in Kapitel 3 beschriebenen Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage der QuikSCAT-Daten werden in diesem Kapitel verwendet, um den  $\text{CO}_2$ -Austausch zu beschreiben, welcher Einfluss auf den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck im Wasser hat. Der Grundgedanke ist, die so simulierten  $\text{CO}_2$ -Partialdruck-Werte aus drei verschiedenen Gasaustauschparametrisierungen mit gemessenen  $\text{CO}_2$ -Partialdruck-Werten zu vergleichen. Die Simulation erfolgt in einem Lagrange'schen Ansatz; das bedeutet, die relevanten Prozesse werden entlang der Trajektorien einzelner Wasserpartikel modelliert. Dieser Simulationsansatz findet in der Ozeanografie Anwendung bei der Betrachtung der Ausbreitung von sowohl Ölteppichen (Lonin, 1999) als auch mariner Organismen (Cowen u. Sponaugle, 2009). In der Meteorologie wird diese Methode verwendet, um die Ausbreitung von z.B. Luftverschmutzungen zu studieren (Stohl u. a., 2003).

In dieser Arbeit werden die Trajektorien mit Hilfe von simulierten Geschwindigkeitsfeldern eines Ozeanzirkulationsmodells bestimmt und so gewählt, dass ihre Start- und Endpunkte zeitlich und räumlich mit Oberflächenmessungen der  $\text{CO}_2$ -Fugazität zusammenfallen. Dieses ermöglicht dann einen Vergleich der gemessenen  $\text{CO}_2$ -Fugazität am Endpunkt der Trajektorie mit der bis zu diesem Zeitpunkt simulierten  $\text{CO}_2$ -Fugazität.

Damit bildet der hier vorgestellte Ansatz eine Verknüpfung von

1. Feldern (Geschwindigkeit, Temperatur und Salzgehalt) eines Ozeanzirkulationsmodells,
2. verbesserten Gasaustauschgeschwindigkeiten aus Kapitel 3 und

### 3. Oberflächenmessungen der CO<sub>2</sub>-Fugazität

Die Beschreibung der verbesserten Gasaustauschgeschwindigkeiten erfolgte in Kapitel 3. In Unterabschnitt 4.1.1 werden die Daten aus den CO<sub>2</sub>-Fugazitätsmessungen an der Meeresoberfläche beschrieben; Unterabschnitt 4.1.2 befasst sich mit der Modellsimulation und deren verwendeten Feldern. Die Vorarbeiten zur Schaffung der Grundlage der hier verwendeten Lagrange-Modellierung werden in Unterabschnitt 4.1.3 behandelt und schließlich wird in Unterabschnitt 4.1.4 die Lagrange-Modellierung selber beschrieben.

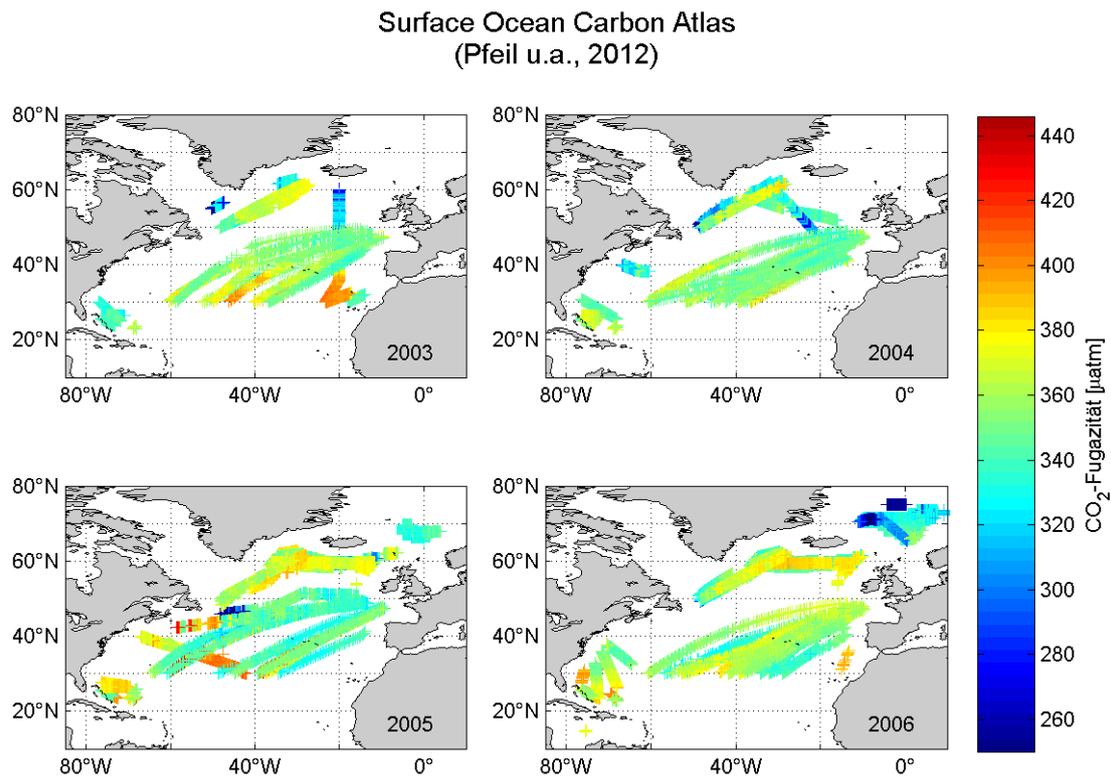
## 4.1. Daten und Methoden

### 4.1.1. SOCAT

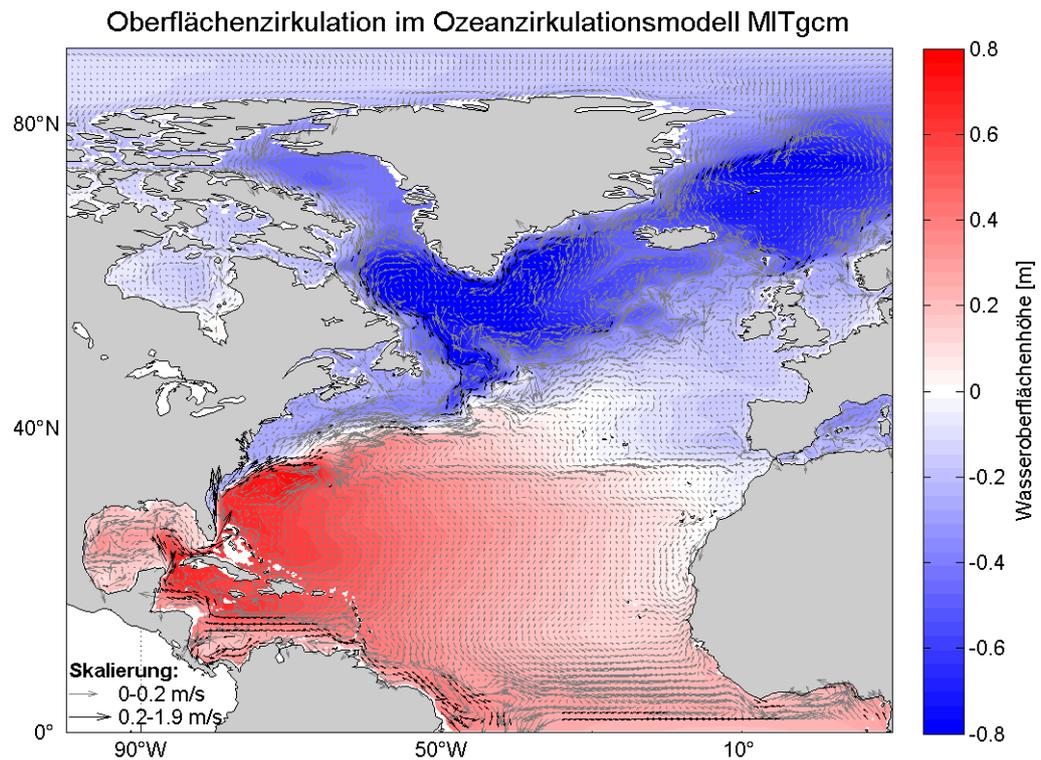
Der “Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas” (SOCAT) ist eine Zusammenstellung vereinheitlichter, qualitätsgeprüfter Kohlenstoffdioxidparameter des marinen Oberflächenwassers. Dieser Atlas umfasst 6,3 Millionen Datenpunkte des globalen Ozeans aus einem Zeitraum von 1968-2007 (Pfeil u. a., 2012). Neben den CO<sub>2</sub>-Fugazitätsmessungen im Oberflächenwasser sind zu den Datenpunkten u. a. auch die geographischen Koordinaten, der Zeitpunkt der Messung, Temperatur (SST) und Salzgehalt (SSS) enthalten. In dieser Arbeit werden Messungen aus den Jahren 2003 bis einschließlich 2006 für den Nordatlantik verwendet. Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten SOCAT-Messungen.

### 4.1.2. Das Ozeanzirkulationsmodell

Für den Diskriminierungsansatz werden Felder der Geschwindigkeit, der Temperatur und des Salzgehalts in dreidimensionaler Form aus dem hoch aufgelösten Ozeanzirkulationsmodell MITgcm (Marshall u. a., 1997) verwendet. Diese liegen als instantane Felder einmal pro Tag vor. Die Konfiguration des Modells für dieses Gebiet ist beschrieben in Serra u. a. (2010). Das Modellgebiet erstreckt sich über den Atlantik nördlich von 33°S. In Abbildung 4.2 ist das Modellgebiet für den Atlantik nördlich des Äquators zusammen mit der mittleren Oberflächengeschwindigkeit und der mittleren Wasseroberflächenhöhe dargestellt. Die räumliche horizontale Auflösung des Modells beträgt 8 km. Die vertikale Auflösung beträgt 10 m in den oberen Wasserschichten. Der atmosphärische Antriebe des Modells erfolgt über Wärme-, Süßwasser- und Impulsflüsse, die aus atmosphärischen NCEP-Daten (Kalnay u. a., 1996) in 6-stündlicher Auflösung mit Hilfe von Bulk-Formeln



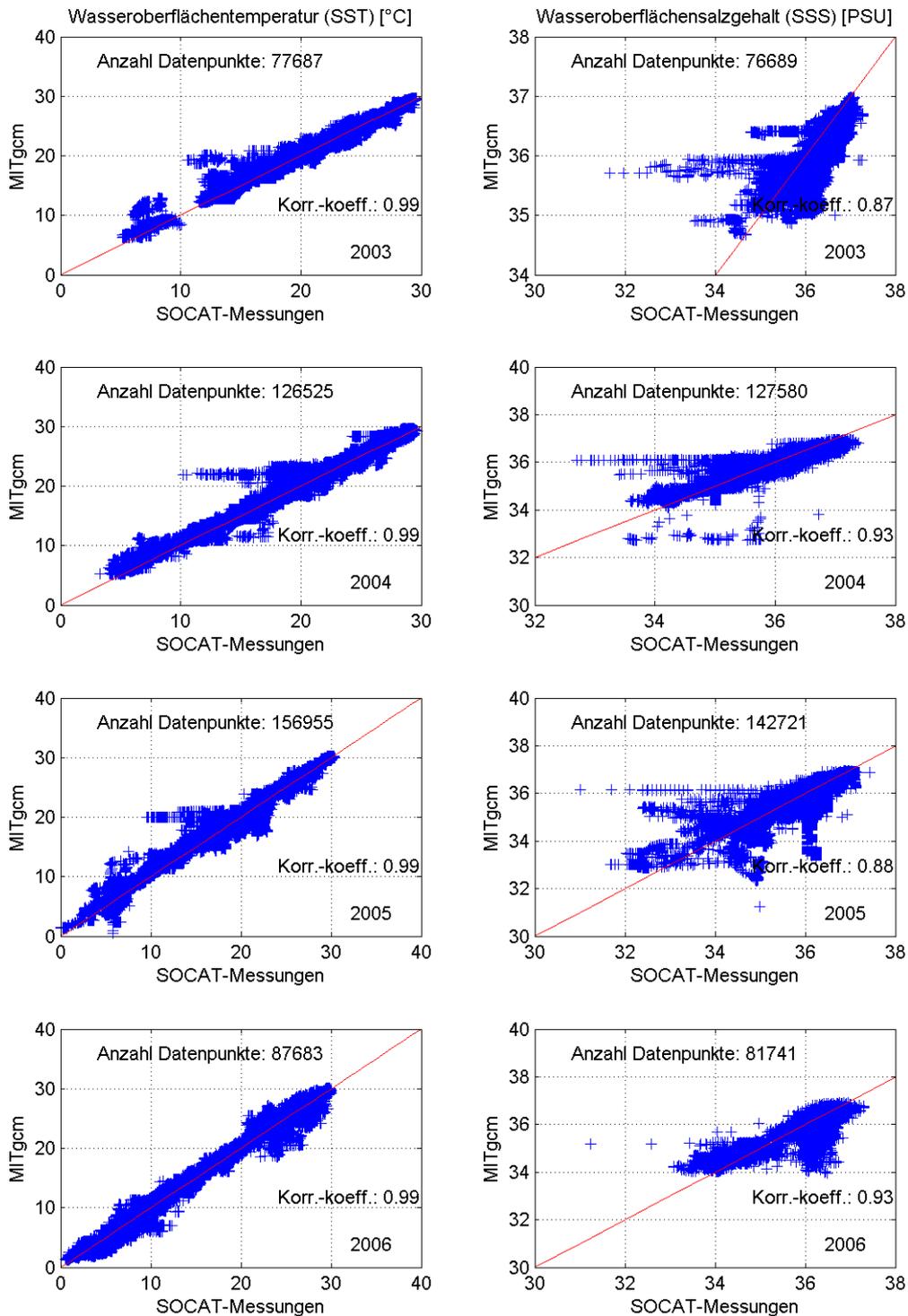
**Abbildung 4.1.:** In dieser Arbeit verwendetet SOCAT-Messungen unterteilt nach Jahren. Dargestellt ist die geographische Lage der Schiffsrouten, während derer die SOCAT-Messungen stattfanden. Die farbliche Kodierung (siehe Farbskala) bezieht sich auf den dargestellten gemessenen Parameter,  $f\text{CO}_2$ , die  $\text{CO}_2$ -Fugazität in  $\mu\text{atm}$  (siehe Abschnitt 2.2).



**Abbildung 4.2.:** Modellgebiet nördlich des Äquators. Die dargestellten Parameter sind die mittlere Oberflächenhöhe (farblich kodiert) und die mittlere geostrophische Oberflächengeschwindigkeit als Pfeile. Die Strömungsgeschwindigkeit ist in zwei Klassen unterteilt, siehe Skalierung. Der Zeitraum der Mittelwertbildung sind die Jahre 1948-2009.

abgeleitet wurden. Der Zeitraum der Modellsimulation ist 1948-2009.

Zum Vergleich der SOCAT-SST- und SSS-Daten mit denen aus den Feldern der Modellsimulation sind in Abbildung 4.3 Streudiagramme dieser Parameter für die vier Jahre 2003-2006 dargestellt. Sie zeigen, wie die Modellergebnisse und die SOCAT-Messungen in SST und SSS miteinander korreliert sind. Für SST ergibt sich eine signifikante Korrelation von 0.99 in allen Jahren; im Parameter SSS werden signifikante Korrelationen von 0.87 (2003), 0.93 (2004 und 2006) und 0.88 (2005) festgestellt (Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ). Die Gesamtdatenmenge der SOCAT-Messungen wurde für den Vergleich mit den Modell SSS und SST-Werten verringert, da einige Datenpunkte als Ausreißer identifiziert wurden. Die Datenpunkte, um die die Datenmengen reduziert wurden, lassen sich in allen Jahren und beiden Parametern einer, bzw. zwei Schiffsreisen zuordnen und legen nahe, dass den Abweichungen ein systematischer Fehler in der Messung von Temperatur und Salzgehalt zugrunde liegt.



**Abbildung 4.3.:** Temperatur- (linke Spalte) und Salzgehaltsdaten (rechte Spalte) aus den SOCAT-Messungen gegen den Salzgehalt und die Temperatur aus der Modellsimulation für die Jahre 2003-2006. Zum Vergleich ist in rot die Identitätslinie dargestellt. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist  $\geq 95\%$ .

### 4.1.3. Berechnung der Trajektorien

Für den Zeitpunkt einer jeweiligen SOCAT-Messung wird am Ort dieser Messung ein virtueller Treibkörper erzeugt. Der Ortsvektor dieses Treibkörpers (hier als  $p\vec{o}s$  bezeichnet) ist im Bezugssystem des Gitters des Zirkulationsmodells bestimmt und bildet den Startpunkt der Trajektorie. Die Position des Treibkörpers zum Zeitpunkt  $t$  im Raum ist dann:

$$p\vec{o}s(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

Am Ort  $p\vec{o}s$  zum Zeitpunkt  $t$  wirkt auf den Treibkörper im Wasser eine Strömungsgeschwindigkeit  $\vec{v}$  mit den drei Richtungskomponenten  $v_x$ ,  $v_y$  und  $v_z$ .  $\vec{v}$  ist zeit- und ortsabhängig und wird durch räumliche und zeitliche lineare Interpolation der Geschwindigkeitsfelder aus dem Zirkulationsmodell ermittelt.  $\vec{v}$  bewirkt eine Translation des Treibkörpers im Raum und definiert damit die Position zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$ :

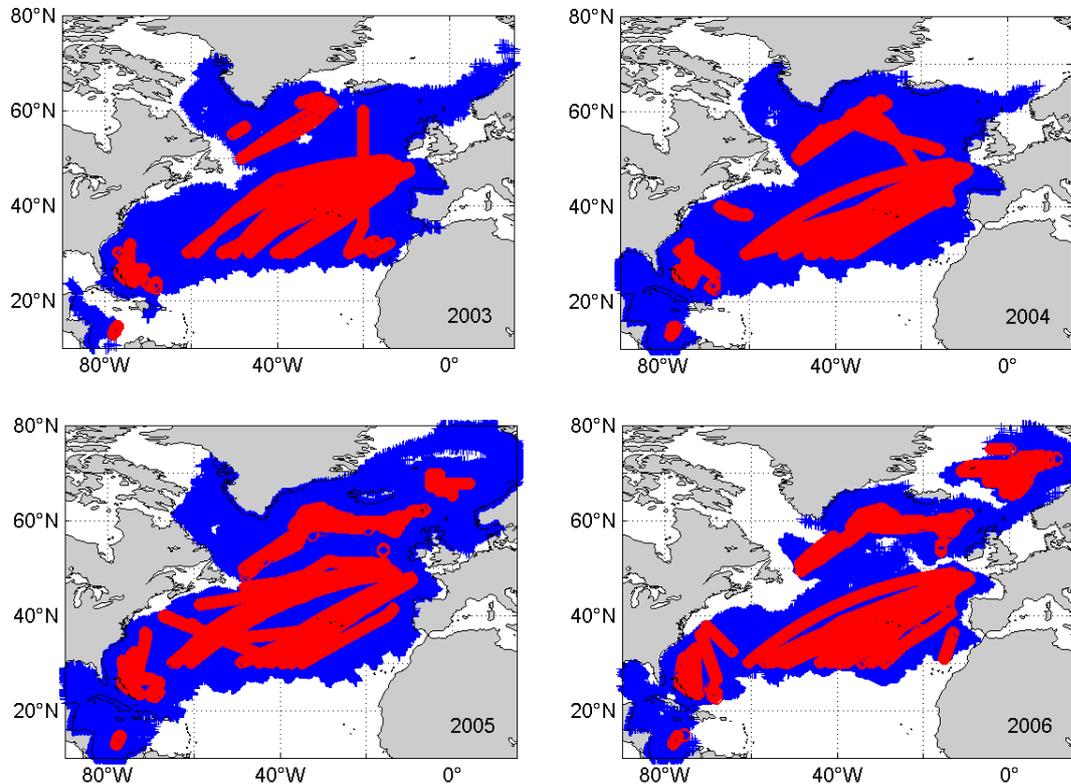
$$p\vec{o}s(t + \Delta t) = (x(t) + v_x \cdot \Delta t, y(t) + v_y \cdot \Delta t, z(t) + v_z \cdot \Delta t) \quad (4.1)$$

Der Zeitschritt  $\Delta t$  beträgt 20 Minuten. Die Trajektorie des Treibkörpers ergibt sich so direkt aus den unterschiedlichen Positionen, die er im Laufe seiner Drift annimmt. Auf diese Weise werden ausgehend von allen verwendeten SOCAT-Messungen Trajektorien berechnet. Die Trajektorien werden einzeln für die Jahre 2003 bis einschließlich 2006 bestimmt, so dass der Weg eines Treibkörpers maximal für ein Jahr verfolgt wird, gesetzt den Fall, dass der Startzeitpunkt der 1. Januar des Jahres war. Abbildung 4.4 zeigt die Ausbreitung der virtuellen Treibkörper für die vier Jahre.

Da die Anzahl der SOCAT-Messungen mit den Jahren zunimmt und dieses die Rechenzeit, was die Trajektorienpositionen betrifft, erhöht, wurde für das Jahr 2006 nur die Hälfte der jeweiligen SOCAT-Messungen betrachtet, d.h. die künstlichen Treibkörper wurden für jeden zweiten Messpunkt erzeugt. Die Anzahl der zur Berechnung der Trajektorien verwendeten SOCAT-Messungen in den einzelnen Jahren ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

So, wie sich der Startpunkt und die Startzeit der Trajektorie des virtuellen Treibkörpers aus den SOCAT-Messungen ergeben, wird auch der Endpunkt einer Trajektorie definiert. Die Trajektorie eines virtuellen Treibkörpers wird als beendet angesehen, wenn der Treibkörper ein zweites Mal beprobt wird, also wenn die

Ausbreitung der virtuellen Treibkörper



**Abbildung 4.4.:** Die Positionen der virtuellen Treibkörper bestimmen sich aus den Feldern der Strömungsgeschwindigkeit aus dem Ozeanzirkulationsmodell, siehe Gleichung 4.1. Der Weg eines virtuellen Treibkörpers wird für maximal ein Kalenderjahr verfolgt. In rot sind die initialen Positionen der Treibkörper dargestellt. Diese Positionen ergeben sich aus den SOCAT-Messungen, siehe Abbildung 4.1.

Jahr	2003	2004	2005	2006
Anzahl der verwendeten SOCAT-Messungen	80441	131052	158429	92727

**Tabelle 4.1.:** Anzahl der verwendeten SOCAT-Messungen

Position des Treibkörpers zeitlich und räumlich dicht genug mit einer SOCAT-Messung zusammenfällt. Um zu überprüfen, ob das der Fall ist, werden die zeitlichen und räumlichen Koordinaten der Trajektorien der virtuellen Treibkörper mit den zeitlichen und räumlichen Koordinaten der SOCAT-Messungen verglichen. Ein Treibkörper wird als erneut beprobt angesehen, wenn im Umkreis von 200 Metern bis zu einer Wassertiefe von 10m und in einem Zeitfenster von  $\pm 12$  Stunden in Bezug auf die Trajektorien-Koordinaten eine SOCAT-Messung vorhanden ist.

#### 4.1.4. Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks entlang der Trajektorien

Für die doppelt beprobten Treibkörper wird in einem Lagrange'schen Ansatz verfolgt, wie sich der anfangs gemessene CO<sub>2</sub>-Partialdruck im Verlauf der Trajektorie ändert, um dann zum Zeitpunkt der zweiten Beprobung den gemessenen und den modellierten Partialdruck vergleichen zu können. Der Zeitschritt von 20 Minuten aus der Bestimmung der Trajektorien wird beibehalten.

Der Partialdruck von CO<sub>2</sub> im Oberflächenwasser, pCO<sub>2</sub>, ist eine Funktion des Salzgehalts S, der Alkalinität ALK, der Temperatur T und der Konzentration des gelösten anorganischen Kohlenstoffs, DIC ("dissolved inorganic carbon"). Die totale Ableitung und damit die Änderung des Partialdrucks in Meerwasser wird hierfür berechnet wie in Takahashi u. a. (1993):

$$dpCO_2 = \frac{\partial pCO_2}{\partial T} dT + \frac{\partial pCO_2}{\partial S} dS + \frac{\partial pCO_2}{\partial DIC} dDIC + \frac{\partial pCO_2}{\partial ALK} dALK \quad (4.2)$$

Die einzelnen partiellen Ableitungen dieser Gleichung werden nach Takahashi u. a. (1993) und Sarmiento u. Gruber (2006) bestimmt. Eine Übersicht ist in Tabelle 4.2 zu finden.

Die partielle Ableitung nach dem Salzgehalt in der dritten Zeile von Tabelle 4.2 gilt nur für konstante Alkalinität und konstantes DIC. Jedoch sind Salzgehaltsänderungen mit Süßwasserflüssen verknüpft. Für Süßwasser wiederum ist die Alkalinität 0 und der gelöste anorganische Kohlenstoff nahezu null. Das bedeutet also, dass Salzgehaltsänderungen, interpretiert als Süßwasserflüsse, zusätzlich zum reinen Salzgehaltseffekt auch noch durch Änderungen in DIC und Alkalinität eine Änderung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks bewirken. Dieses ist in der letzten Zeile in Tabelle 4.2 berücksichtigt. Die zeitlichen Änderungen der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorien werden aus den Modelldaten, die auf die Trajektorienpositionen und -zeiten interpoliert wurden, bestimmt. Änderungen des

Parameter	Definition	Abkürzung	Mittel		
			global	hohe Breiten	niedrige Breiten
Temperatur [°C <sup>-1</sup> ]	$\frac{1}{pCO_2} \frac{\partial pCO_2}{\partial T}$	$\gamma_T$	0.0423	0.0423	0.0423
Salzgehalt	$\frac{S}{pCO_2} \frac{\partial pCO_2}{\partial S}$	$\gamma_S$	1	1	1
DIC	$\frac{DIC}{pCO_2} \frac{\partial pCO_2}{\partial DIC}$	$\gamma_{DIC}$	10	13.3	9.5
ALK	$\frac{ALK}{pCO_2} \frac{\partial pCO_2}{\partial ALK}$	$\gamma_{ALK}$	-9.4	-12.6	-8.9
Süßwasser	$(\frac{S}{pCO_2} \frac{\partial pCO_2}{\partial S})_{Süßwasser}$ $= \gamma_S + \gamma_{DIC} + \gamma_{ALK}$	$\gamma_{Süßwasser}$	1.6	1.7	1.6

**Tabelle 4.2.:** Sensitivität von pCO<sub>2</sub> in Meerwasser gegenüber verschiedenen Parametern. Nach Tabelle 8.3.1 in Sarmiento u. Gruber (2006).

DIC zusätzlich zu den Süßwasserflüssen ergeben sich im Ozean durch biologische Prozesse und durch CO<sub>2</sub>-Austausch mit der Atmosphäre. Änderungen der Alkalinität zusätzlich zu den Süßwasserflüssen ergeben sich durch biologische Prozesse und durch die Bildung oder Zersetzung von Kalkschalen mariner Organismen. Allerdings werden Änderungen von DIC und Alkalinität durch biologische Prozesse für die Trajektorien in dieser Arbeit nicht berechnet, so dass sich die Methode auf physikalische Prozesse beschränkt. Die Änderung von DIC vom Zeitpunkt  $t_1$  zum Zeitpunkt  $t_2$  wird somit durch den Austausch  $F$  von CO<sub>2</sub> mit der Atmosphäre bestimmt:

$$DIC(t_2) - DIC(t_1) = -F \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{1}{\rho} \quad (4.3)$$

Hierbei wird der Fluss wie in Gleichung 2.1 berechnet und hat die Einheit  $\frac{mol}{m^2 20 \text{ Minuten}}$ . Die Diffusion von Kohlenstoff aus oder in das Wasserpaket wird nicht berücksichtigt. Da der Fluss nur über die Grenzfläche Ozean-Atmosphäre stattfindet, ist  $F$  gleichbedeutend mit der Änderung der absoluten Molanzahl bezogen auf ein Wasservolumen von einem Kubikmeter. Um diese Änderung auf die Masseneinheit „kg“ zu beziehen und sie so vergleichbar mit DIC machen zu können, welches üblicherweise in  $mol/kg$  oder  $\mu mol/kg$  angegeben wird, muss der Fluss mit

der Dichte von Meerwasser normiert werden. Diese wird aus Salzgehalt, Druck und Temperatur nach Fofonoff u. Millard Jr. (1983) berechnet. Für die Berechnung des  $\text{CO}_2$ -Flusses wird die Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  mit Hilfe des Nögler-Ansatzes (Unterabschnitt 3.1.4) aus den Feldern der täglichen QuiSCAT-Windgeschwindigkeiten und den Temperaturdaten der Trajektorie berechnet und auf die Zeit- und Raumkoordinaten der Trajektorie interpoliert. Es werden die drei in Unterabschnitt 3.1.4 dargestellten Parametrisierungen der Gasaustauschgeschwindigkeit verwendet. Aus Temperatur und Salzgehalt entlang der Trajektorie wird die Löslichkeit nach Weiss (1974) bestimmt. Die Partialdruckdifferenz,  $\Delta p\text{CO}_2$ , wird aus  $p\text{CO}_2$  des Wasserpaketes und  $p\text{CO}_2$  in der darüber liegenden Atmosphäre aus den GLOBALVIEW- $\text{CO}_2$ -Daten (GLOBALVIEWCO2, 2011) berechnet. Die Berechnungen entlang der Trajektorien gestalten sich wie folgt: Die im SOCAT-Datensatz angegebene  $\text{CO}_2$ -Fugazität ( $f\text{CO}_2$ ) wird umgerechnet in  $\text{CO}_2$ -Partialdruck. Die Alkalinität kann mit Hilfe eines empirischen Zusammenhangs aus Temperatur und Salzgehalt abgeleitet werden (siehe dazu im Anhang Abschnitt A.2 und Abschnitt A.3). Damit sind zwei Variablen des  $\text{CO}_2$ -Systems ( $p\text{CO}_2$  und ALK) bestimmt und alle anderen, insbesondere DIC, können nach Zeebe u. Wolf-Gladrow (2001) (MATLAB-Skript `csys.m`<sup>1</sup>, siehe Anhang) berechnet werden. So kann, wie in Gleichung 4.4 dargestellt, die zeitliche Änderung des Partialdrucks von  $\text{CO}_2$  entlang der Trajektorie nach Gleichung 4.2 und den  $\gamma$ -Werten aus Tabelle 4.2 bestimmt werden.

$$\begin{aligned}
 p\text{CO}_2(t_2) = & p\text{CO}_2(t_1) \\
 & + \gamma_T \cdot p\text{CO}_2(t_1) \cdot (T(t_2) - T(t_1)) \\
 & + \gamma_{\text{Süßwasser}} \cdot \frac{p\text{CO}_2(t_1)}{S(t_1)} \cdot (S(t_2) - S(t_1)) \\
 & + \gamma_{\text{DIC}} \cdot \frac{p\text{CO}_2(t_1)}{\text{DIC}(t_1)} \cdot (\text{DIC}(t_2) - \text{DIC}(t_1))
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

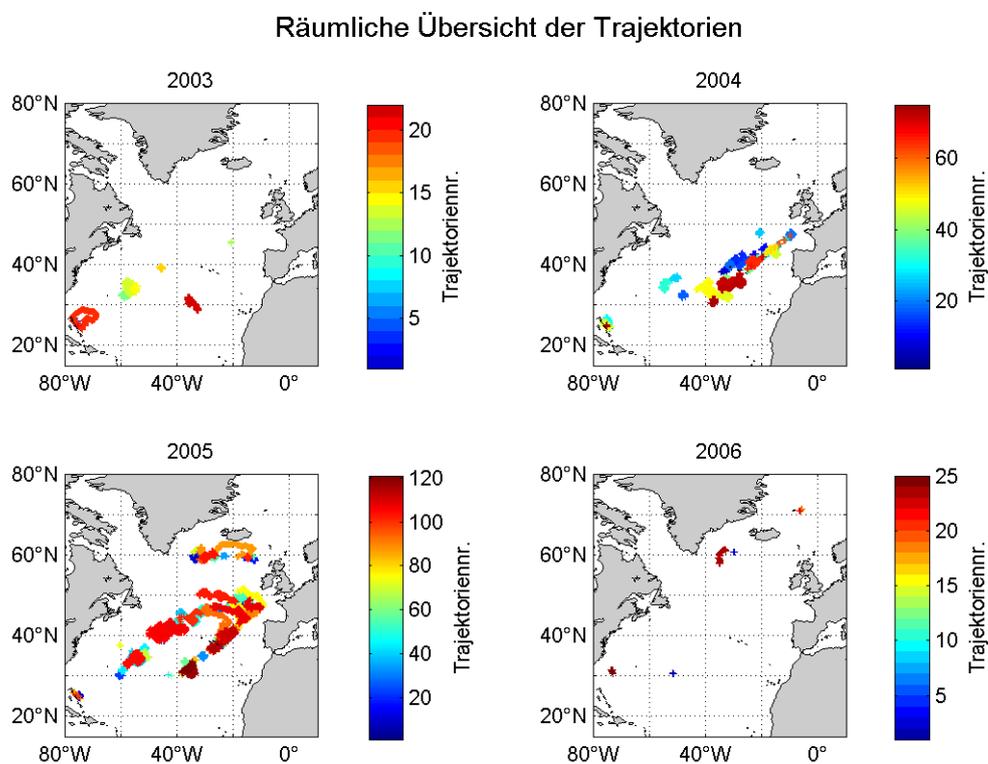
---

<sup>1</sup>[http://www.soest.hawaii.edu/oceanography/faculty/zeebe\\_files/CO2\\_System\\_in\\_Seawater/csys3.m](http://www.soest.hawaii.edu/oceanography/faculty/zeebe_files/CO2_System_in_Seawater/csys3.m)

## 4.2. Ergebnisse

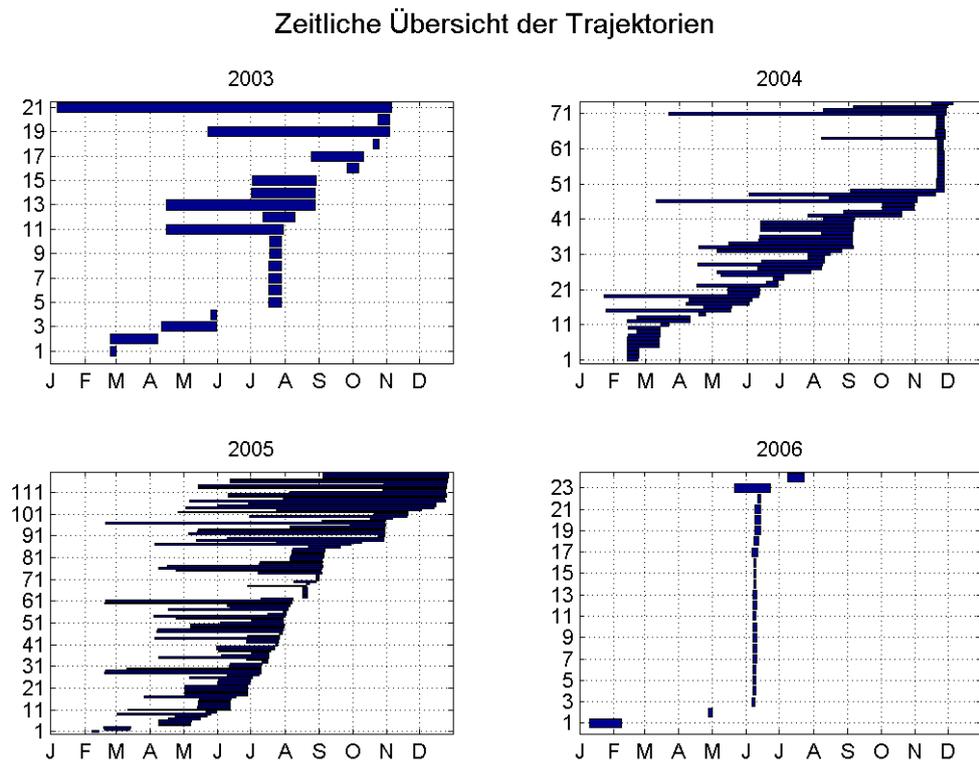
### 4.2.1. Doppelt beprobte Trajektorien

Die Trajektorien solcher Wasserpakete, die durch die SOCAT-Messungen ein zweites Mal beprobt wurden und die für die Diskriminierung der  $k-u_{10}$ -Parametrisierungen herangezogen werden, sind in Abbildung 4.5 nach Jahren sortiert in ihrer geographischen Lage dargestellt.



**Abbildung 4.5.:** Geographische Lage der doppelt beprobten Trajektorien

Eine Übersicht der Zeiträume der einzelnen Trajektorien in einem Jahr ist in Abbildung 4.6 gegeben. Tabelle 4.3 gibt die Anzahl der verwendeten Trajektorien für die einzelnen Jahre an. Insgesamt stehen aus den vier Jahren 239 Trajektorien zur Verfügung, für die in dem Lagrange'schen Ansatz der zeitliche Verlauf des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks modelliert wird und die für die Diskriminierung der  $k-u_{10}$ -Parametrisierung verwendet werden.



**Abbildung 4.6.:** Zeitliche Übersicht der doppelt beprobten Trajektorien. Die Lage und Länge der Balken bezüglich der y-Achse geben den Start- und Endzeitpunkt und somit die Dauer der einzelnen Trajektorien an.

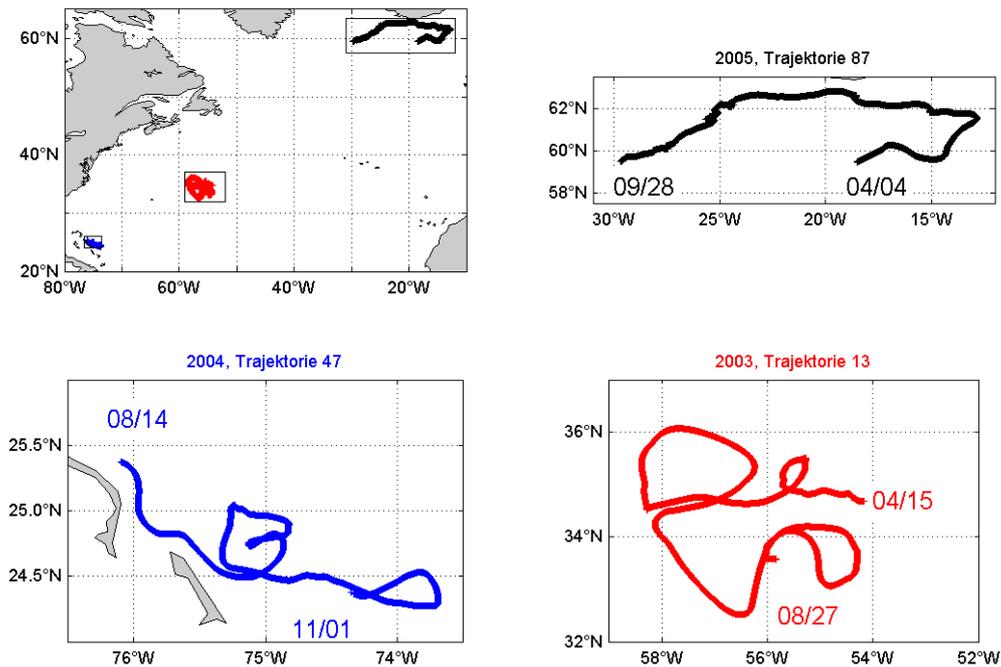
Anzahl der Trajektorien

2003	2004	2005	2006
21	74	120	24

**Tabelle 4.3.:** Anzahl der verwendeten Trajektorien pro Jahr. In der Summe stehen 239 Trajektorien für die Lagrange-Modellierung zur Verfügung.

Als Beispiele sind drei Trajektorien ausgewählt, deren jeweilige räumliche Lage zusammen mit Angaben über Start- und Endzeitpunkte in Abbildung 4.7 dargestellt ist. In Abbildung 4.8, 4.9 und 4.10 sind für diese drei Trajektorien ausgewählte Parameter dargestellt. Das erste Beispiel der Trajektorie Nummer 13 aus dem Jahr 2003 (Abbildung 4.8) zeigt die Zeitreihen der Parameter  $p\text{CO}_2$ ,  $\Delta p\text{CO}_2$ , Gasaustauschgeschwindigkeit, Löslichkeit,  $\text{CO}_2$ -Fluss, Salzgehalt, Temperatur und DIC im westlichen, subtropischen Nordatlantik im Zeitraum Mitte April bis Ende August. Die Darstellung für die anderen beiden Beispiele ist ähnlich; die Trajektorie

## Geographische Lage der Trajektorien



**Abbildung 4.7.:** Räumliche Lage der drei Beispiel-Trajektorien mit jeweiliger, räumlicher Vergrößerung

47 aus dem Jahr 2004 (Abbildung 4.9) befindet sich räumlich in der Nähe der Bahamas und in einem Zeitfenster von Mitte August bis Anfang November; die Trajektorie 87 (Abbildung 4.10) dauert von Anfang April bis Ende September 2005 und verläuft südlich von Island. An diesen drei Beispielen lässt sich die Sensitivität der Parameter untereinander zeigen. So folgt die Zeitreihe des  $p\text{CO}_2$  dem zeitlichen Verlauf der Temperatur. Die Löslichkeit folgt ebenfalls der Temperatur, allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Partialdruckdifferenz,  $\Delta p\text{CO}_2$ , zeigt einen der  $p\text{CO}_2$ -Zeitreihen stark ähnlichen Verlauf. In diesen drei Beispielen ist also das  $p\text{CO}_2$  im Wasser bestimmend für den zeitlichen Verlauf der Partialdruckdifferenz. Der  $\text{CO}_2$ -Fluss wird in seiner Richtung vom Vorzeichen der Partialdruckdifferenz bestimmt und weist außerdem eine starke Komponente der zeitlichen Variabilität der Gasaustauschgeschwindigkeit auf. Das DIC schließlich, welches in dieser Arbeit ausschließlich als vom  $\text{CO}_2$ -Fluss abhängig betrachtet wird, spiegelt in den Steigungen des zeitlichen Verlaufs das Vorzeichen des  $\text{CO}_2$ -Flusses wider. Eine Sensitivität der modellierten Parameter gegenüber dem Parameter Salzgehalt ist in diesen drei Beispielen nicht zu erkennen.

2003, Trajektorie 13

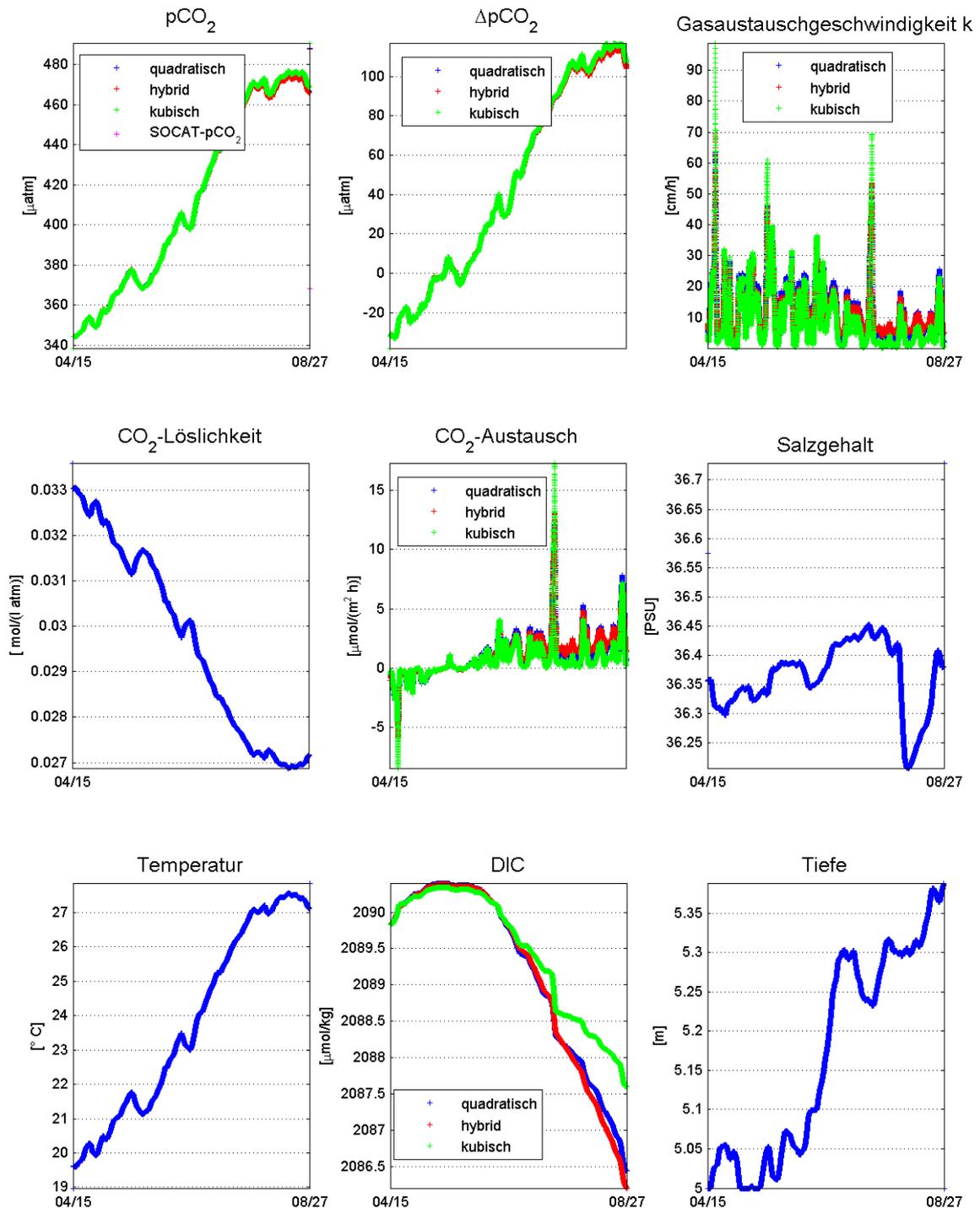


Abbildung 4.8.: 2003, Trajektorie Nr. 13: Zeitlicher Verlauf der im Lagrange'schen Ansatz modellierten Parameter, der Löslichkeit, der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorie; zusätzlich ist die Wassertiefe des virtuellen Treibkörpers dargestellt.

2004, Trajektorie 47

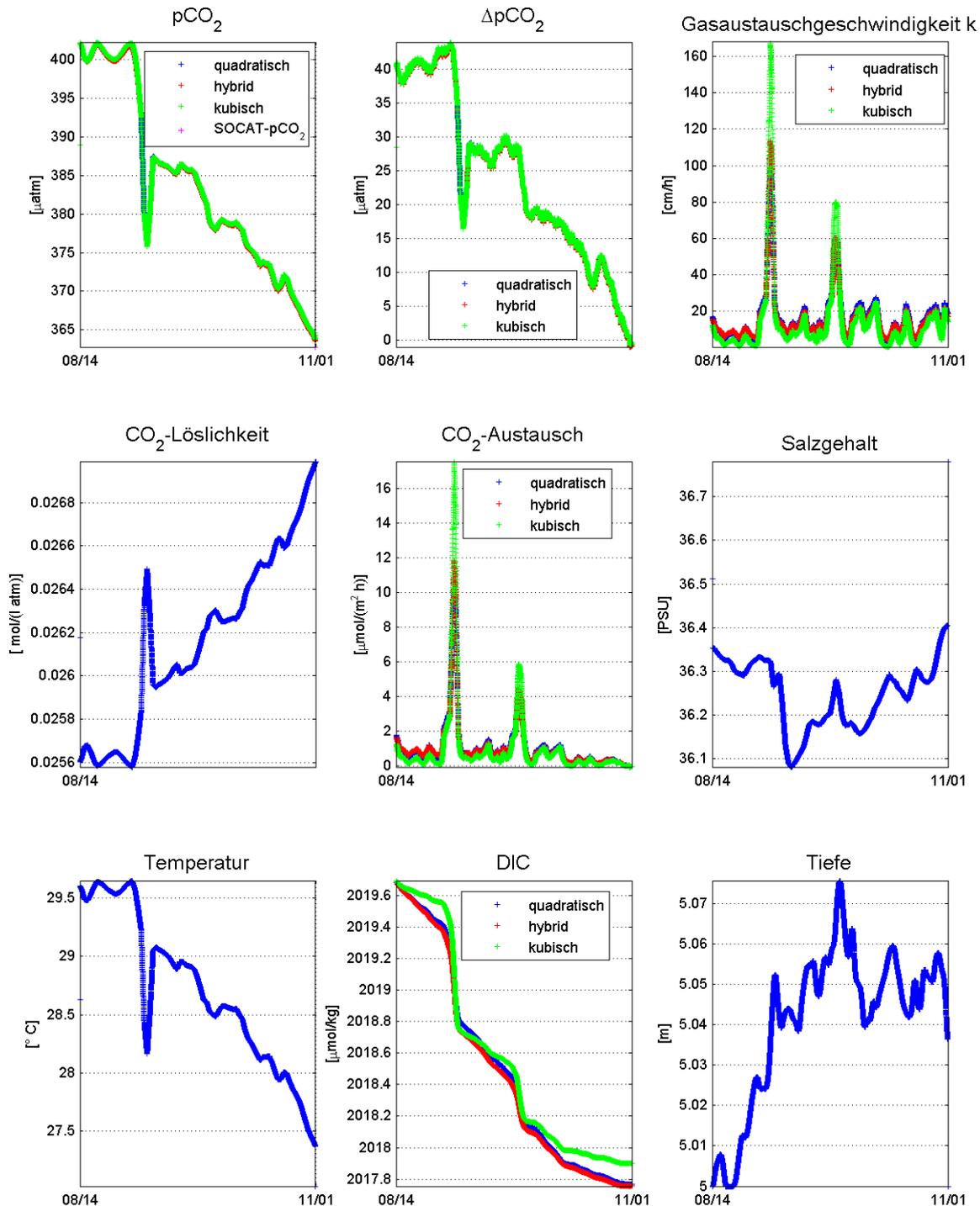


Abbildung 4.9.: 2004, Trajektorie Nr. 47: Zeitlicher Verlauf der im Lagrange'schen Ansatz modellierten Parameter, der Löslichkeit, der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorie; zusätzlich ist die Wassertiefe des virtuellen Treibkörpers dargestellt.

2005, Trajektorie 87

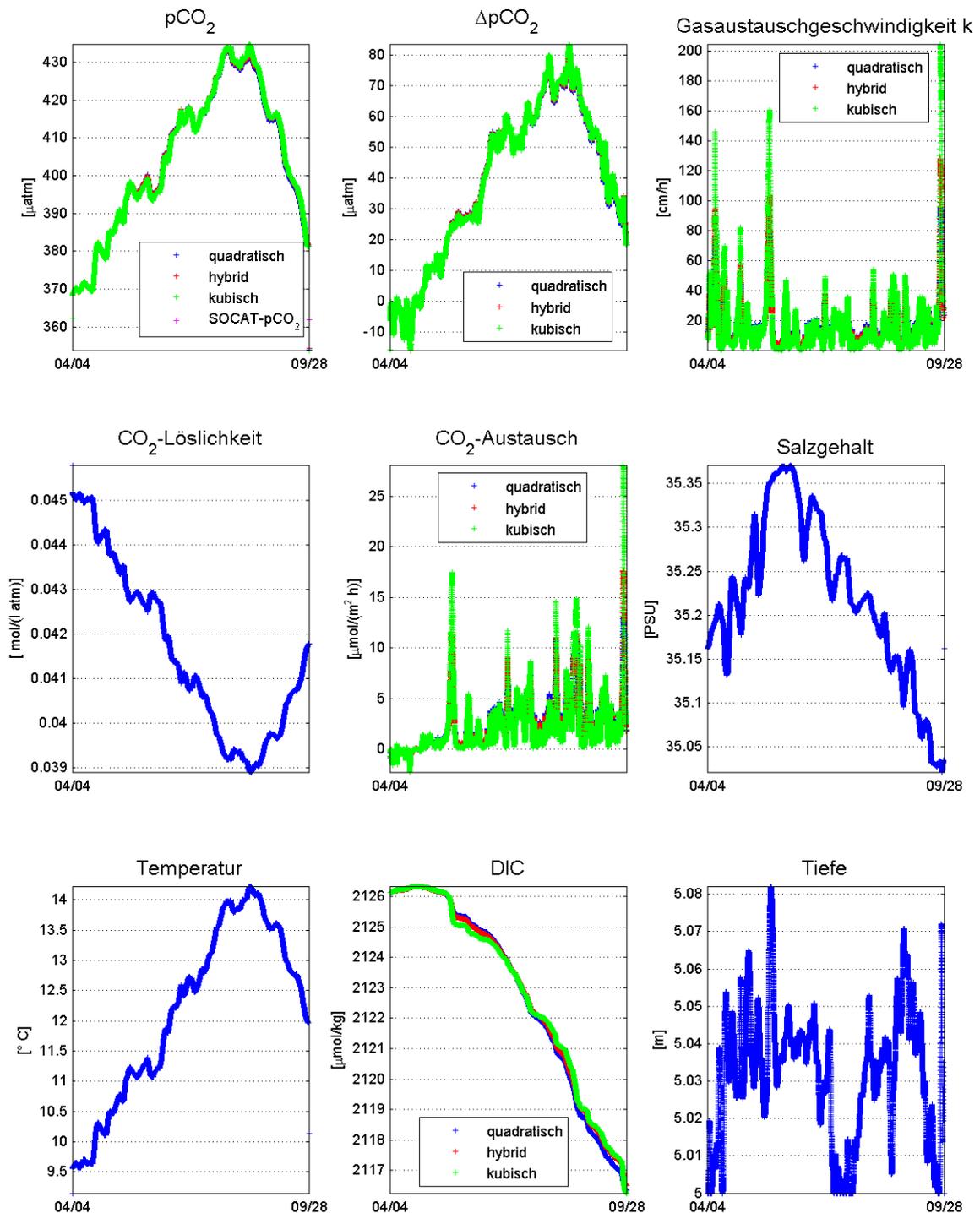


Abbildung 4.10.: 2005, Trajektorie Nr. 87: Zeitlicher Verlauf der im Lagrange'schen Ansatz modellierten Parameter, der Löslichkeit, der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorie; zusätzlich ist die Wassertiefe des virtuellen Treibkörpers dargestellt.

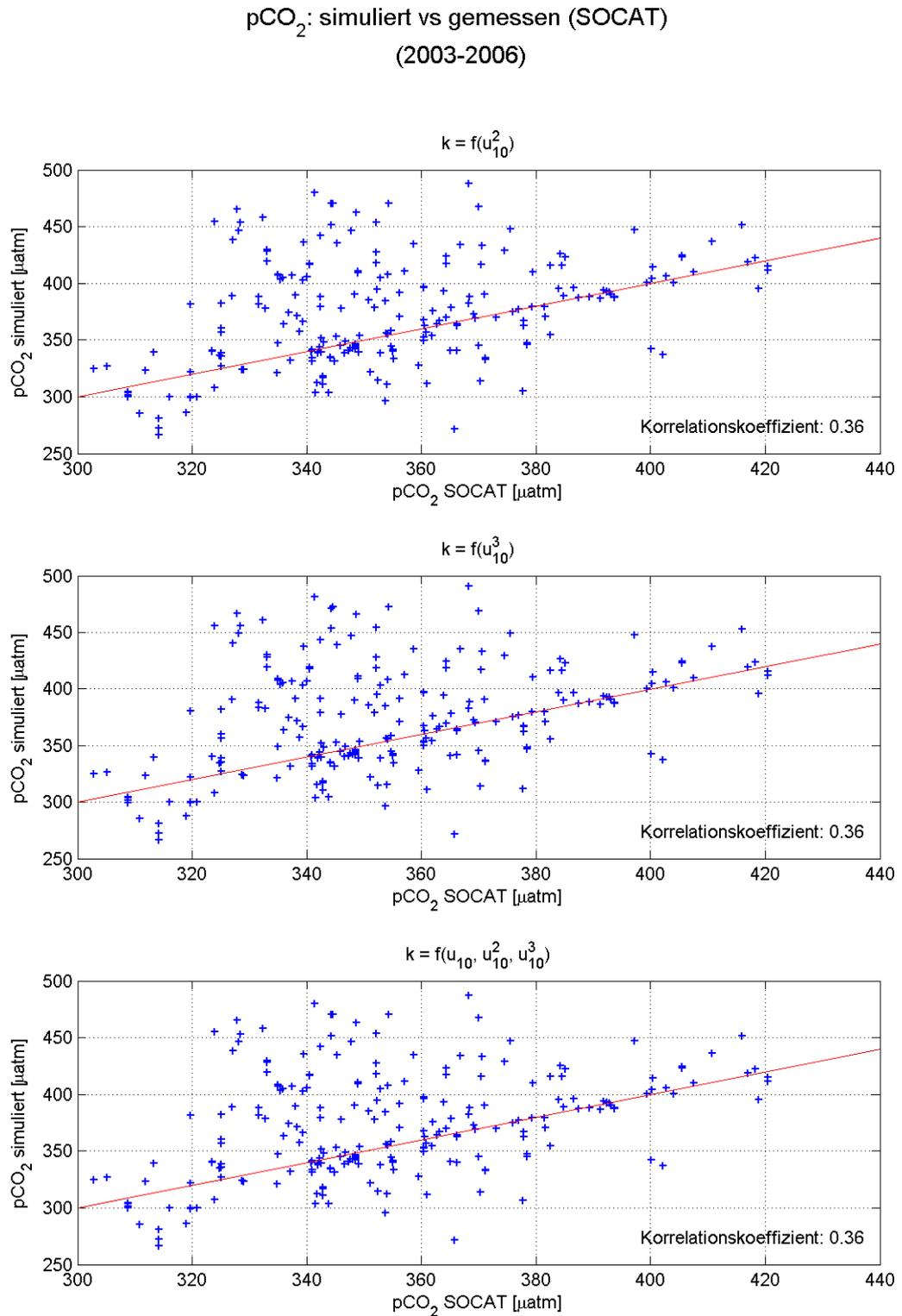
### 4.2.2. Vergleich der simulierten und der gemessenen $p\text{CO}_2$ -Werte

Für alle in Unterabschnitt 4.2.1 dargestellten, doppelt beprobten Trajektorien wurden mit dem in Unterabschnitt 4.1.4 beschriebenen Modell neben anderen der Parameter  $p\text{CO}_2$  des verfolgten Wasserpaketes in seinem zeitlichen Verlauf berechnet. Der so simulierte  $p\text{CO}_2$ -Wert zum Zeitpunkt der zweiten Beprobung kann dann mit dem gemessenen Wert aus den SOCAT-Daten verglichen werden. Abbildung 4.11 stellt die gemessenen und die simulierten Werte für die drei verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen des Gasaustauschs als Streudiagramme dar. Zu erkennen ist zum einen eine große Streuung der Werte in allen drei Parametrisierungen, aber auch eine Häufung entlang der Geraden der Identität des gemessenen und des simulierten  $p\text{CO}_2$ -Wertes. Im Vergleich der drei Streudiagramme untereinander stellt sich kein erkennbarer Unterschied in der Verwendung der drei einzelnen  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen dar: Die signifikante Korrelation zwischen dem gemessenen und dem simulierten  $p\text{CO}_2$ -Wert ist gleichbleibend 0.36 (Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ). Die Wahl der Gasaustauschparametrisierung bestimmt also nicht vorherrschend den simulierten Partialdruck von  $\text{CO}_2$  im Wasser.

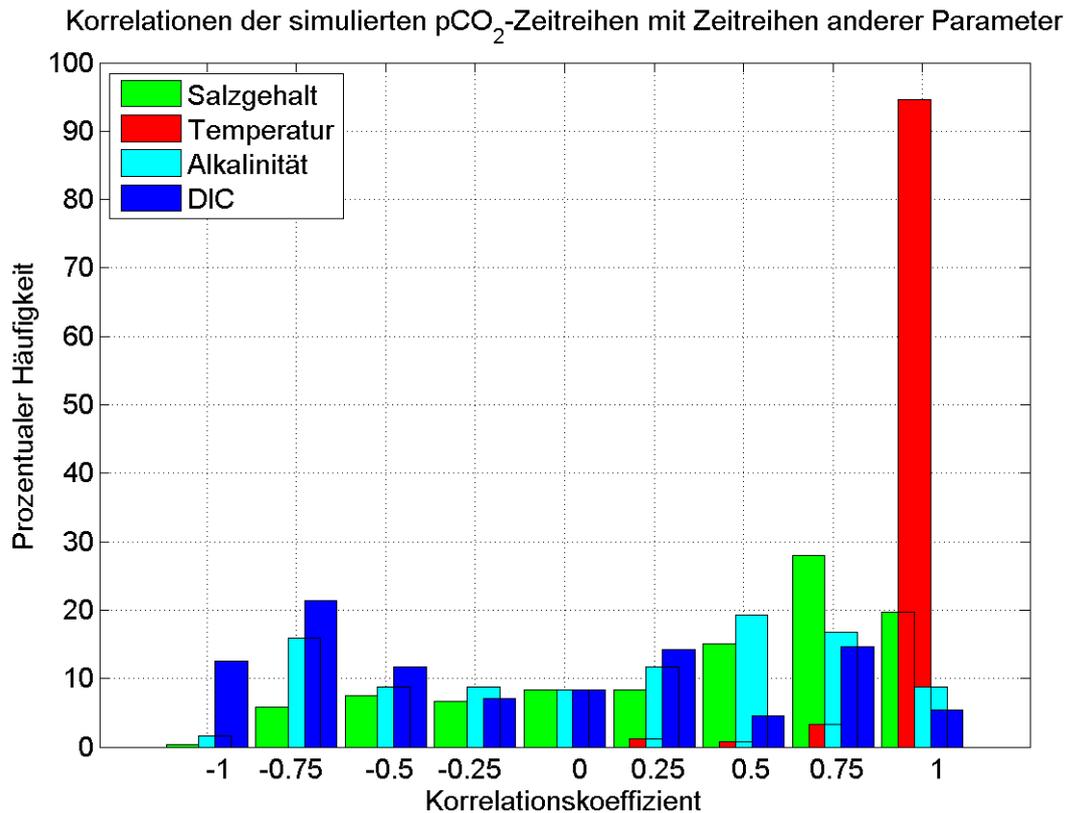
In den Darstellungen der Parameter entlang der Trajektorien (Abbildung 4.8, 4.9 und 4.10) ist hierzu zu erkennen, dass  $p\text{CO}_2$  für diese drei Trajektorien stark mit dem Parameter Temperatur korreliert ist. Abbildung 4.12 veranschaulicht die Korrelation von  $p\text{CO}_2$  mit der Temperatur für alle 239 Trajektorien. In dieser Abbildung werden zusätzlich zur Korrelation mit dem Parameter Temperatur auch die Korrelationen mit den Parametern Salzgehalt, Alkalinität und DIC dargestellt. Diese Korrelationen sind signifikant auf einem Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ . Für nahezu alle Trajektorien liegt die Korrelation zwischen  $p\text{CO}_2$  und Temperatur bei 1. Die Korrelation mit dem Parameter DIC, in dem der Gasaustausch enthalten ist, erscheint nahezu gleichverteilt über den gesamten Korrelationsbereich von -1 bis 1. Dies unterstützt die Aussage der geringen Abhängigkeit des Parameters  $p\text{CO}_2$  vom Gasaustausch.

### 4.2.3. Diskriminierung der $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen

Da sich die Simulation des  $p\text{CO}_2$  (siehe Unterabschnitt 4.1.4) auf die physikalischen Prozesse beschränkt, ist die fehlende biologische Aktivität eine Fehlerquelle für den simulierten  $p\text{CO}_2$ -Wert. Dieser Fehler kann verringert werden, wenn nur solche Trajektorien betrachtet werden, für die biologische Prozesse eine geringe Rolle spielen. Diese Trajektorien kennzeichnen sich dadurch, dass sie entweder in



**Abbildung 4.11.:** Simuliertes  $p\text{CO}_2$  im Vergleich zu den gemessenen SOCAT  $p\text{CO}_2$ -Werten; unterteilt nach den drei in der Lagrange'schen Modellierung verwendeten  $k$ - $u_{10}$ -Parametrisierungen des Gasaustausches. Insgesamt werden 239 Datenpunkte betrachtet. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist  $\geq 95\%$ .



**Abbildung 4.12.:** Die Korrelationen (Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ) der pCO<sub>2</sub>-Zeitreihen mit den anderen Parametern wurden für alle 239 Trajektorien berechnet. Die Gasaustauschparametrisierung ist die quadratische. Der Fluss  $F$  von CO<sub>2</sub> über die Grenzschicht Wasser-Luft ist im Parameter DIC enthalten (siehe Unterabschnitt 4.1.4).

einem Gebiet verlaufen, in dem nur sehr geringe bis gar keine biologische Aktivität zu erwarten ist, oder zu einer Jahreszeit stattfinden, in der biologische Aktivität vernachlässigbar gering ist. Das Gebiet und die Jahreszeiten mit geringer biologischer Aktivität im Nordatlantik sind der subtropische Wirbel mit seinem oligotrophen Oberflächenwasser und der Herbst und der Winter der Nordhemisphäre.

Für die Abweichung der simulierten von den gemessenen pCO<sub>2</sub>-Werten spielt ebenfalls eine Rolle, wie lange das Wasserpaket in der Simulation bis zu seiner zweiten Beprobung verfolgt wurde. Denn Fehler jeglicher Art wiegen umso schwerer, je länger die Dauer der Trajektorie ist. Neben den nicht simulierten biologischen Prozessen als systematischem Fehler sind Abweichungen der Modell-Temperaturfelder von den tatsächlichen Temperaturwerten zu nennen, sowie auch räumliche Abweichungen der simulierten Trajektorie von der tatsächlichen. Sämtliche Näherungen zur Bestimmung der Parameter des ozeanischen CO<sub>2</sub>-Systems tragen ebenfalls zum Fehler im simulierten pCO<sub>2</sub> des Wasserpaketes bei und verstärken diesen mit Dau-

er der Trajektorie.

Für die Diskriminierung der  $k$ - $u_{10}$ -Beziehung ist es entscheidend, die genannten Fehlerquellen möglichst zu reduzieren. Dazu werden im Folgenden Untergruppen der Gesamtheit der 239 Trajektorien betrachtet, zumal sich in Betrachtung der Korrelationen zwischen den simulierten  $p\text{CO}_2$ -Werten und den gemessenen keine der drei Gasaustauschparametrisierungen hervorhob (siehe Abbildung 4.11).

Folgende Trajektorien bilden die Untergruppen:

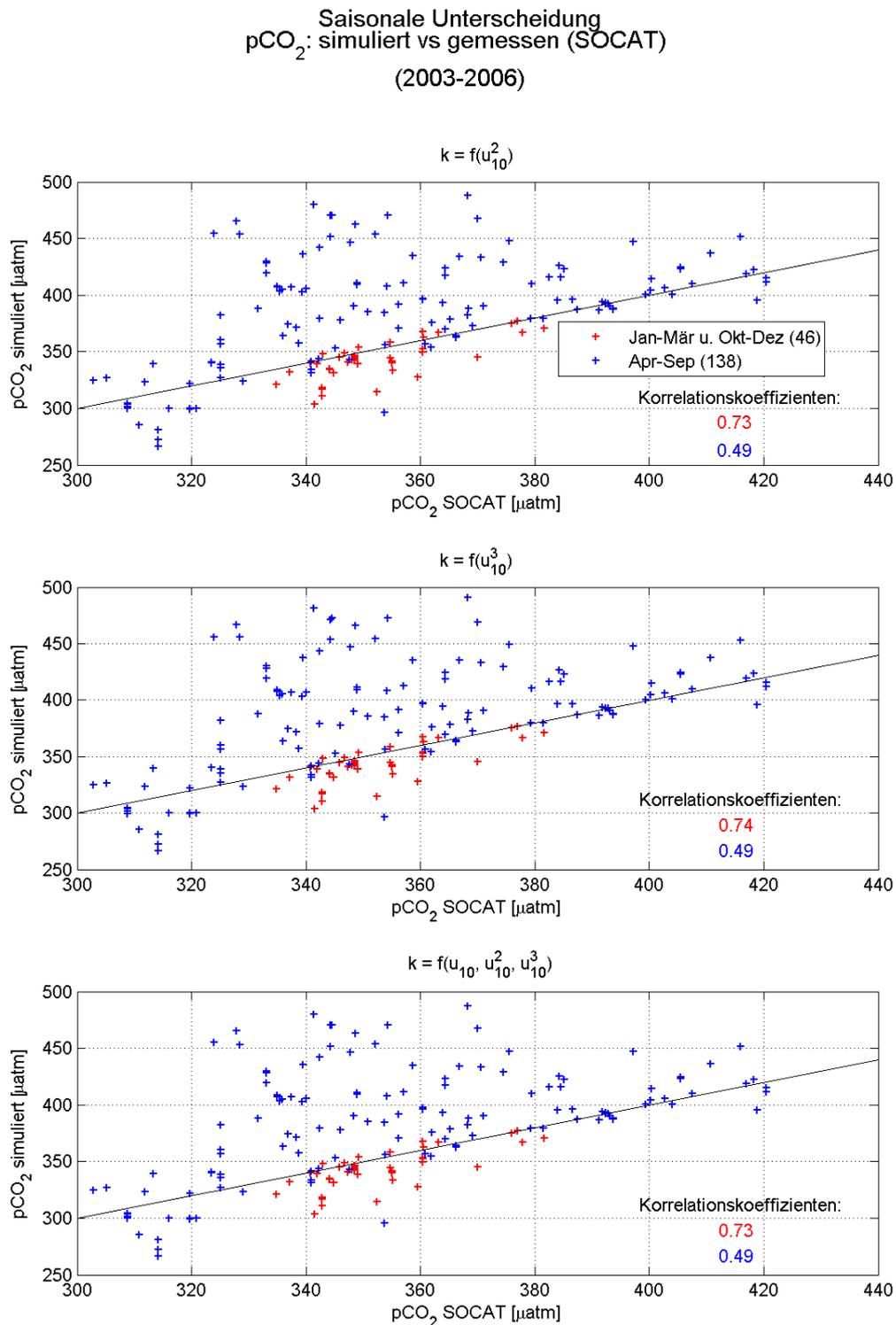
1. Trajektorien, die im Herbst und Winter stattfanden (Januar bis März und Oktober bis Dezember),
2. Trajektorien, die im Gebiet südlich von  $30^\circ\text{N}$  stattfanden, also im subtropischen Nordatlantikwirbel,
3. Trajektorien, die sich über die Dauer gruppieren.

Abbildung 4.13 stellt den Vergleich der simulierten und der gemessenen  $p\text{CO}_2$ -Werte für die Trajektorien dar, die im Herbst und Winter stattfanden. Die  $p\text{CO}_2$ -Werte der Herbst-Winter-Trajektorien zeigen eine deutlich höhere signifikante Korrelation (0.73, bzw. 0.74, Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ), als die Werte der Trajektorien in den anderen Monaten des Jahres (0.49, Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ). Es zeigt sich, dass die simulierten  $p\text{CO}_2$ -Werte des Frühling- und Sommerhalbjahres (April bis September) deutlich über den SOCAT-Werten liegen. Dies ist ein direkter Effekt der fehlenden Simulation der biologischen Prozesse. Photosynthese durch Phytoplankton im Sommerhalbjahr führt zu einem Verbrauch von  $\text{CO}_2$  und damit einer Verringerung des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks im Wasser.

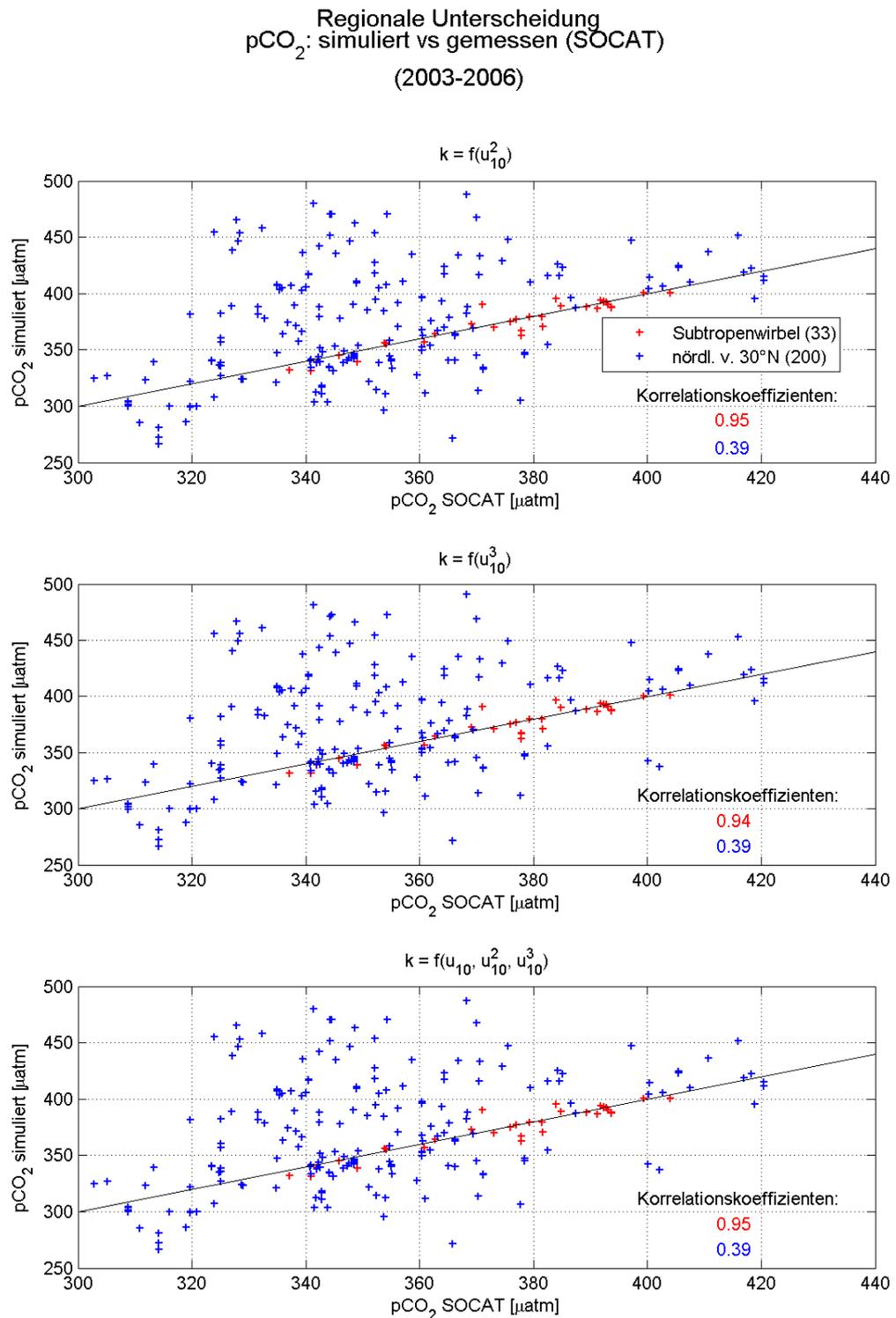
Ähnlich wie in Abbildung 4.11 hebt sich in der saisonalen Betrachtung keine der Gasaustauschparametrisierungen durch eine bedeutend höhere Korrelation hervor.

Abbildung 4.14 zeigt Streudiagramme für die 2. Untergruppe der Trajektorien. Hier wird regional unterschieden. Es zeigt sich, dass die simulierten  $p\text{CO}_2$ -Werte solcher Trajektorien, die südlich von  $30^\circ\text{N}$  verliefen, stark mit den gemessenen  $p\text{CO}_2$ -Werten korreliert sind. Die signifikante Korrelation liegt bei 0.94, bzw. 0.95 (Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ). Jedoch ist auch hier bezüglich der Korrelationen keine Abhängigkeit von der Gasaustauschparametrisierung zu erkennen.

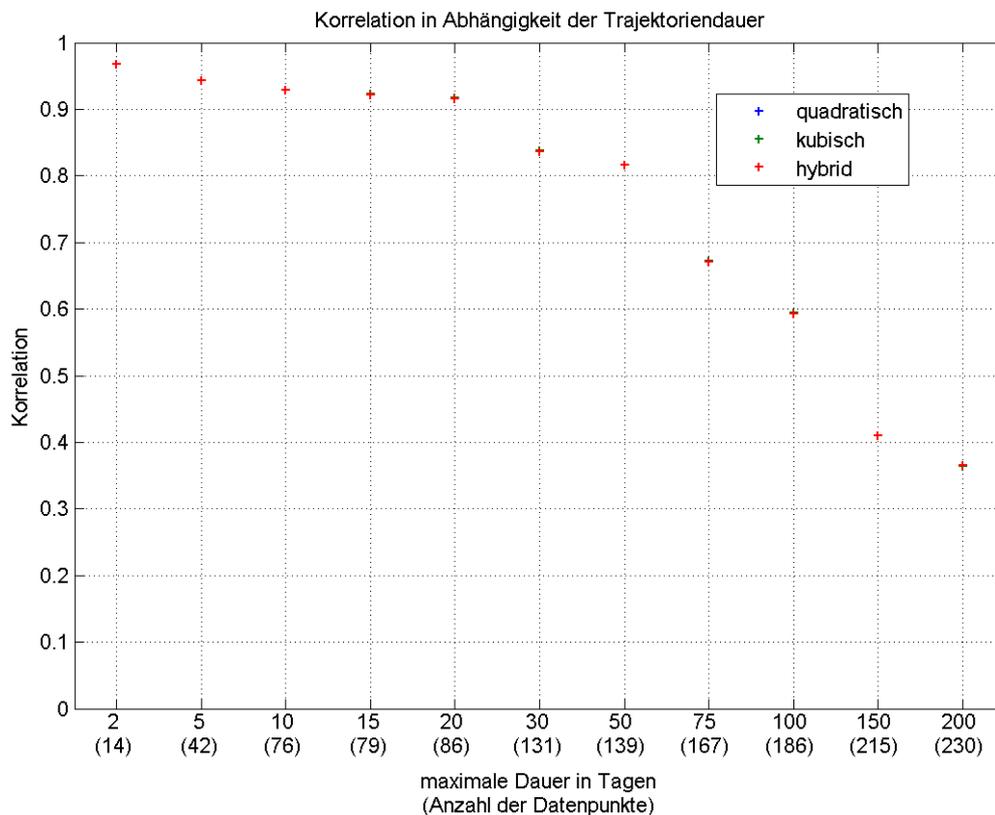
Zuletzt wird die Korrelation in Abhängigkeit von der maximalen Dauer der Trajektorien betrachtet (Abbildung 4.15). Hierbei zeigt sich, dass die signifikante Korrelation (Signifikanzniveau  $\geq 95\%$ ) zwischen den simulierten und den gemessenen  $p\text{CO}_2$ -Werten umso höher ist, je kürzer die simulierte Reise des Wasserpaketes bis zu seiner zweiten Beprobung war. Eine Unterscheidung in den Korrelationen aufgrund der verwendeten Gasaustauschparametrisierung kann auch hier nicht gemacht werden.



**Abbildung 4.13.:** Unterscheidung nach Halbjahren: Simuliertes pCO<sub>2</sub> im Vergleich zu den gemessenen SOCAT pCO<sub>2</sub>-Werten; unterteilt nach den drei verwendeten k-u<sub>10</sub>-Parametrisierungen des Gasaustausches. Werte in Klammern geben die Anzahl der betrachteten Datenpunkte an. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist  $\geq 95\%$ .



**Abbildung 4.14.:** Unterscheidung nach Regionen: Simuliertes pCO<sub>2</sub> im Vergleich zu den gemessenen SOCAT pCO<sub>2</sub>-Werten; unterteilt nach den drei verwendeten k-u<sub>10</sub>-Parametrisierungen des Gasaustausches. Werte in Klammern geben die Anzahl der betrachteten Datenpunkte an. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist  $\geq 95\%$ .



**Abbildung 4.15.:** Abhängigkeit der Korrelation zwischen den gemessenen und den simulierten  $\text{pCO}_2$ -Werten von der Trajektoriendauer. Die Zahlen in den Klammern geben die Anzahl der Trajektorien an, für die die jeweilige maximale Dauer gilt. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist  $\geq 95\%$ .

Die Abhängigkeit der Korrelation von der Dauer der Trajektorie wirft die Frage auf, wie aussagekräftig die Verhältnisse der Korrelationen der simulierten und der gemessenen  $\text{pCO}_2$ -Werte in der saisonalen, bzw. regionalen Unterscheidung sind. In der regionalen Unterscheidung zeigt sich, dass für eine Betrachtung der Trajektorien mit einer Dauer von weniger als 50 Tagen die Korrelationen 0.96 (Subtropenwirbel) bzw. 0.78 (nördlich von  $30^\circ\text{N}$ ) sind. Das heißt, das oben beschriebene Verhältnis der Korrelationen wird bestätigt. In der saisonalen Betrachtung jedoch ergibt eine Betrachtung kürzerer Trajektorien (Dauer ebenfalls maximal 50 Tage) Korrelationen zwischen den simulierten und den gemessenen  $\text{pCO}_2$ -Werten von 0.81 (Sommerhalbjahr) und 0.77 (Winterhalbjahr). Hier kehrt sich also das Verhältnis der Korrelationen um. Es folgt daraus direkt die Notwendigkeit des Vergleichs zwischen räumlicher und zeitlicher Variabilität des Einflusses der biologischen Aktivität auf  $\text{pCO}_2$ . Dieser Vergleich liegt allerdings außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

Insgesamt zeigt sich, dass eine Diskriminierung der hier verwendeten Gasaus-

tauschparametrisierungen in dem hier vorgestellten Ansatz nicht vorgenommen werden kann. Grund hierfür ist die geringe Abhängigkeit des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks im Wasser vom Gasaustausch.

**Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse diese Abschnitts:**

1. Es konnten 239 Trajektorien bestimmt werden, deren Start- und Endkoordinaten mit SOCAT-Messungen zusammenfallen, und für die der Partialdruck von  $\text{CO}_2$  im Wasser ohne Betrachtung biologischer Prozesse simuliert wurde.
2. Die aus der hier vorgestellten Simulation resultierenden  $\text{pCO}_2$ -Werte am Endpunkt der Trajektorien zeigen eine gute Übereinstimmung mit den entsprechenden SOCAT- $\text{pCO}_2$ -Werten, insbesondere, wenn ausschließlich solche Trajektorien zum Vergleich herangezogen werden, für die der Einfluss biologischer Prozesse auf  $\text{pCO}_2$  nachrangig ist. Außerdem sind die simulierten und die gemessenen  $\text{pCO}_2$ -Werte umso stärker korreliert, je geringer die Dauer der Trajektorie ist.
3.  $\text{pCO}_2$  im Wasser zeigt für nahezu alle Trajektorien eine Korrelation mit der Wassertemperatur von 1. Korrelationen mit DIC, dem Parameter, in den der Gasaustausch eingeht, sind eher gleichverteilt und legen damit nahe, dass die Abhängigkeit des  $\text{pCO}_2$  von DIC und damit vom Gasaustausch nachrangig ist.
4. Wegen der geringen Abhängigkeit des  $\text{pCO}_2$  vom Gasaustausch kann eine Diskriminierung der Gasaustauschparametrisierungen nicht vorgenommen werden.

### 4.3. Abschließende Diskussion

Für eine realistische Simulation des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks spielt neben den in Betracht gezogenen Prozessen, die den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck beeinflussen, der räumliche Verlauf der Trajektorien eine Rolle. Hierfür ist sowohl die zeitliche als auch die räumliche Auflösung der aus dem Zirkulationsmodell ausgegebenen Geschwindigkeitsfelder relevant. Putman u. He (2013) untersuchen diesen Einfluss der Raum-Zeit-Auflösung simulierter Geschwindigkeitsfelder. Für den Nordatlantik vergleichen sie beobachtete Trajektorien realer Drifter mit simulierten Trajektorien virtueller Partikel und stellen fest, dass für eine Auflösung der Geschwindigkeitsfelder von einem Tag (zeitlich) und  $0.08^\circ$  (räumlich, das entspricht ungefähr 8 km) die Geschwindigkeiten der Drifter gut durch die Partikelgeschwindigkeiten wie-

dergegeben werden und dass außerdem die Pfade der Drifter am besten in der höchsten Auflösung ( $0.08^\circ$  und täglich) der Geschwindigkeitsfelder durch die Partikeltrajektorien repräsentiert werden. Putman u. He (2013) vergleichen zusätzlich Particle-Tracking-Simulationen mit gröberen räumlichen und zeitlichen Auflösungen der Geschwindigkeitsfelder. Ihre Ergebnisse können durch die Vergleichbarkeit in Region und Kombination der räumlichen und zeitlichen Auflösung übertragen werden und begründen die in der vorliegenden Arbeit angewendete Methode zur Simulation der Trajektorien der virtuellen Treibkörper.

Das hier verwendete Raum-Zeit-Fenster von 200 m und 12 Stunden ist als eher eng zu bezeichnen. Trotzdem zeigt sich, dass die Menge der so gefundenen doppelt beprobten Trajektorien ausreicht, um wesentliche Grundzüge der saisonalen und regionalen Einflüsse auf den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck im Wasser abzubilden. Ein größeres Raum-Zeit-Fenster liefert mit großer Wahrscheinlichkeit mehr doppelt beprobte Trajektorien, erhöht aber auch die Rechenzeit für die Simulation des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks. Welche maximale Größe für das Raum-Zeit-Fenster zugrunde gelegt werden kann, kann erst bestimmt werden, wenn genauere Erkenntnisse über die kurzzeitige ( $< 1$  Tag) und kleinskalige Variabilität ( $< 8$  km) des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks vorliegen.

Die hier vorgenommene Simulation des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks und der Vergleich mit den SOCAT-Messungen und somit die daraus resultierenden Ergebnisse beschränken sich auf den Nordatlantik. Eine globale Gültigkeit der hier getroffenen Aussagen gilt es zu überprüfen.



## 5. Erkenntnisgewinn und Ausblick

Mit der hier dargestellten Zeitreihe der vergleichbaren Gasaustauschgeschwindigkeiten, insbesondere im mehr als 21-jährigen Zeitraum der ERS-, QuikSCAT-, MetOp-A und Oceansat2-Missionen, lassen sich verbesserte CO<sub>2</sub>-Flüsse berechnen. Der hier für die Berechnung der Gasaustauschgeschwindigkeiten angewendete Nägler-Ansatz beinhaltet zum einen die überarbeitete globale Randbedingung der Gasaustauschgeschwindigkeit und erlaubt zum anderen eine Anpassung der Gasaustauschparametrisierung an das Windgeschwindigkeitsprodukt, so dass Unterschiede in den Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grund von Unterschieden im Betrag der Windgeschwindigkeiten aus unterschiedlichen Quellen minimiert werden. Dieses stellt eine Verbesserung im Vergleich zu dem oft verwendeten Wanninkhof-Ansatz dar.

Die Antworten auf die Fragen zu Anfang dieser Arbeit beinhalten den folgenden Erkenntnisgewinn:

- Neben dem hauptsächlichen Unterschied zwischen dem Nägler-Ansatz und dem Wanninkhof-Ansatz, der betragsmäßig unterschiedlichen Randbedingungen der mittleren globalen Gasaustauschgeschwindigkeit, gibt es noch scheinbar geringfügige Unterschiede, wie die Art der verwendeten zeitlichen Variabilität der Windgeschwindigkeitsfelder zur Ableitung der Skalierungsfaktoren und die Berücksichtigung der globalen Verteilung der Schmidt-Zahl. Und obwohl scheinbar klein, entscheidet besonders der erstgenannte Unterschied (zeitliche Variabilität der Windgeschwindigkeit) darüber, ob der globale Kohlenstoff-Nettofluss durch die Verwendung zeitlich geringer aufgelöster Felder unter- oder überschätzt wird. Dieses ist eine bedeutende Erkenntnis dieser Arbeit. Nach wie vor gilt die Empfehlung, zur Berechnung von Gasaustauschgeschwindigkeiten zeitlich hoch aufgelöste Windgeschwindigkeitsfelder zu verwenden, da nicht erfasste zeitliche Variabilität der Windgeschwindigkeit sich auf Grund der Nichtlinearität der  $k$ - $u_{10}$ -Beziehungen auf den Betrag der Gasaustauschgeschwindigkeit auswirkt.
- Im Vergleich der quadratischen und kubischen  $k$ - $u_{10}$ -Beziehung im Zusammenhang mit dem Nägler-Ansatz zeigt diese Arbeit, dass die höheren Net-

toflüsse von CO<sub>2</sub> aus der kubischen Parametrisierung resultieren. Die Ursache hierfür ist die unterschiedliche Betonung verschiedener Windgeschwindigkeitsbereiche durch die kubische Parametrisierung und das damit geringer abgeschätzte CO<sub>2</sub>-Ausgasen in den äquatorialen Auftriebsgebieten zusammen mit der höher abgeschätzten CO<sub>2</sub>-Aufnahme in höheren Breiten. Dies entspricht den Erkenntnissen von Boutin u. a. (2002); Fangohr u. a. (2008); Olsen u. a. (2005); Wanninkhof u. McGillis (1999); Wanninkhof u. a. (2002); Wanninkhof (2007); Takahashi u. a. (2002) und gilt auch im Vergleich der kubischen mit der hybriden Parametrisierung. Die hybride Parametrisierung liefert einen geringer abgeschätzten Kohlenstoffnettofluss als die quadratische. Dieses steht in Einklang mit den Ergebnissen von Wanninkhof u. a. (2009). Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, gilt dies allerdings bei Verwendung von Monatsmitteln der QuikSCAT-Windfelder. Die Erkenntnis dieser Arbeit diesbezüglich ist, dass bei der Verwendung täglicher Windfelder der abgeschätzte CO<sub>2</sub>-Nettofluss aus der hybriden Parametrisierung um 5% höher ist als der aus der quadratischen.

- Was den Einfluss der monatlichen Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten auf die monatliche Variabilität im CO<sub>2</sub>-Nettofluss betrifft, so zeigt sich in dieser Arbeit, dass dieser Einfluss eher gering ist; er beträgt 4% bei der Verwendung von NCEP- und 7% bei der Verwendung von QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsfeldern. Regional betrachtet zeigt sich, dass der Anteil der zeitlichen Variation des Gasaustauschkoeffizienten (Term B) an der totalen skalierten Varianz seine Maxima im äquatorialen Bereich und in den hohen Breiten hat. Allerdings darf diese Betrachtung nicht auf die zeitliche Variation der beiden Faktoren  $K$  und  $\Delta p\text{CO}_2$  beschränkt werden; auch die Kovarianz (Term C) und der Term der Kovariation (Term D) müssen in die Betrachtung einbezogen werden, da in diesen die Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten beinhaltet ist. Die Summe der drei Terme B, C und D (siehe Tabelle 3.6) offenbart, in welchen Gebieten die Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten zur totalen skalierten Varianz des CO<sub>2</sub>-Flusses beiträgt: bis auf Gebiete im subtropischen Bereich ist diese Summe deutlich verschieden von Null. Dies führt zu der Erkenntnis, dass die monatliche Variabilität des Gasaustauschkoeffizienten fast überall bedeutsam ist für die monatliche Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses.
- In der Unterscheidung der Verwendung von NCEP- und bzw. QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsfeldern heben sich die Bereiche des südlichen Ozeans und des äquatorialen Pazifiks in der Summe der Terme B, C und D ab. Dieses

erlaubt die Erkenntnis, dass es bezüglich der dargestellten Variabilität des CO<sub>2</sub>-Flusses genau in diesen Bereichen einen Unterschied macht, ob NCEP oder QuikSCAT-Winddaten verwendet werden.

- Obwohl der hier verwendete Ansatz zur Diskriminierung der k-u<sub>10</sub>-Parametrisierung keine Aussage darüber zulässt, welche Form der Gasaustauschparametrisierung den CO<sub>2</sub>-Fluss am besten abbildet, bietet er eine wertvolle Grundlage, um andere, für den CO<sub>2</sub>-Partialdruck wichtige Zusammenhänge zu analysieren. Die Beschränkung auf die thermodynamischen Prozesse stellt zwar einen Fehler dar, da biologische Prozesse einen erheblichen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Partialdruck im Wasser haben, allerdings wird so die Voraussetzung dafür geschaffen, die biologischen Einflüsse zu quantifizieren. Dafür ist eine logische Fortsetzung des hier präsentierten Ansatzes (und somit ein Ausblick) die Implementierung eines biologischen Modells zur vollständigen Abdeckung aller Prozesse, die pCO<sub>2</sub> im Wasser beeinflussen.

Die folgenden Punkte bilden den Ausblick dieser Arbeit:

- Der Simulationszeitraum für die Trajektorien ist so gewählt, dass keine Übergänge zwischen den Jahren möglich sind. Dadurch ist der Zeitraum, der Frühling, Sommer und Herbst umfasst, in den Trajektorien überrepräsentiert. Als weitere Schritt in dem Diskriminierungsansatz ist eine Simulation mit Jahresübergang und damit einer besseren Überdeckung der Wintersaison durch die Trajektorien angedacht. Diese ist nicht nur wegen der geringen biologischen Aktivität in dieser Zeit interessant, sondern auch wegen höherer Windgeschwindigkeiten und damit höherem Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre.
- In Bezug auf die Gasaustauschgeschwindigkeiten ist eine Fortsetzung in der Zeit sinnvoll. Die zur Zeit operationellen Satellitenmissionen MetOp-A und Oceansat-2 und seit September 2012 MetOp-B liefern aktuell dafür die Grundlage. In der Zukunft (ca. 2017, Verhoef u. Stoffelen (2013)) ist der Start von MetOp-C geplant, der als dritter in der Reihe der europäischen Wettersatelliten die Fortsetzung der Zeitreihe der Gasaustauschgeschwindigkeiten ermöglichen wird. Für die schon beendeten Satellitenmissionen QuikSCAT und ERS ist es sinnvoll, die Gasaustauschgeschwindigkeiten auf der Basis von Schwad-Daten zu berechnen. Dies ermöglicht eine Verlängerung der Zeitreihe der Gasaustauschgeschwindigkeiten aus zeitlich hoch aufgelösten Windgeschwindigkeiten.







# A. Anhang

## A.1. Rayleigh-Verteilung

Die Häufigkeitsverteilung der globalen Oberflächenwindgeschwindigkeit kann durch eine Rayleigh-Verteilung angenähert werden. Die Verteilung  $P$  der Windgeschwindigkeit  $u$  ist nach Monahan (2006) dann gegeben als

$$P(u) = \frac{u \cdot \exp\left(\frac{-u^2}{2\Delta u^2}\right)}{\Delta u^2} \quad (\text{A.1})$$

mit  $\Delta u = \bar{u} \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^{-0.5}$ .  $\bar{u}$  bezeichnet die mittlere globale Windgeschwindigkeit. Die Rayleigh-Verteilung ist ein Spezialfall der Weibull-Häufigkeitsverteilung und kann angenommen werden unter der Annahme, dass die beiden Komponenten  $u_x$  und  $u_y$  (entsprechen der Windgeschwindigkeit in zonale, bzw. meridional Richtung) individuell einer Gaußverteilung folgen bei einem Mittelwert von 0 und unabhängigen, isotropen Fluktuationen (Monahan, 2006).

## A.2. Umrechnung von CO<sub>2</sub>-Partialdruck in CO<sub>2</sub>-Fugazität

Die Umrechnung des CO<sub>2</sub>-Partialdruck ,  $p\text{CO}_2$ , in die CO<sub>2</sub>-Fugazität,  $f\text{CO}_2$ , folgt Zeebe u. Wolf-Gladrow (2001), hierin Seite 65):

$$p\text{CO}_2 = f\text{CO}_2 \cdot \frac{1}{\exp\left(p \cdot \frac{B+2\delta}{R \cdot T}\right)} \quad (\text{A.2})$$

mit

$$B(\text{m}^3 \text{mol}^{-1}) = (-1636.75 + 12.0408 \cdot T - 3.27957 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 3.16528 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) \cdot 10^{-6}$$

(A.3)

und

$$\delta(m^3 mol^{-1}) = (57.7 - 0.118 \cdot T) \cdot 10^{-6} \quad (A.4)$$

$pCO_2$  und  $fCO_2$  werden beide in  $\mu atm$  angegeben,  $p$  ist der atmosphärische Druck in Pa,  $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  ist die Gaskonstante und  $T$  ist die absolute Temperatur in Kelvin.

### A.3. Alkalinität im Nordatlantik

Die Berechnung der Alkalinität für den Nordatlantik aus Salzgehalt (SSS) und Oberflächentemperatur (SST) erfolgt nach der empirischen Formel von Lee u. a. (2006):

$$ALK(\mu mol kg^{-1}) = 2305 + 53.97 \cdot (SSS - 35) + 2.74 \cdot (SSS - 35)^2 - 1.16 \cdot (SST - 20) - 0.04 \cdot (SST - 20)^2 \quad (A.5)$$

### A.4. csys.m

Das MATLAB-Skript `csys.m` (Zeebe u. Wolf-Gladrow (2001)) löst das Gleichungssystem des  $CO_2$ -Systems in Wasser von 8 Gleichungen mit 10 Unbekannten. Zwei Unbekannte müssen dafür spezifiziert werden, also bekannt sein. Das MATLAB-Skript `csys.m` ruft die Unterfunktion `equic_iris.m` auf. Diese Unterfunktion basiert im Original ebenfalls auf der Arbeit von Zeebe u. Wolf-Gladrow (2001), ist für die hier vorgestellt Verwendung angepasst und berechnet Gleichgewichtskonstanten der chemischen Reaktionen im  $CO_2$ -System. Diese Gleichgewichtskonstanten sind nötig um das Gleichungssystem zu lösen. Im Folgenden ist das MATLAB-Skript `csys.m` in der Anpassung an die Kombination der als bekannt vorgegebenen Variablen  $CO_2$ -Partialdruck und Alkalinität dargestellt:

```
function DIC = csys_iris(pCO2, alk1, TC, S, P)
% INPUT: pco2 - CO2 Partialdruck in atm
%        alk  - Alkalinitaet in mol/kg
%        TC   - Temperatur in degC
%        S    - Salzgehalt in PSU
```



```

%           Compare book by
%
%           Zeebe & Wolf-Gladrow, CO2 in Seawater:
%           Equilibrium, Kinetics, Isotopes.
%
% updates:
%
% 03/02/10 REZ: boric acid pressure coefficient corrected
%           (see equic.m)
%
% 03.01.01 k -> K
% 01.10.98 include pressure
% 08.05.95 set phflag Total or free
%
% MATLAB 5.3.1
%
% remarks: specify S, T, and P, flag-number for the two variables
%           pH flag, choose constants (Roy or Mehrbach),
%           and values for two variables.
%
%           the variable s is equivalent to [CO2]
%
% use:      save file in directory. open matlab. type 'csys'
%
% -----

%===== INPUT SECTION =====%

% flag = 1      h and CO2 given
% flag = 101    h and pco2 given
% flag = 2      CO2 and HCO3 given
% flag = 3      CO2 and CO3 given
% flag = 4      CO2 and ALK given
% flag = 5      CO2 and DIC given
% flag = 6      h and HCO3 given
% flag = 7      h and CO3 given
% flag = 8      h and ALK given

```

```

% flag = 9      h and DIC given
% flag = 10     HCO3 and CO3 given
% flag = 11     HCO3 and ALK given
% flag = 12     HCO3 and DIC given
% flag = 13     CO3 and ALK given
% flag = 14     CO3 and DIC given
% flag = 15     ALK and DIC given

%===== Set flag =====%
flag = 4;

%----- pH Total or pH free -----%
%
% Specify on which pH scale we are working on.
% DIC, ALK, pCO2, CO2, CO3, and HCO3 are
% physical quantities which do not depend on the pH
% scale! However, the pH does depend on the scale
% used. A certain set of equilibrium
% constants belongs to a certain pH scale.
% The scale conversion of the constants is
% done in equic.m.
%
% Note that from  $[H+]_{total} > [H+]_{free}$ 
% follows  $pH_{total} < pH_{free}$ 
%
% The total scale is recommended.
%

phflag = 0;      % 0: Total scale
                % 1: Free scale

%----- choose K1 and K2: Roy or Mehrbach.

k1k2flag = 1;   % 0: Roy et al. (1993)
                % 1: Mehrbach et al (1973) as
                % refit by Lueker et al. (2000) on total scale.

```

```

% TC, S und P werden uebergeben
%----- set temperature, salinity and pressure
%
% TC = 25.;    % deg C
% S = 35.;
% P = 000.;   % bar

%---- load constants
[Kh,Kw, K1, K2, Kb ]=equic_iris(TC, S, P,k1k2flag, phflag); % Was ist der Output
bor = 1.*(416.*(S/35.))* 1.e-6;    % (mol/kg), DOE94

%---- set values for carbonate system
% %---- specify two variables according to flag (see above)
%
% ph1   = 8.2;          % pH
% h1    = 10^(-ph1);   % [H+]
% %s1   = 10.e-6;      % [CO2]    (mol/kg)
% %hco31 = 1750.e-6;   % [HCO3-]  (mol/kg)
% %co31  = 250.e-6;    % [CO3--]  (mol/kg)
% %alk1  = 2400.e-6;   % ALK      (mol/kg)
% %dic1  = 2000.e-6;   % [DIC]   (mol/kg)
% %pco21 = 280.e-6;    % pCO2    (atm)

% ak11 ist uebergeben
s1 = Kh*pCO2;

% ----- These values are test values, set test= 0/1 -----%
% test = 0;
% if test == 1;
%   TC = 25.;
%   S = 35.;
%   P = 0.;
%   equic;
%   bor = (416.*(S/35.))* 1.e-6;    % (mol/kg), DOE94
%   ph1   = 8.0902;                %      pH (8.0902 Total, 8.1979 Free)
%   h1    = 10^(-ph1);             %      [H+]

```

```

% s1 = 10.1304e-6; % [CO2]
% hco31 = 1735.9e-06; % [HCO3-]
% co31 = 253.9924e-6; % [CO3--]
% dic1 = 2000.e-6; % [DIC]
% alk1 = 2350.e-6; % Alk
% pco21 = 356.8058e-6; % pCO2
% end;
%
%
% ===== END INPUT SECTION =====%
%
%
% rest of file contains the numerical routines.
%
% =====%

% ----- s and ALK given -----
if flag == 4
disp('flag = 4, CO2 and ALK given');
s = s1;
alk = alk1;
p4 = 1.;
p3 = Kb+alk;
p2 = alk*Kb-s*K1-Kb*bor-Kw;
p1 = -s*Kb*K1-s*2.*K1*K2-Kw*Kb;
p0 = -2.*s*Kb*K1*K2;
p = [p4 p3 p2 p1 p0];
r = roots(p);
h = max(real(r));
h*1.e12;
dic = s*(1.+K1/h+K1*K2/h/h);
hco3 = dic/(1+h/K1+K2/h);
co3 = dic/(1+h/K2+h*h/K1/K2);
% alk = s*(K1/h+2.*K1*K2/h/h)+Kb*bor/(Kb+h)+Kw/h-h;
% ----- change units: mumol/kg
%h1 = 10^(-ph1);
CO2 = s*1.e6

```

```
pCO2    = s*1.e6/Kh
HCO3    = hco3*1.e6
CO3     = co3*1.e6
DIC     = dic*1.e6
ALK     = alk*1.e6
end
return;
```

## B. Danksagung

Ich danke Prof. Dr. Detlef Stammer und Dr. Martin Gade für die Betreuung und die Begutachtung meiner Arbeit.

Prof. Dr. Arne Körtzinger und Prof. Dr. Detlef Stammer danke ich für das Gespräch in Kiel, das besonders für den zweiten Teil der Arbeit inspirierend war.

Außerdem danke ich Martin Gade für die Unterstützung und wiederkehrende Motivation, gerade auch während schwieriger Phasen der Promotion.

Nuno Serra danke ich für die großartige Unterstützung im zweiten Teil der Arbeit und für die wertvollen und reichhaltigen Kommentare zum Manuskript.

Nikolaus Koopmann und Martin Vögele danke ich für die gute Arbeit mit den Daten der Metop-A- und der Oceansat-2-Mission. Thomas Schlick danke ich für die Hilfe mit dem “Multimukel”.

Mein Dank gilt Anton Verhoef für die nachträgliche Bereitstellung der Oceansat-2-Winddaten.

Ernst Maier-Reimer und Jochen Segschneider danke ich für den Zugang zu den HAMOCC5-Daten und für die Unterstützung bei der Anwendung dieser Daten, sowie für die offenen Ohren für meine Fragen.

Meike Sena Martins möchte ich ganz herzlich für das mehrmalige Korrekturlesen und für die guten Kommentare zu dem Manuskript danken.

Meinen Kollegen in der Bundesstraße und im Grindelberg möchte ich für die freundliche, kollegiale Atmosphäre danken, die das Arbeiten sehr angenehm macht.

Meinem Schwiegervater danke ich herzlich für die Anmerkungen zum Manuskript.

Meiner Freundin Ute Daewel danke ich herzlich für die Kommentare zu meiner Arbeit.

Meiner gesamten Familie danke ich für die Geduld, das Vertrauen in mich und die Unterstützung jeglicher Art.

## SOPRAN

Diese Arbeit wurde im Rahmen des durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderte Verbundprojekt SOPRAN<sup>1</sup> („Surface Ocean Processes in the ANthropocene“) während der Projektphasen I und II erstellt. SOPRAN ist der aus Deutschland stammende Beitrag zum internationalen SOLAS<sup>2</sup> („Surface Ocean - Lower Atmosphere Study“)-Programm und widmet sich unter anderem dem Aspekt des Material-Austauschs zwischen Ozean und Atmosphäre. Die vorliegende Arbeit ist verankert in dem Unterprojekt „Improved Global CO<sub>2</sub> Flux Estimates derived from Satellite Data“ des Themenbereichs „Air sea gas exchange and surface microlayer“. Ziel dieses Unterprojekts ist unter anderem eine verbesserte Abschätzung globaler CO<sub>2</sub>-Flüsse auf der Basis von Satelliten-Scatterometerdaten.

---

<sup>1</sup><http://sopran.pangaea.de/>

<sup>2</sup><http://solas-int.org/>

## C. Hilfsmittel

Die zur Erstellung dieser Arbeit verwendeten Hilfsmittel sind die Software-Programme

- Lyx
- MATLAB



## **D. Eidesstattliche Versicherung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 3.12.2013

---

Iris Hinrichs







# Literaturverzeichnis

- [Antonov u. a. 2010] Antonov, J. I.; Seidov, D.; Boyer, T. P.; Locarnini, R. A.; Mishonov, A. V.; Garcia, H. E.; Levitus, S. (Hrsg.): World Ocean Atlas 2009. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010. – 184 S.
- [Asher u. Wanninkhof 1998] Asher, William E.; Wanninkhof, Rik: The effect of bubble-mediated gas transfer on purposeful dual-gaseous tracer experiments. In: *Journal of Geophysical Research* 103 (1998), Nr. C5
- [Boutin u. a. 2002] Boutin, J.; Etcheto, J.; Merlivat, L.; Rangama, Y.: Influence of gas exchange coefficient parameterisation on seasonal and regional variability of CO<sub>2</sub> air-sea fluxes. In: *Geophysical Research Letters* 29 (2002), April, Nr. 8, 1182–. <http://dx.doi.org/10.1029/2001GL013872>. – ISSN 0094–8276
- [Boutin u. a. 2009] Boutin, J.; Quilfen, Y.; Merlivat, L.; Piolle, J. F.: Global average of air-sea CO<sub>2</sub> transfer velocity from QuikSCAT scatterometer wind speeds. In: *Journal of Geophysical Research - Oceans* 114 (2009), April, Nr. C4, C04007+. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004168>. – DOI 10.1029/2007JC004168. – ISSN 0148–0227
- [Broecker u. a. 1978] Broecker, Hans C.; Petermann, Jörg; Siems, Wolfgang: The influence of wind on CO<sub>2</sub> -exchange on a wind-wave tunnel, including the effects of monolayers. In: *Journal of Marine Research* 36 (1978), Nr. 4, S. 595–610
- [Broecker u. a. 1985] Broecker, Wallace S.; Peng, Tsung-Hung; Ostlund, Gote; Stuiver, Minze: The Distribution of Bomb Radiocarbon in the Ocean. In: *Journal of Geophysical Research* 90 (1985), Nr. C4, 6953–6970. <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC04p06953>. – ISSN 0148–0227
- [Brown u. Alexander 1991] Brown, David; Alexander, Neal: The Analysis of the Variance and Covariance of Products. In: *Biometrics* 47 (1991), Nr. 2, pp. 429–444. <http://www.jstor.org/stable/2532136>. – ISSN 0006341X
- [Carr u. a. 2002] Carr, Mary-Elena; Tang, Wenqing; Liu, Timothy W.: CO<sub>2</sub> exchange coefficients from remotely sensed wind speed measurements: SSM/I versus QuikSCAT in 2000. In: *Geophysical Research Letters* 29 (2002), Au-

- gust, Nr. 15, 1740+. <http://dx.doi.org/10.1029/2002GL015068>. – DOI 10.1029/2002GL015068
- [Cowen u. Sponaugle 2009] Cowen, Robert K.; Sponaugle, Su: Larval Dispersal and Marine Population Connectivity. In: *Annual Review of Marine Science* 1 (2009), Nr. 1, 443-466. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163757>. – DOI 10.1146/annurev.marine.010908.163757
- [Deacon 1977] Deacon, E. L.: Gas transfer to and across an air-water interface. In: *Tellus* 29 (1977), S. 363–374
- [Denman u. a. 2007] *Kapitel* Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Denman, K.L.; Brasseur, G.; Chidthaisong, A.; Ciais, P.; Cox, P.M.; Dickinson, R.E.; Hauglustaine, D.; Heinze, C.; Holland, E.; Jacob, D.; Lohmann, U.; Ramachandran, S.; Silva Dias, P.L. da; Wofsy, S.C.; Zhang, X.: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2007
- [Emerson u. Hedges 2008] Emerson, S.R.; Hedges, J.I.: *Chemical Oceanography and the Marine Carbon Cycle*. Cambridge University Press, 2008
- [Fairall u. a. 2000] Fairall, C. W.; Hare, J. E.; Edson, J. B.; McGillis, W.: Parameterization and micrometeorological measurement of air-sea gas transfer. In: *Boundary-Layer Meteorology* 96 (2000), S. 63–105
- [Fangohr u. a. 2008] Fangohr, Susanne; Woolf, David K.; Jeffery, Christopher D.; Robinson, Ian S.: Calculating long-term global air-sea flux of carbon dioxide using scatterometer, passive microwave, and model reanalysis wind data. In: *Journal of Geophysical Research* 113 (2008), September, C09032+. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC003376>. – DOI 10.1029/2005JC003376
- [Fofonoff u. Millard Jr. 1983] Fofonoff, N.P.; Millard Jr., R.C.: Algorithms for computation of fundamental properties of seawater / UNESCO. 1983
- [Garbe u. a. 2004] Garbe, C. S.; Schimpf, U.; Jähne, B.: A surface renewal model to analyze infrared image sequences of the ocean surface for the study of air-sea heat and gas exchange. In: *Journal of Geophysical Research* 109 (2004). <http://dx.doi.org/doi:10.1029/2003JC001802>. – DOI doi:10.1029/2003JC001802
- [GLOBALVIEWCO2 2011] GLOBALVIEWCO2: Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. CD-ROM, NOAA ESRL, Boulder, Colorado. (Also available on Internet via anonymous FTP to ftp.cmdl.noaa.gov, Path: ccg/co2/GLOBALVIEW ). 2011

- [Goldman u. a. 1988] Goldman, Joel C.; Dennett, Mark R.; Frew, Nelson M.: Surfactant effects on air-sea gas exchange under turbulent conditions. In: *Deep-Sea Research* 35 (1988), Nr. 12, S. 1953–1970
- [Gruber u. a. 2009] Gruber, Nicolas; Gloor, Manuel; Mikaloff Fletcher, Sara E.; Doney, Scott C.; Dutkiewicz, Stephanie; Follows, Michael J.; Gerber, Markus; Jacobson, Andrew R.; Joos, Fortunat; Lindsay, Keith; Menemenlis, Dimitris; Mouchet, Anne; Müller, Simon A.; Sarmiento, Jorge L.; Takahashi, Taro: Oceanic sources, sinks, and transport of atmospheric CO<sub>2</sub>. In: *Global Biogeochemical Cycles* 23 (2009), Februar, Nr. 1, GB1005–. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GB003349>. – ISSN 0886–6236
- [Hara u. a. 2007] Hara, Tetsu; Vaninwegen, Eric; Wendelbo, John; Garbe, Christoph S.; Schimpf, Uwe; Jähne, Bernd; Frew, Nelson: Estimation of air-sea gas and heat fluxes from infrared imagery based on near surface turbulence models. In: Garbe, Christoph S. (Hrsg.); Handler, Robert A. (Hrsg.); Jähne, Bernd (Hrsg.): *Transport at the Air-Sea Interface - Measurements, Models and Parametrizations*, Springer, 2007 (Environmental Science and Engineering), S. 241–254
- [Harrison u. a. 2012] Harrison, E. L.; Veron, F.; Ho, D. T.; Reid, M. C.; Orton, P.; McGillis, W. R.: Nonlinear interaction between rain- and wind-induced air-water gas exchange. In: *Journal of Geophysical Research* 117 (2012), März, Nr. C3, C03034–. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007693>. – ISSN 0148–0227
- [Herlina u. Jirka 2007] Herlina; Jirka, Gerhard H.: Turbulent gas flux measurements near the air-water interface in a grid-stirred tank. In: Garbe, Christoph S. (Hrsg.); Handler, Robert A. (Hrsg.); Jähne, Bernd (Hrsg.): *Transport at the Air-Sea Interface - Measurements, Models and Parametrizations*, Springer, 2007 (Environmental Science and Engineering), S. 25–41
- [Ho u. a. 2000] Ho, David T.; Asher, William E.; Bliven, Larry F.; Schlosser, Peter: On mechanisms of rain-induced air-water gas exchange. In: *Journal of Geophysical Research* 105 (2000), October, Nr. C10, S. 24045–24057
- [Ho u. a. 2006] Ho, David T.; Law, Cliff S.; Smith, Murray J.; Schlosser, Peter; Harvey, Mike; Hill, Peter: Measurements of air-sea gas exchange at high wind speeds in the Southern Ocean: Implications for global parameterizations. In: *Geophysical Research Letters* 33 (2006). <http://dx.doi.org/doi:10.1029/2006GL026817>. – DOI doi:10.1029/2006GL026817
- [Ho u. a. 2007] Ho, David T.; Veron, Fabrice; Harrison, Emily; Bliven, Larry F.; Scott, Nicholas; McGillis, Wade R.: The combined effect of rain and wind on air-water gas exchange: A feasibility study. In: *Journal of Marine Systems* 66

- (2007), 150–160. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jmarsys.2006.02.012>. – DOI doi:10.1016/j.jmarsys.2006.02.012
- [Ho u. a. 2004] Ho, David T.; Zappa, Christopher J.; Mcgillis, Wade R.; Bliven, Larry F.; Ward, Brian; Dacey, John W. H.; Schlosser, Peter; Hendricks, Melissa B.: Influence of rain on air-sea gas exchange: Lessons from a model ocean. In: *Journal of Geophysical Research* 109 (2004). <http://dx.doi.org/doi:10.1029/2003JC001806>. – DOI doi:10.1029/2003JC001806
- [Jähne u. a. 1979] Jähne, B.; Münnich, K. O.; Siegenthaler, U.: Measurements of gas exchange and momentum transfer in a circular wind-water tunnel. In: *Tellus* 31 (1979), Nr. 4, S. 321–329
- [Jähne u. a. 1987] Jähne, Bernd; Münnich, Karl O.; Dutzi, Rainer Bösinger A.; Huber, Werner; Libner, Peter: On the Parameters Influencing Air-Water Gas Exchange. In: *Journal of Geophysical Research* 92 (1987), Nr. C2, 1937–1949. <http://dx.doi.org/10.1029/JC092iC02p01937>. – ISSN 0148–0227
- [Kalnay u. a. 1996] Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Jenne, Roy; Joseph, Dennis: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (1996), Nr. 3, S. 437–471. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- [Lee u. a. 2006] Lee, Kitack; Tong, Lan T.; Millero, Frank J.; Sabine, Christopher L.; Dickson, Andrew G.; Goyet, Catherine; Park, Geun H.; Wanninkhof, Rik; Feely, Richard A.; Key, Robert M.: Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of the world's oceans. In: *Geophysical Research Letters* 33 (2006). <http://dx.doi.org/doi:10.1029/2006GL027207>. – DOI doi:10.1029/2006GL027207
- [Liss 1973] Liss, P. S.: Processes of gas exchange across an air-water interface. In: *Deep-Sea Research* 20 (1973), S. 221–238
- [Liss u. Merlivat 1986] Liss, P. S.; Merlivat, L.: Air-Sea gas exchange rates: Introduction and Synthesis, in *The role of air-sea gas exchange in geochemical cycling*, edited by P. Buat-Menard, Reidel, Dordrecht, Netherlands. (1986), S. pp 113–127
- [Lonin 1999] Lonin, Serguei A.: Lagrangian Model for Oil Spill Diffusion at Sea. In: *Spill Science & Technology Bulletin* 5 (1999), 331 - 336. <http://>

dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1353-2561(99)00078-X. – DOI  
http://dx.doi.org/10.1016/S1353-2561(99)00078-X. – ISSN 1353-2561

- [Lüger u. a. 2006] Lüger, Heike; Wanninkhof, Rik; Wallace, Douglas W.; Körtzinger, Arne: CO<sub>2</sub> fluxes in the sub-tropical and sub-arctic North Atlantic based on measurements from a Volunteer Observing Ship. In: *Journal of Geophysical Research - Oceans* 111 (2006), C06024. <http://eprints.ifm-geomar.de/8261/>
- [Maier-Reimer u. a. 2005] Maier-Reimer, E.; Kriest, Iris; Segschneider, J.; Wetzel, P.: The Hamburg Ocean Carbon Cycle Model HAMOCC5.1 - Technical Description Release 1.1. In: *Reports on Earth System Science* 14 (2005). <http://oceanrep.geomar.de/14321/>
- [Marshall u. a. 1997] Marshall, J.; Adcroft, A.; Hill, C.; Perelman, L.; Heisey, C.: A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. In: *Journal of Geophysical Research* 102 (1997), Nr. C3, S. 5753-5766. – ISSN 0148-0227
- [Marsland u. a. 2003] Marsland, S. J.; Haak, H.; Jungclaus, J. H.; Latif, M.; Röske, F.: The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. In: *Ocean Modelling* 5 (2003), Nr. 2, 91 - 127. [http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S1463-5003\(02\)00015-X](http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S1463-5003(02)00015-X). – DOI DOI: 10.1016/S1463-5003(02)00015-X. – ISSN 1463-5003
- [McGillis u. a. 2001] McGillis, W. R.; Edson, J. B.; Hare, J. E.; Fairall, C. W.: Direct covariance air-sea CO<sub>2</sub> fluxes. In: *Journal of Geophysical Research* 106 (2001), August, Nr. C8
- [Miller u. a. 2009] Miller, Scott; Marandino, Christa; Bruyn, Warren de; Saltzman, Eric S.: Air-sea gas exchange of CO<sub>2</sub> and DMS in the North Atlantic by eddy covariance. In: *Geophysical Research Letters* 36 (2009), AUG 8. <http://dx.doi.org/{10.1029/2009GL038907}>. – DOI 10.1029/2009GL038907. – ISSN 0094-8276
- [Monahan 2006] Monahan, Adam H.: The Probability Distribution of Sea Surface Wind Speeds. Part I: Theory and SeaWinds Observations. In: *Journal of Climate* 19 (2006), Februar, Nr. 4, 497-520. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3640.1>. – ISSN 0894-8755
- [Nägler 2009] Nägler, T.: Reconciliation of excess <sup>14</sup>C -constrained global CO<sub>2</sub> piston velocity estimates. In: *Tellus B* 61 (2009), Nr. 2, 372-384. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0889.2008.00408.x>. – DOI 10.1111/j.1600-0889.2008.00408.x. – ISSN 0280-6509
- [Nägler u. a. 2006] Nägler, T.; Ciais, P.; Rodgers, K.; Levin, I.: Excess radiocarbon

- constraints on air-sea gas exchange and the uptake of CO<sub>2</sub> by the oceans. In: *Geophysical Research Letters* 33 (2006), June, Nr. 11, L11802+. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL025408>. – DOI 10.1029/2005GL025408. – ISSN 0094–8276
- [Nightingale 2009] *Kapitel Air-Sea Gas Exchange*. In: Nightingale, P. D.: *Surface Ocean-Lower Atmosphere Processes*. American Geophysical Union, 2009, S. 69–97
- [Nightingale u. a. 2000] Nightingale, Philip D.; Malin, Gill; Law, Cliff S.; Watson, Andrew J.; Liss, Peter S.; Liddicoat, Malcolm I.; Boutin, Jacqueline; Robert: In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers. In: *Global Biogeochemical Cycles* 14 (2000), Nr. 1, S. 373–387
- [Olsen u. a. 2005] Olsen, A.; Wanninkhof, R.; Trinanes, J. A.; Johannessen, T.: The effect of wind speed products and wind speed-gas exchange relationships on interannual variability of the air-sea CO<sub>2</sub> gas transfer velocity. In: *Tellus Series B-Chemical And Physical Meteorology* 57 (2005), APR, Nr. 2
- [Pfeil u. a. 2012] Pfeil, B.; Olsen, A.; Bakker, D. C. E.; Hankin, S.; Koyuk, H.; Kozyr, A.; Malczyk, J.; Manke, A.; Metzl, N.; Sabine, C. L.; Akl, J.; Alin, S. R.; Bellerby, R. G. J.; Borges, A.; Boutin, J.; Brown, P. J.; Cai, W.-J.; Chavez, F. P.; Chen, A.; Cosca, C.; Fassbender, A. J.; Feely, R. A.; González-Dávila, M.; Goyet, C.; Hardman-Mountford, N.; Heinze, C.; Hood, M.; Hoppema, M.; Hunt, C. W.; Hydes, D.; Ishii, M.; Johannessen, T.; Jones, S. D.; Key, R. M.; Körtzinger, A.; Landschützer, P.; Lauvset, S. K.; Lefèvre, N.; Lenton, A.; Lourantou, A.; Merlivat, L.; Midorikawa, T.; Mintrop, L.; Miyazaki, C.; Murata, A.; Nakadate, A.; Nakano, Y.; Nakaoka, S.; Nojiri, Y.; Omar, A. M.; Padin, X. A.; Park, G.-H.; Paterson, K.; Perez, F. F.; Pierrot, D.; Poisson, A.; Ríos, A. F.; Santana-Casiano, J. M.; Salisbury, J.; Sarma, V. V. S. S.; Schlitzer, R.; Schneider, B.; Schuster, U.; Sieger, R.; Skjelvan, I.; Steinhoff, T.; Suzuki, T.; Takahashi, T.; Tedesco, K.; Telszewski, M.; Thomas, H.; Tilbrook, B.; Tjiputra, J.; Vandemark, D.; Veness, T.; Wanninkhof, R.; Watson, A. J.; Weiss, R.; Wong, C. S.; Yoshikawa-Inoue, H.: A uniform, quality controlled Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT). In: *Earth System Science Data Discussions* 5 (2012), Nr. 2, 735–780. <http://dx.doi.org/10.5194/essdd-5-735-2012>. – DOI 10.5194/essdd-5-735-2012
- [Philander 1990] Philander, S. G. H.: *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press Limited, 1990
- [Piolle u. Bentamy 2002] Piolle, J. F.; Bentamy, A.: *Mean wind fields (MWF Product) - Volume 1 - ERS-1, ERS-2 & NSCAT - User manual*. Ref.: C2-

MUT-W-05-IF, Version 1.0. Ifremer, Department of Oceanography from Space, April 2002. – Bremerhaven, PANGAEA, 54 p. .

- [Putman u. He 2013] Putman, Nathan F.; He, Ruoying: Tracking the long-distance dispersal of marine organisms: sensitivity to ocean model resolution. In: *Journal Of The Royal Society Interface* 10 (2013), APR 6, Nr. 81. <http://dx.doi.org/{10.1098/rsif.2012.0979}>. – DOI 10.1098/rsif.2012.0979. – ISSN 1742–5689
- [Quilfen u. Bentamy 1994] Quilfen, Y.; Bentamy, A.: Calibration/validation of ERS-1 scatterometer precision products. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International Bd. 2*, 1994, S. 945 – 947
- [Rayner u. a. 2003] Rayner, NA; Parker, DE; Horton, EB; Folland, CK; Alexander, LV; Rowell, DP; Kent, EC; Kaplan, A: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. In: *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres* 108 (2003), JUL 17, Nr. D14. <http://dx.doi.org/{10.1029/2002JD002670}>. – DOI 10.1029/2002JD002670. – ISSN 0148–0227
- [Sabine u. a. 2004] Sabine, Christopher L.; Feely, Richard A.; Gruber, Nicolas; Key, Robert M.; Lee, Kitack; Bullister, John L.; Wanninkhof, Rik; Wong, C. S.; Wallace, Douglas R.; Tilbrook, Bronte; Millero, Frank J.; Peng, Tsung H.; Kozyr, Alexander; Ono, Tsueno; Rios, Aida F.: The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. In: *Science* 305 (2004), July, 367–371. <http://dx.doi.org/doi:10.1126/science1097403>. – DOI doi:10.1126/science1097403
- [Sarmiento u. Gruber 2006] Sarmiento, Jorge L.; Gruber, Nicolas: *Ocean Biogeochemical Dynamics*. First. Princeton University Press, 2006
- [Serra u. a. 2010] Serra, N.; Kaese, R. H.; Koehl, A.; Stammer, D.; Quadfasel, D.: On the low-frequency phase relation between the Denmark Strait and the Faroe-Bank Channel overflows. In: *Tellus A* 62 (2010), Nr. 4, S. 530–550. – ISSN 1600–0870
- [Stohl u. a. 2003] Stohl, A.; Forster, C.; Eckhardt, S.; Spichtinger, N.; Huntrieser, H.; Heland, J.; Schlager, H.; Wilhelm, S.; Arnold, F.; Cooper, O.: A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (2003), Nr. D12, n/a–n/a. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JD002862>. – DOI 10.1029/2002JD002862. – ISSN 2156–2202
- [Suess 1955] Suess, Hans E.: Radiocarbon Concentration in Modern Wood. In:

- Science* 122 (1955), Nr. 3166, 415-417. <http://dx.doi.org/10.1126/science.122.3166.415-a>. – DOI 10.1126/science.122.3166.415-a
- [Takahashi u. a. 1993] Takahashi, T.; Olafsson, J.; Goddard, J.G.; Chipman, D.W.; Sutherland, S.C.: Seasonal variation of CO<sub>2</sub> and nutrients in the high-latitude surface oceans - a comparative-study. In: *Global Biogeochemical Cycles* 7 (1993), DEC, Nr. 4, S. 843–878. – ISSN 0886–6236
- [Takahashi u. a. 1997] Takahashi, Taro; Feely, Richard A.; Weiss, Ray F.; Wanninkhof, Rik H.; Chipman, David W.; Sutherland, Stewart C.; Takahashi, Timothy T.: Global air-sea flux of CO<sub>2</sub> : An estimate based on measurements of sea-air pCO<sub>2</sub> difference. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94 (1997), S. 8292–8299
- [Takahashi u. a. 2002] Takahashi, Taro; Sutherland, Stewart C.; Sweeney, Colm; Poisson, Alain; Metzl, Nicolas; Tilbrook, Bronte; Bates, Nicolas; Wanninkhof, Rik; Feely, Richard A.; Sabine, Christopher; Olafsson, Jon; Nojiri, Yukihiro: Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub> , and seasonal biological and temperature effects. In: *Deep-Sea Research* 49 (2002), S. 1601–1622
- [Takahashi u. a. 2009a] Takahashi, Taro; Sutherland, Stewart C.; Wanninkhof, Rik; Sweeney, Colm; Feely, Richard A.; Chipman, David W.; Hales, Burke; Friederich, Gernot; Chavez, Francisco; Sabine, Christopher; Watson, Andrew; Bakker, Dorothee C.; Schuster, Ute; Metzl, Nicolas; Yoshikawa-Inoue, Hisayuki; Ishii, Masao; Midorikawa, Takashi; Nojiri, Yukihiro; Körtzinger, Arne; Steinhoff, Tobias; Hoppema, Mario; Olafsson, Jon; Arnarson, Thorarinn S.; Tilbrook, Bronte; Johannessen, Truls; Olsen, Are; Bellerby, Richard; Wong, C.S.; Delille, Bruno; Bates, N.R.; Baar, Hein J.: Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. In: *Deep Sea Research Part II* 56 (2009), 554-577. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967064508004311>. – ISSN 0967–0645
- [Takahashi u. a. 2009b] Takahashi, Taro; Sutherland, Stewart C.; Wanninkhof, Rik; Sweeney, Colm; Feely, Richard A.; Chipman, David W.; Hales, Burke; Friederich, Gernot; Chavez, Francisco; Sabine, Christopher; Watson, Andrew; Bakker, Dorothee C.; Schuster, Ute; Metzl, Nicolas; Yoshikawa-Inoue, Hisayuki; Ishii, Masao; Midorikawa, Takashi; Nojiri, Yukihiro; Körtzinger, Arne; Steinhoff, Tobias; Hoppema, Mario; Olafsson, Jon; Arnarson, Thorarinn S.; Tilbrook, Bronte; Johannessen, Truls; Olsen, Are; Bellerby, Richard; Wong, C.S.; Delille, Bruno; Bates, N.R.; Baar, Hein J.: Corrigendum to "Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub> , and net sea-air CO<sub>2</sub>

- flux over the global oceans"[Deep Sea Res. II 56 (2009) 554-577]. In: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56 (2009), November, Nr. 11, 2075–2076. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VGB-4X0W4KF-1/2/344753412ea3dc572f44a1ec44778d06>. – ISSN 0967–0637
- [Verhoef u. Stoffelen 2012a] Verhoef, A.; Stoffelen, A.: *ASCAT Wind Product User Manual version 1.12*. SAF/OSI/CDOP/KNMI/TEC/MA/126, EUMETSAT, 2012
- [Verhoef u. Stoffelen 2012b] Verhoef, A.; Stoffelen, A.: *Oceansat-2 Wind Product User Manual version 1.2*. SAF/OSI/CDOP2/KNMI/TEC/MA/140, EUMETSAT, 2012
- [Verhoef u. Stoffelen 2013] Verhoef, A.; Stoffelen, A.: *ASCAT Wind Product User Manual version 1.13*. SAF/OSI/CDOP/KNMI/TEC/MA/126, EUMETSAT, 2013
- [Verhoef u. Hersbach 2008] Verhoef, M. Portabella A. S. A.; Hersbach, H.: CMOD5.n - the CMOD5 GMF for neutral winds / OSI SAF report, OSI SAF report, SAF/OSI/CDOP/KNMI/TEC/TN/165. 2008
- [Wanninkhof u. a. 2002] Wanninkhof, R.; Doney, S. C.; Takahashi, T.; McGillis, W. R.: The effect of using time-averaged winds on regional air-sea CO<sub>2</sub> fluxes. Version: 2002. <http://dx.doi.org/10.1029/GM127p0351>. In: *Geophys. Monogr. Ser.* Bd. 127. Washington, DC : AGU, 2002. – ISSN 0–87590–986–8, 351–356
- [Wanninkhof 1992] Wanninkhof, Rik: Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. In: *Journal of Geophysical Research* 97 (1992), May, Nr. C5, S. 7373–7382
- [Wanninkhof 2007] Wanninkhof, Rik: The impact of different gas exchange formulations and wind speed products on global air-sea CO<sub>2</sub> fluxes. In: Garbe, Christoph S. (Hrsg.); Handler, Robert A. (Hrsg.); Jähne, Bernd (Hrsg.): *Transport at the Air-Sea Interface - Measurements, Models and Parametrizations*, Springer, 2007 (Environmental Science and Engineering), S. 1–23
- [Wanninkhof u. a. 2009] Wanninkhof, Rik; Asher, William E.; Ho, David T.; Sweeney, Colm; McGillis, Wade R.: Advances in Quantifying Air-Sea Gas Exchange and Environmental Forcing. In: *Annual Review of Marine Science* 1 (2009), Nr. 1, 213-244. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163742>. – DOI 10.1146/annurev.marine.010908.163742
- [Wanninkhof u. a. 1985] Wanninkhof, Rik; Ledwell, James R.; Broecker, Wallace S.: Gas Exchange-Wind Speed Relation Measured with Sulfur Hexafluoride on a

- Lake. In: *Science* 227 (1985), Nr. 4691, 1224–1226. <http://dx.doi.org/10.2307/1694215>. – DOI 10.2307/1694215
- [Wanninkhof u. a. 1987] Wanninkhof, Rik; Ledwell, James R.; Broecker, Wallace S.; Hamilton, Mike: Gas Exchange on Mono Lake and Crowley Lake, California. In: *Journal of Geophysical Research* 92 (1987), December, Nr. C13
- [Wanninkhof u. McGillis 1999] Wanninkhof, Rik; McGillis, Wade R.: A cubic relationship between air-sea CO<sub>2</sub> exchange and wind speed. In: *Geophysical Research Letters* 26 (1999), July, Nr. 13, S. 1889–1892
- [Wanninkhof u. a. 2004] Wanninkhof, Rik; Sullivan, Kevin F.; Top, Zafer: Air-sea gas transfer in the Southern Ocean. In: *Journal of Geophysical Research* 109 (2004), Juli, Nr. C8, C08S19–. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001767>. – ISSN 0148–0227
- [Weiss u. a. 2007] Weiss, Alexandra; Kuss, Joachim; Peters, Gerhard; Schneider, Bernd: Evaluating transfer velocity-wind speed relationship using a long-term series of direct eddy correlation CO<sub>2</sub> flux measurements. In: *Journal of Marine Systems* 66 (2007), Nr. 1-4, 130 - 139. <http://dx.doi.org/DOI:10.1016/j.jmarsys.2006.04.011>. – DOI DOI: 10.1016/j.jmarsys.2006.04.011. – ISSN 0924–7963. – 5th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces - Selected papers from the 37th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, 37th International Liege Colloquium on Ocean Dynamics
- [Weiss 1974] Weiss, R. F.: Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. In: *Marine Chemistry* 2 (1974), S. 203–215
- [Wentz u. a. 2001] Wentz, F. J.; Smith, D. K.; Mears, C. A.; Gentemann, C. L.: Advanced algorithms for QuikScat and SeaWinds/AMSR. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International Bd. 3, 2001, 1079–1081 vol.3*
- [Wetzel 2004] Wetzel, P.: *Interannual and Decadal Variability in the Air-Sea Exchange of CO<sub>2</sub> - a Model Study*, Max Planck Institute for Meteorology, Diss., 2004
- [Wetzel u. a. 2005] Wetzel, P.; Winguth, A.; Reimer, Maier E.: Sea-to-air CO<sub>2</sub> flux from 1948 to 2003: A model study. In: *Global Biogeochemical Cycles* 19 (2005), APR, Nr. 2. <http://dx.doi.org/%7B10.1029/2004GB002339%7D>. – DOI %7B10.1029/2004GB002339%7D
- [Wolter u. Timlin 1993] Wolter, K.; Timlin, M.S.: Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather

Service, Climate Analysis Center/NMC, 1993 (Proceedings of the Seventeenth Annual Climate Diagnostics Workshop, Held at the University of Oklahoma, Norman, Oklahoma), S. 52–57

[Wolter u. Timlin 1998] Wolter, Klaus; Timlin, Michael S.: Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank? In: *Weather* 53 (1998), Nr. 9, 315–324. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x>. – DOI 10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x. – ISSN 1477–8696

[Woolf 2005] Woolf, David K.: Parametrization of gas transfer velocities and sea-state-dependent wave breaking. In: *Tellus B* 57 (2005), Nr. 2, S. 87–94. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0889.2005.00139.x>. – DOI 10.1111/j.1600-0889.2005.00139.x

[Young u. a. 2011] Young, I. R.; Zieger, S.; Babanin, A. V.: Global Trends in Wind Speed and Wave Height. In: *Science* 332 (2011), Nr. 6028, 451-455. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1197219>. – DOI 10.1126/science.1197219

[Zappa u. a. 2004] Zappa, C. J.; Asher, W. E.; Jessup, A. T.; Klinke, J.; Long, S. R.: Microbreaking and the enhancement of air-water transfer velocity. In: *Journal of Geophysical Research* 109 (2004). <http://dx.doi.org/doi:10.1029/2003JC001897>. – DOI doi:10.1029/2003JC001897

[Zeebe u. Wolf-Gladrow 2001] Zeebe, Richard E.; Wolf-Gladrow, Dieter: *CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*. First. Elsevier, 2001 (Elsevier Oceanography Series, 65)







# Nomenklatur

ALK	Alkalinität, Seite 84
DIC	Dissolved Inorganic Carbon, gelöster anorganischer Kohlenstoff, Seite 84
ENSO	El Niño Southern Oscillation, Seite 14
F	Fluss, Gasaustausch, Seite 9
fCO <sub>2</sub>	Fugazität des Gases Kohlenstoffdioxid, Seite 12
HAMOCC5	Hamburg Ocean Carbon Cycle Model, Ausgabe 5, Seite 31
K	Gasaustauschkoeffizient, Seite 11
k	Gasaustauschgeschwindigkeit, Seite 10
NCEP	National Centers for Environmental Prediction, Seite 24
S	Salzgehalt, Seite 84
s	Löslichkeit, Seite 9
Sc	Schmidt-Zahl, Seite 10
SOCAT	Surface Ocean CO <sub>2</sub> Atlas, Seite 78
SSS	Sea Surface Salinity, Wasseroberflächensalzgehalt, Seite 32
SST	Sea Surface Temperatur, Wasseroberflächentemperatur, Seite 32
T	Temperatur, Seite 84
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid, Seite 1
<sup>13</sup> C	Kohlenstoffisotop, stabil, Seite 18
Δ <sup>14</sup> C	Verhältnis von <sup>14</sup> C zu <sup>12</sup> C, Seite 18
<sup>12</sup> C	Kohlenstoffisotop, stabil, Seite 18
ΔpCO <sub>2</sub>	Partialdruckdifferenz von Kohlenstoffdioxid, Seite 13
pCO <sub>2</sub>	Partialdruck des Gases Kohlenstoffdioxid, Seite 12



# Stichwortverzeichnis

chemische Verstärkung, 11

El Niño, 14

ENSO, 14

ERS-1, 27

ERS-2, 27

Fugazität, 12

Gasaustauschkoeffizient, 11

HadISST, 32

La Niña, 15

MetOp-A, 29

Nägler-Ansatz, 20

Oceansat-2, 30

QuikSCAT, 28

Rayleigh-Verteilung, 109

Satellitenfernerkundung, 22

Satellitenwindgeschwindigkeiten, 22

Scatterometrie, 22

Schmidt-Zahl, 10

Suess-Effekt, 18

Takahashi2002, 31

Takahashi2009, 31

Wanninkhof-Ansatz, 19



# Abbildungsverzeichnis

1.1. Globaler Kohlenstoffkreislauf für die 1990er-Jahre: vorindustrielle, „natürliche“ Speicher und Austausch (in schwarz) und „anthropogene“ Speicher und Austausch in rot. BPP = Bruttoprimärproduktion. Verändert nach Abbildung 7.3 aus Denman u. a. (2007) . . . . .	2
1.2. Abgeschätzte regionale CO <sub>2</sub> -Jahresnettoflüsse verschiedener Methoden (Gruber u. a. (2009)) . . . . .	3
2.1. Schematische Darstellung des CO <sub>2</sub> -Austauschs über die Grenzschicht zwischen Wasser und Luft . . . . .	9
2.2. Einfluss der Temperatur auf den Gasaustauschkoeffizienten, vergleiche Gleichung 2.2 und Gleichung 2.3. . . . .	12
2.3. Mittlere CO <sub>2</sub> -Partialdruckdifferenz ( $\Delta p_{CO_2}$ ) zwischen Ozean und Atmosphäre für das Jahr 2000. Basis sind die Takahashi2009-Daten, siehe auch Abschnitt 3.1.2. . . . .	14
2.4. Gasaustauschgeschwindigkeit als Funktion der Windgeschwindigkeit $u_{10}$ : ein Ausschnitt der über die letzten Jahrzehnte veröffentlichten Zusammenhänge. . . . .	16
2.5. Prinzip der Scatterometrie . . . . .	23
3.1. ERS-2, Wochenmittel der Windgeschwindigkeit für die Woche vom 30.12.1996 bis 6.1.1997, <a href="http://cersat.ifremer.fr/Data/Discovery/By-product-type/Gridded-products/MWF-ERS">http://cersat.ifremer.fr/Data/Discovery/By-product-type/Gridded-products/MWF-ERS</a> . . . . .	27
3.2. QuikSCAT, Wochenmittel für den Zeitraum 8.11.2009-14.11.2009 . . . . .	28
3.3. MetOp-A, Windgeschwindigkeitsdaten in Schwad-Form für den 16.1.2013, a) aufsteigender Überflug (in nördliche Richtung), b) absteigender Überflug (in südliche Richtung) ©2013 EUMETSAT . . . . .	29
3.4. Oceansat-2, Windgeschwindigkeitsdaten in Schwad-Form für den 16.1.2013, a) aufsteigender Überflug (in nördliche Richtung), b) absteigender Überflug (in südliche Richtung) ©2013 EUMETSAT . . . . .	30

3.5.	NCEP Windgeschwindigkeit, Monatsmittel für November 2009, (Die Abbildung wurde von der „Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado“ auf der Web-Seite <a href="http://www.esrl.noaa.gov/psd/">http://www.esrl.noaa.gov/psd/</a> zur Verfügung gestellt.) . . . . .	31
3.6.	Funktionale Zusammenhänge zwischen der Windgeschwindigkeit $u_{10}$ und der Gasaustauschgeschwindigkeit $k$ . Grundlage sind die in Gleichung 3.1, Gleichung 3.2 und Gleichung 3.3 dargestellten Beziehungen. Die Wahl der Faktoren entspricht den täglichen QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten für die SST-Klimatologie von NOAA. . . . .	37
3.7.	Oben: Flächengewichtetes, arithmetisches, globales Mittel der Windgeschwindigkeit auf Basis der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Satellitenwinde (Monatsmittel). Unten: Mittlerer Unterschied in der Windgeschwindigkeit, basierend auf Monatsmitteln . . . . .	41
3.8.	Zeitreihe der verbesserten Gasaustauschgeschwindigkeiten aus Satelliten-Scatterometer-Winddaten auf Grundlage der Parametrisierungen nach Gleichung 3.1, Gleichung 3.2 und Gleichung 3.3. Zusätzlich angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Gasaustauschgeschwindigkeit. . . . .	42
3.9.	Vergleich der hier ermittelten Gasaustauschkoeffizienten aus den Daten der QuikSCAT-Mission mit den von Boutin u. a. (2009) publizierten. . . . .	44
3.10.	Gasaustauschgeschwindigkeit auf Grundlage der QuikSCAT- und ERS-2-Winddaten. . . . .	45
3.11.	Relative Häufigkeit der Windgeschwindigkeit in zwei verschiedenen zonalen Bändern. Als Grundlage dienen tägliche QuikSCAT-Windgeschwindigkeitsfelder für das Jahr 2000. . . . .	46
3.12.	Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage der QuikSCAT- und MetOp-A-Winddaten . . . . .	47
3.13.	Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage der MetOp-A- und Oceansat-2-Winddaten . . . . .	48
3.14.	Jahresmittelwert des Verhältnisses der monatlichen Mittelwerte der Gasaustauschgeschwindigkeit berechnet aus täglichen und aus monatlichen Windgeschwindigkeitsfeldern. Aufteilung nach den drei $k$ -Parametrisierungen: obere Tafel: quadratisch, mittlere Tafel: kubisch, untere Tafel: hybrid . . . . .	50

3.15. „correction factor” R nach Fangohr u. a. (2008), Grundlage sind QuikSCAT-Windgeschwindigkeiten für die Jahre 2003 und 2004 . . .	53
3.16. Abgeschätzte globale CO <sub>2</sub> -Nettoflüsse für das Jahr 2000. Grundlage sind die Takahashi2009-Daten (siehe Abschnitt 3.1.2) . . . . .	54
3.17. CO <sub>2</sub> -Nettoflüsse berechnet mit dem Nögler-Ansatz und mit dem Wanninkhof-Ansatz (Grundlage sind QuikSCAT- bzw. AMSR-E-Windgeschwindigkeiten für das Jahr 2004 in täglicher und in monatlicher Auflösung und die Takahashi2002-Daten . . . . .	57
3.18. Vergleich der globalen CO <sub>2</sub> -Flüsse aus den Kombinationen Satellitenwind-HAMOCC5- $\Delta p$ CO <sub>2</sub> und NCEP-HAMOCC5- $\Delta p$ CO <sub>2</sub> mit den HAMOCC5-original-CO <sub>2</sub> -Flüssen. Die verwendete Gasaustauschparametrisierung ist die quadratische (Gleichung 3.1). “QS” steht für QuikSCAT, „NC” für NCEP Soweit nicht anders angegeben, wurden Monatsmittel der Windgeschwindigkeiten verwendet. Näheres siehe Text (Unterabschnitt 3.2.5). . . . .	59
3.19. Monatliche Anomalien des CO <sub>2</sub> -Nettoflusses der einzelnen Läufe (siehe Tabelle 3.4). Der obere Teil bezieht sich auf die gesamte Satellitenzeitreihe. Jedes Windgeschwindigkeitsprodukt hat einen eigenen Referenzlauf. Zusätzlich ist der Multivariate ENSO Index (Wolter u. Timlin, 1993, 1998) hinterlegt. . . . .	61
3.20. Zeitreihen der CO <sub>2</sub> -Nettoflüsse aus den einzelnen Läufen. Jedes Windgeschwindigkeitsprodukt hat einen eigenen Referenzlauf (siehe Tabelle 3.4). . . . .	63
3.21. Zeitreihen der regionalen CO <sub>2</sub> -Nettoflüsse aus den einzelnen Läufen. Als Grundlage dienen tägliche Windfelder der QuikSCAT (markiert als QS) und NCEP (markiert als NC) Daten. Jedes Windgeschwindigkeitsprodukt hat einen eigenen Referenzlauf (siehe Tabelle 3.4). . .	65
3.22. QuikSCAT, Aufteilung der totalen skalierten monatlichen Varianz des CO <sub>2</sub> -Flusses in die Terme A, B, C und D (siehe Tabelle 3.6 auf Seite 66 und Unterabschnitt 3.1.6) . . . . .	67
3.23. Summe der Terme B, C und D (siehe Tabelle 3.6 auf Seite 66 und Unterabschnitt 3.1.6) . . . . .	68
3.24. NCEP, Aufteilung der totalen skalierten Varianz des CO <sub>2</sub> -Flusses in die Terme A, B, C und D (siehe Tabelle 3.6 auf Seite 66 Unterabschnitt 3.1.6)	69

3.25. Grenzen der Eisbedeckung, bis zu der in den Scatterometerwindgeschwindigkeitsprodukten, ERS-2 und QuikSCAT sinnvoll Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden können, für das Jahr 2000. Eisbedeckung nach den HadISST-Daten. . . . .	75
4.1. In dieser Arbeit verwendetet SOCAT-Messungen unterteilt nach Jahren. Dargestellt ist die geographische Lage der Schiffsrouten, während derer die SOCAT-Messungen stattfanden. Die farbliche Kodierung (siehe Farbskala) bezieht sich auf den dargestellten gemessenen Parameter, $f\text{CO}_2$ , die $\text{CO}_2$ -Fugazität in $\mu\text{atm}$ (siehe Abschnitt 2.2).	79
4.2. Modellgebiet nördlich des Äquators. Die dargestellten Parameter sind die mittlere Oberflächenhöhe (farblich kodiert) und die mittlere geostrophische Oberflächengeschwindigkeit als Pfeile. Die Strömungsgeschwindigkeit ist in zwei Klassen unterteilt, siehe Skalierung. Der Zeitraum der Mittelwertbildung sind die Jahre 1948-2009.	80
4.3. Temperatur- (linke Spalte) und Salzgehaltsdaten (rechte Spalte) aus den SOCAT-Messungen gegen den Salzgehalt und die Temperature aus der Modellsimulation für die Jahre 2003-2006. Zum Vergleich ist in rot die Identitätslinie dargestellt. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist $\geq 95\%$ . . . . .	81
4.4. Die Positionen der virtuellen Treibkörper bestimmen sich aus den Feldern der Strömungsgeschwindigkeit aus dem Ozeanzirkulationsmodell, siehe Gleichung 4.1. Der Weg eines virtuellen Treibkörpers wird für maximal ein Kalenderjahr verfolgt. In rot sind die initialen Positionen der Treibkörper dargestellt. Diese Positionen ergeben sich aus den SOCAT-Messungen, siehe Abbildung 4.1. . . . .	83
4.5. Geographische Lage der doppelt beprobten Trajektorien . . . . .	87
4.6. Zeitliche Übersicht der doppelt beprobten Trajektorien. Die Lage und Länge der Balken bezüglich der y-Achse geben den Start- und Endzeitpunkt und somit die Dauer der einzelnen Trajektorien an. . . . .	88
4.7. Räumliche Lage der drei Beispiel-Trajektorien mit jeweiliger, räumlicher Vergrößerung . . . . .	89
4.8. 2003, Trajektorie Nr. 13: Zeitlicher Verlauf der im Lagrange'schen Ansatz modellierten Parameter, der Löslichkeit, der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorie; zusätzlich ist die Wassertiefe des virtuellen Treibkörpers dargestellt. . . . .	90

4.9.	2004, Trajektorie Nr. 47: Zeitlicher Verlauf der im Lagrange'schen Ansatz modellierten Parameter, der Löslichkeit, der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorie; zusätzlich ist die Wassertiefe des virtuellen Treibkörpers dargestellt. . . . .	91
4.10.	2005, Trajektorie Nr. 87: Zeitlicher Verlauf der im Lagrange'schen Ansatz modellierten Parameter, der Löslichkeit, der Temperatur und des Salzgehalts entlang der Trajektorie; zusätzlich ist die Wassertiefe des virtuellen Treibkörpers dargestellt. . . . .	92
4.11.	Simuliertes $p\text{CO}_2$ im Vergleich zu den gemessenen SOCAT $p\text{CO}_2$ -Werten; unterteilt nach den drei in der Lagrange'schen Modellierung verwendeten $k\text{-}u_{10}$ -Parametrisierungen des Gasaustausches. Insgesamt werden 239 Datenpunkte betrachtet. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist $\geq 95\%$ . . . . .	94
4.12.	Die Korrelationen (Signifikanzniveau $\geq 95\%$ ) der $p\text{CO}_2$ -Zeitreihen mit den anderen Parametern wurden für alle 239 Trajektorien berechnet. Die Gasaustauschparametrisierung ist die quadratische. Der Fluss $F$ von $\text{CO}_2$ über die Grenzschicht Wasser-Luft ist im Parameter DIC enthalten (siehe Unterabschnitt 4.1.4). . . . .	95
4.13.	Unterscheidung nach Halbjahren: Simuliertes $p\text{CO}_2$ im Vergleich zu den gemessenen SOCAT $p\text{CO}_2$ -Werten; unterteilt nach den drei verwendeten $k\text{-}u_{10}$ -Parametrisierungen des Gasaustausches. Werte in Klammern geben die Anzahl der betrachteten Datenpunkte an. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist $\geq 95\%$ . . . . .	97
4.14.	Unterscheidung nach Regionen: Simuliertes $p\text{CO}_2$ im Vergleich zu den gemessenen SOCAT $p\text{CO}_2$ -Werten; unterteilt nach den drei verwendeten $k\text{-}u_{10}$ -Parametrisierungen des Gasaustausches. Werte in Klammern geben die Anzahl der betrachteten Datenpunkte an. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist $\geq 95\%$ . . . . .	98
4.15.	Abhängigkeit der Korrelation zwischen den gemessenen und den simulierten $p\text{CO}_2$ -Werten von der Trajektoriendauer. Die Zahlen in den Klammern geben die Anzahl der Trajektorien an, für die die jeweilige maximale Dauer gilt. Das Signifikanzniveau der Korrelationen ist $\geq 95\%$ . . . . .	99



# Tabellenverzeichnis

2.1.	Die Ansätze nach Wanninkhof (1992) und Nägler (2009) zur Ermittlung der Gasaustauschgeschwindigkeit aus der Windgeschwindigkeit	20
2.2.	Veröffentlichungen, die Gasaustauschgeschwindigkeiten auf Grundlage von Satellitenwindgeschwindigkeiten berechnen. Abkürzungen der $k$ - $u_{10}$ -Beziehungen beziehen sich auf ursprünglichen Veröffentlichungen: „LM86“: Liss u. Merlivat (1986), „N00“: Nightingale u. a. (2000), „WM99“: Wanninkhof u. McGillis (1999), „W92“: Wanninkhof (1992), „H06“: Ho u. a. (2006)	24
3.1.	Übersicht der Satellitenwindgeschwindigkeiten, die Abkürzungen $t$ , $w$ und $m$ stehen für täglich, wöchentlich und monatlich.	26
3.2.	Skalierungsfaktoren für die $k$ - $u_{10}$ -Beziehungen nach Gleichung 3.4, Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6. $w$ , $m$ und $t$ steht für die zeitlichen Auflösungen der Felder: wöchentlich, monatlich und täglich.	36
3.3.	Ableitung des Schwellwertes für $R$ basierend auf $Q = \frac{b_{\text{täglich}}}{b_{\text{monatlich}}} \cdot R$ , wie in Gleichung 3.10.	52
3.4.	Repräsentation der monatlichen Variabilität in den verschiedenen Läufen zur Berechnung des $\text{CO}_2$ -Flusses	62
3.5.	Prozentuale Anteile an der totalen Varianz des $\text{CO}_2$ -Flusses. Es wird unterschieden zwischen globalen und regionalen Nettoflüssen. Die zeitliche Variabilität wird entweder ausschließlich in den Feldern des Gasaustauschkoeffizienten ( $K$ ) oder in den Felder der $\text{CO}_2$ -Partialdruckdifferenz ( $\Delta p\text{CO}_2$ ) zugelassen. Es wird der Einfluss des angewendeten Windgeschwindigkeitsproduktes betrachtet	64
3.6.	Terme der totalen skalierten Varianz des $\text{CO}_2$ -Flusses, $var(F)^* = A + B + C + D$ , siehe Gleichung 3.7 und Gleichung 3.8 auf Seite 39.	66
4.1.	Anzahl der verwendeten SOCAT-Messungen	83
4.2.	Sensitivität von $p\text{CO}_2$ in Meerwasser gegenüber verschiedenen Parametern. Nach Tabelle 8.3.1 in Sarmiento u. Gruber (2006).	85

- 4.3. Anzahl der verwendeten Trajektorien pro Jahr. In der Summe stehen 239 Trajektorien für die Lagrange-Modellierung zur Verfügung. 88