

# Machbarkeitsstudie zur Bestimmung turbulenter Flüsse auf FS Polarstern im Rahmen von OCEANET

Diplomarbeit  
von  
**Michael Schlundt**

MATHEMATISCH - NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT DER  
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL  
ERSTELLT AM LEIBNIZ - INSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN  
FORSCHUNGSBEREICH 1  
- MARITIME METEOROLOGIE -



Kiel, Oktober 2009



# Inhaltsverzeichnis

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b>                             | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>2 Grundlagen</b>                                | <b>7</b>  |
| 2.1 Kreuzkorrelationsmethode . . . . .             | 7         |
| 2.2 Bulkparametrisierungen . . . . .               | 10        |
| 2.3 Dissipationsmethode . . . . .                  | 11        |
| 2.4 $CO_2$ -Fluss . . . . .                        | 15        |
| <b>3 Messgeräte</b>                                | <b>17</b> |
| 3.1 Ultraschallanemometer . . . . .                | 17        |
| 3.2 Absorptionshygrometer . . . . .                | 18        |
| 3.2.1 M100 . . . . .                               | 19        |
| 3.2.2 LiCor . . . . .                              | 20        |
| <b>4 Messungen auf FS Polarstern</b>               | <b>25</b> |
| 4.1 Expedition ANT XXIV-4 . . . . .                | 25        |
| 4.1.1 Fahrtverlauf und Wetterbedingungen . . . . . | 26        |
| 4.1.2 Messdaten . . . . .                          | 26        |
| 4.2 Expedition ANT XXV-5 . . . . .                 | 33        |
| 4.2.1 Fahrtverlauf und Wetterbedingungen . . . . . | 33        |
| 4.2.2 Messdaten . . . . .                          | 34        |
| <b>5 Ergebnisse</b>                                | <b>41</b> |
| 5.1 Turbulenzprogramm . . . . .                    | 41        |
| 5.2 Fluss fühlbarer und latenter Wärme . . . . .   | 42        |
| 5.2.1 Expedition ANT XXIV-4 . . . . .              | 42        |
| 5.2.2 Expedition ANT XXV-5 . . . . .               | 53        |
| 5.3 Dragkoeffizient und Impulsfluss . . . . .      | 64        |
| 5.3.1 Expedition ANT XXIV-4 . . . . .              | 64        |
| 5.3.2 Expedition ANT XXV-5 . . . . .               | 68        |

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| 5.4 $CO_2$ -Fluss . . . . .              | 74        |
| <b>6 Schlussbetrachtung und Ausblick</b> | <b>83</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>             | <b>85</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>               | <b>91</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>              | <b>93</b> |
| <b>Danksagung</b>                        | <b>97</b> |
| <b>Erklärung</b>                         | <b>99</b> |

# Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit behandelt die Möglichkeit und Machbarkeit der Messung von Parametern, die zur Herleitung turbulenter Flüsse dienen. Die Messungen wurden auf den beiden Polarsternexpeditionen ANT XXIV-4 im April/Mai 2008 und ANT XXV-5 im April/Mai 2009 durchgeführt. Die Berechnung der turbulenten Flüsse folgte aus gemessenen mittleren Größen mit Hilfe verschiedener Bulkparametrisierungen und aus Turbulenzmessungen mittels der Dissipationsmethode. Auf der Expedition ANT XXV-5 wurden zwei voneinander unabhängige Messsysteme, bestehend aus je einem Ultraschallanemometer und einem Hygrometer, an der Reling auf dem Peildeck und an der Reling auf dem Krähennest aufgebaut. Auf der ersten Fahrt wurde nur ein Ultraschallanemometer kombiniert mit zwei Hygrometern an der Reling auf dem Krähennest aufgebaut. Die Messungen auf dem Krähennest zeigten sehr gute Ergebnisse, gerade im Vergleich zwischen Parametrisierungen und Dissipationsmethode, obwohl die Höhe des Krähennestes mit knapp 30 Metern an der oberen Grenze der Prandtl-Schicht, in der die turbulenten Flüsse als höhenkonstant angenommen werden, liegt. Für den Fluss fühlbarer Wärme ist eine sehr gute Übereinstimmung mit der Parametrisierung von Smith (1980) bzw. Large und Pond (1982) zu erkennen. Beim Fluss latenter Wärme stimmen die Dissipationsergebnisse am besten mit der Parametrisierung von Smith (1988) überein. Dagegen ergaben sich aus den Messungen auf dem Peildeck, welches mit ca. 21 Metern Höhe deutlich niedriger liegt, Ergebnisse, welche verdeutlichen, dass diese Position für Turbulenzmessungen ungeeignet ist. Die Dissipationsergebnisse weichen fast durchgängig stark von den Bulkparametrisierungen und den Turbulenzmessungen auf dem Krähennest ab und es kommt zu Überschätzungen von über  $50 \text{ W/m}^2$  für den Fluss fühlbarer Wärme und von über  $300 \text{ W/m}^2$  für den Fluss latenter Wärme. Auch beim Impulsfluss, in dieser Arbeit durch den Dragkoeffizient gezeigt, wurden ähnliche Ergebnisse erzielt. Bei den Messungen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der Parametrisierung von Large und Pond (1981). Die Messungen auf dem Peildeck dagegen zeigen eine große Streuung. Das ist bedeutend für den Einsatz eines Messcontainers auf dem Peildeck, welcher im Rahmen des OCEANET-Projektes entwickelt wird und auch mit einem Turbulenzmesssystem ausgestattet werden soll. Diese Position hat sich für Turbulenzmessungen als ungeeignet erwiesen. Die Messungen auf dem Container sind allerdings ca. 3 Meter

höher als die Messungen auf dem Peildeck während der Fahrt ANT XXV-5, dies könnte eine weniger gestörte Anströmung begünstigen. Diese Messungen sollen auf der Polarsternfahrt ANT XXVI-1 durchgeführt werden, wobei auch dort wieder ein Vergleich mit dem alten Messsystem auf dem Krähennest durchgeführt werden soll. Auch bei den Messungen der  $CO_2$ -Konzentration und der dadurch resultierenden Bestimmung des  $CO_2$ -Flusses streuen die Ergebnisse der Fahrt ANT XXV-5 sehr stark. Es ist allerdings erwähnenswert, dass auch die alte Messposition des Licors, welches die  $CO_2$ -Konzentration misst, auf dem Krähennest, keine, im Vergleich zum Peildeck, besseren Ergebnisse hervorgebracht hat.

# Abstract

This diploma thesis examines the feasibility of measuring the parameters for deriving turbulent fluxes on the research vessel Polarstern. Measurements were taken on the Polarstern-cruises ANT XXIV-4 in April/May 2008 and ANT XXV-5 in April/May 2009. The turbulent fluxes are derived using measured mean quantities applying different bulk parametrizations and using the dissipation method with turbulence measurements. In contrast to the first expedition, where only one sonic-anemometer combined with two hygrometers was mounted on the railing, at the expedition ANT XXV-5 two independent measuring systems were mounted on the railing on the crow's nest and on the railing on the bearing deck, respectively. Measurements taken on the crow's nest show good results, especially when comparing parametrizations and dissipation method, although the height of the crow's nest is just under 30 m. This height is close to the upper limit of the Prandtl-layer, where the turbulent fluxes are assumed to be independent from height. The sensible heat fluxes from the dissipation method show good agreement with the parametrizations of Smith (1980) and Large und Pond (1982). The results for the latent heat flux using the dissipation method are in good agreement with the parametrization of Smith (1988). Contrarily, the results from the bearing deck, which is lower than the crow's nest, support the conclusion, that the bearing deck is not applicable for turbulence measurements. The dissipation results show almost continuously large differences to the bulk parametrizations and the turbulence measurements on the crow's nest. Overestimations of up to  $50 \text{ W/m}^2$  for the sensible heat flux and more than  $300 \text{ W/m}^2$  for the latent heat flux occur. Similar results are obtained for the momentum flux, represented by the drag coefficient in this thesis. Measurements agree well with the sonicanemometer USA-1 on the crow's nest and the parametrization of Large und Pond (1981). Results from the new sonic on the bearing deck exhibit a large spread. This is relevant for the container, which will be developed within the OCEANET-project and which is supposed to be equipped with a turbulence measuring system. This location is unfavorable and it will be interesting to see, whether the results will improve. However, they might improve because the measurements on the container will be approximately 3 m above the measurements on the bearing deck, thus the incident air flow might be less disturbed. They will be performed on the Polarstern cruise ANT XXVI-1 whereas a comparison with the

old measuring system on the crow's nest will be made.

Also the  $CO_2$ -measurements from the Licor during ANT XXV-5 and the concluding  $CO_2$ -fluxes spread strongly. It should be mentioned, that the old location of the Licor on the crow's nest did not show better results compared to the bearing deck.

# 1 Einleitung

Die Erde erhält ihre Energie zum größten Teil von der Sonne in Form von kurzwelliger Strahlung. Da die Erde selber eine absolute Temperatur verschieden von Null besitzt, gibt auch sie Energie in Form terrestrischer (zum größten Teil infraroter) Strahlung ab. Beide Strahlungsarten unterlaufen verschiedene physikalische Prozesse beim Passieren der Erdatmosphäre und dem Auftreffen auf der Oberfläche, wie z.B. Absorption, Reflektion und Transmission (Abb. 1.1). Die Energiebilanz zwischen Ozean und Atmosphäre wird im Rahmen des OCEANET-Projektes untersucht. Zur Untersuchung dieser Energiebilanz werden verschiedene Messgeräte verwendet, wie Wolkenkamera, Pyranometer, Pyrgeometer, Mikrowelle, welche jeweils die verschiedenen Parameter messen.

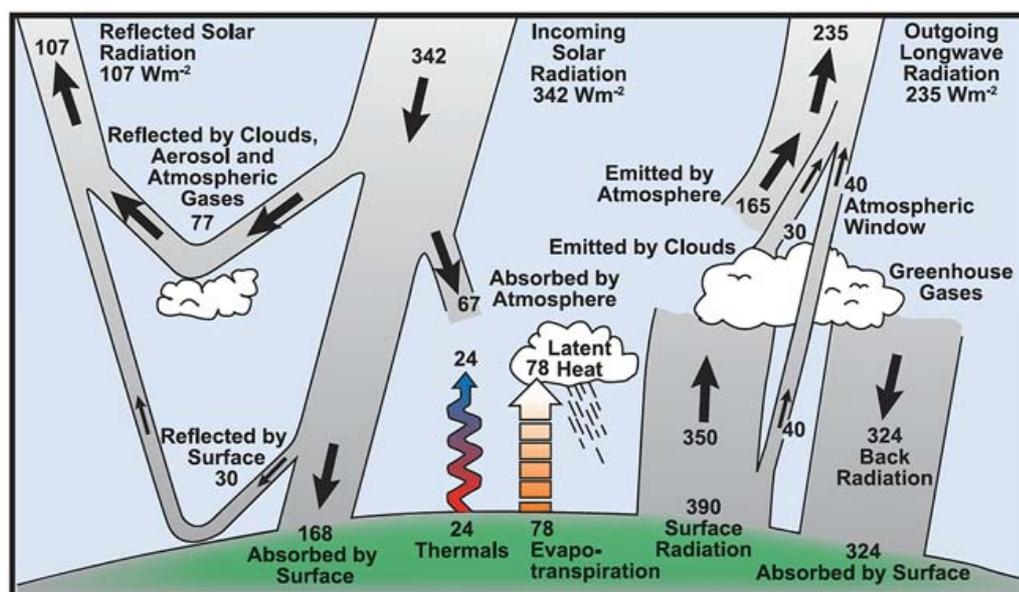


Abb. 1.1: Schema der Energiebilanz der Erde nach Kiehl und Trenberth (1997)

Beide Strahlungsflüsse müssen sich am Oberrand der Atmosphäre ausgleichen, da die Erde sich sonst permanent erwärmen oder abkühlen würde. Betrachtet man Bilanzen von kurzwelliger Sonnenstrahlung und langwelliger terrestrischer Strahlung, so ist zu erkennen, dass sie sich lokal nicht exakt ausgleichen, es also immer einen Überschuss einer Strahlungsform gibt. In der Regel gibt es einen Nettoüberschuss

am Boden und ein Defizit in der Atmosphäre. Für den Ausgleich vom Boden zur Atmosphäre ist ein weiterer Transport notwendig. Dieser geschieht über turbulente Wärmeflüsse, also den Fluss latenter und den Fluss fühlbarer Wärme. Außerdem existiert ein Impulstransport, welcher in der Regel von oben nach unten, also von der Atmosphäre zum Ozean gerichtet ist. Dieser ist ebenfalls ein turbulenter Fluss, welcher für die Impulsbilanz wichtig ist. Neben diesen Flüssen, die für die Energiebilanz der Erde wichtig sind, spielt auch der  $CO_2$ -Fluss eine immer wichtigere Rolle. Im Rahmen der gegenwärtigen Diskussionen um die Klimaerwärmung, vor allem verursacht durch das  $CO_2$ , ist die Fähigkeit des Ozeans,  $CO_2$  aufzunehmen, ein entscheidender Faktor. Der Austausch von Kohlendioxid zwischen Ozean und Atmosphäre wird durch den  $CO_2$ -Fluss beschrieben.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Messung von Flüssen auf dem Forschungsschiff Polarstern zu untersuchen. Die Standardmethode für die Berechnung der turbulenten Flüsse ist die Kreuzkorrelationsmethode, eine direkte Methode, die allerdings auf Schiffen sehr schwierig ist, da die Schiffsbewegungen sich mit den Schwankungen der turbulenten Messgrößen überlagern. Deswegen soll hier mit der sogenannten Dissipationsmethode, bei der die Flüsse aus den Energiespektren im Trägheitsunterbereich abgeleitet werden, gerechnet werden. Auch der  $CO_2$ -Fluss wird mit der Dissipationsmethode berechnet und anschließend, wie auch Wärmeflüsse und Impulsfluss, mit einer weiteren Methode, der Ableitung von Flüssen aus (Bulk-)parametrisierungen verglichen. Des Weiteren geht es allgemein um eine permanente Messung auf dem deutschen Forschungsschiff Polarstern. Dort soll ein Messcontainer aufgebaut werden, wobei ein Turbulenzmesssystem (Licor/Sonic) auf diesem Container installiert werden soll. Da der Container auf dem Peildeck anstatt auf dem Krähenest des Schiffes steht, die Turbulenzmessungen bei der ersten Erprobung allerdings auf dem Krähenest vorgenommen wurden, wurden auf der zweiten Fahrt zwei unterschiedliche Messpositionen gewählt. Zum einen das Krähenest und zum anderen das Peildeck, wo der Container seinen Platz finden wird. Da für die Turbulenzmessungen freie Anströmung unverzichtbar ist, sind die bisherigen Messungen auf dem Krähenest sehr vielversprechend. Im Gegensatz dazu sind die Bedingungen auf dem Peildeck wesentlich ungünstiger. Daher wurde ein Vergleich in dieser Arbeit vorgenommen. Es ist bekannt, dass die Polarstern für Turbulenzmessungen nicht ideal ist, da das Schiff groß und breit ist, und die freie Anströmung deswegen selten gewährleistet ist. Die Theorie der turbulenten Flüsse soll in Kapitel 2 vorgestellt werden. Es folgen die Kapitel 3 und 4 über die Messgeräte und die Messung der erforderlichen Parameter an Bord der Polarstern. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt und vor allem in Bezug auf die Position des Messcontainers diskutiert (Kapitel 5 und 6).

## 2 Grundlagen

Der Zustand der Turbulenz ist nur statistisch beschreibbar. Turbulenz selber beschreibt kleinskalige Wechselwirkungen an der Grenzfläche zwischen Ozean und Atmosphäre. Voraussetzung für die Messung sind also nahezu gleichbleibende Bedingungen über einen bestimmten Zeitraum (Stationarität) und horizontale Homogenität, d.h., dass an unterschiedlichen Punkten im Messfeld (nahezu) gleiche Bedingungen vorherrschen. Unter diesen Voraussetzungen gilt die Ähnlichkeitstheorie von Monin und Obukhov (1954), welche besagt, dass turbulente Bewegungen nur mechanisch/thermisch erzeugt werden, also nur von Reibung/Stabilität abhängen. Diese Bedingungen sind die Grundvoraussetzungen für die Turbulenztheorie, die in diesem Kapitel vorgestellt werden soll.

### 2.1 Kreuzkorrelationsmethode

Die Standardmethode zur Berechnung turbulenter Flüsse ist die sogenannte Kreuzkorrelationsmethode oder auch Reynoldsflussmethode.

Hier sind die turbulenten Flüsse sind definiert als:

Impulsfluss

$$\tau = -\overline{\rho u'w'}, \quad (2.1)$$

Fluss fühlbarer Wärme

$$H_S = \rho c_p \overline{w't'}, \quad (2.2)$$

Fluss latenter Wärme

$$H_L = \rho L_v \overline{w'q'}, \quad (2.3)$$

wobei  $\rho$  die mittlere Luftdichte,  $c_p$  die spezifische Wärme bei konstantem Druck und  $L_v$  die latente Verdunstungswärme sind. Außerdem wurde die Boussinesq-Approximation verwendet, welche beschreibt, dass kleine Dichteveränderungen vernachlässigt werden können, solange sie nicht in Auftriebstermen auftreten. Voraussetzung dafür ist,

dass die Größen wie folgt nach Reynolds zerlegt sind:  $\rho = \bar{\rho} + \rho'$ ,  $u = \bar{u} + u'$ ,  $v = \bar{v} + v'$  usw., wobei  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{u}$ , ... das zeitliche Mittel und  $\rho'$ ,  $u'$ , ... die Abweichung von diesem Mittel darstellt. Bei der Dichte  $\rho$  kann diese Aufteilung aber gerade vernachlässigt werden, und es gilt  $\rho = \bar{\rho}$ .

Man kann alle Turbulenzparameter durch die Größen:

Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}}$ , Messhöhe  $z$  und Monin-Obukhov-Länge  $L$  beschreiben. Die Monin-Obukhov-Länge (MO-Länge) stellt das Verhältnis von Scherung und Thermik dar.

Als Stabilitätsparameter ergibt sich:

$$\frac{z}{L} = \frac{\kappa z \frac{g}{\theta} H_S}{\rho c_p u_*^3}, \quad (2.4)$$

mit der Karman-Konstante<sup>1</sup>  $\kappa = 0,4$  und der potentiellen Temperatur  $\theta$  (in K).

Berücksichtigt man noch den Fluss latenter Wärme nach Panofsky und Dutton (1984), so ergibt sich:

$$\frac{z}{L} = \frac{\kappa z \frac{g}{\theta} H_S}{\rho c_p u_*^3} \left(1 + \frac{0,07}{Bow}\right), \quad (2.5)$$

mit der Bowen-Ratio

$$Bow = \frac{H_S}{L_v E} = \frac{H_S}{H_L}. \quad (2.6)$$

wobei  $E = \overline{\rho w'q'}$  der Wasserdampffluss ist.

Die Bowen-Ratio stellt das Verhältnis der Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme dar.

Per Definition sind die Flüsse über die vorher genannten Beziehungen mit den Monin-Obukhov-Skalenparametern verbunden. Gl. 2.1 wird somit zu:

$$\tau = -\overline{\rho u'w'} = \rho u_*^2. \quad (2.7)$$

Für den Fluss fühlbarer Wärme (Gl. 2.2) folgt:

$$H_S = \rho c_p \overline{w't'} = -\rho c_p u_* t_*, \quad (2.8)$$

und für den Fluss latenter Wärme:

$$H_L = \rho L_v \overline{w'q'} = -\rho L_v u_* q_*. \quad (2.9)$$

$u_*$  ist der Skalenparameter für die Geschwindigkeit,  $t_*$  für die Temperatur und  $q_*$  für die Feuchte.

---

<sup>1</sup>Die (von-)Karman-Konstante ist eine dimensionslose Konstante, die das logarithmische Windprofil einer turbulenten Strömung nahe eines Randes beschreibt.

Eine Erweiterung der Kreuzkorrelationsmethode ist die Herleitung der Flüsse aus Kospektren. Hierbei wird das Kospektrum von  $u$  und  $w$  über alle beteiligten Frequenzen integriert, wodurch man die Kovarianz erhält.

Ausgehend von der Kreuzkovarianzfunktion, welche, unter der Annahme von Stationarität kleinräumiger Prozesse, nur von der zeitlichen Verschiebung  $\tau$  abhängt (Báth (1974)):

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x'(t)y'(t + \tau) dt', \quad (2.10)$$

ist deren Fouriertransformierte das Kreuzkovarianzspektrum (in der Regel komplex) im Frequenzraum

$$P_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{xy}(\tau)e^{i2\pi f\tau} d\tau. \quad (2.11)$$

Die Kreuzkovarianzfunktion hat einen geraden Anteil

$$G_{xy}(\tau) = \frac{1}{2}(C_{xy}(\tau) + C_{xy}(-\tau)) \quad (2.12)$$

und einen ungeraden Anteil

$$U_{xy}(\tau) = \frac{1}{2}(C_{xy}(\tau) - C_{xy}(-\tau)). \quad (2.13)$$

Die Fouriertransformierten liefern das Kospektrum (Gl. 2.14) (gerader Anteil) und das Quadspektrum (Gl. 2.15) (ungerader Anteil)

$$Co(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} G_{xy} \cos(2\pi f\tau) d\tau, \quad (2.14)$$

$$Qu(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} U_{xy} \sin(2\pi f\tau) d\tau. \quad (2.15)$$

Das Kospektrum der vertikalen Windkomponente und einer anderen meteorologischen Größe (Temperatur, Feuchte oder horizontale Windkomponente) liefert den turbulenten Fluss.

Aus der Autokovarianz (Kreuzkovarianz mit sich selbst) erhält man das Energiespektrum.

Bei dieser Methode benötigt man sehr hoch aufgelöste Messungen und es sind nur Werte brauchbar, die innerhalb einer Stunde liegen, da sonst die Stationarität nicht mehr gewährleistet ist. Außerdem müssen die Schiffsbewegungen durch gleichzeitige Messungen der lokalen Beschleunigungen berücksichtigt werden. Dennoch bleibt die Ableitung der Flüsse aus Kospektren die Standardmethode, an der sich alle anderen Methoden orientieren.

## 2.2 Bulkparametrisierungen

Da in der Regel keine Turbulenzmessungen zur Verfügung stehen, versucht man die turbulenten Flüsse aus den meteorologischen Standardparametern abzuleiten, welche fast immer zur Verfügung stehen. Da die turbulenten Wärmeflüsse proportional zu den mittleren vertikalen Unterschieden der relevanten Größen sind, ergeben sich mit sogenannten Transportkoeffizienten als Proportionalitätsfaktor die Bulkparametrisierungen

für den Fluss fühlbarer Wärme:

$$H_S = -c_p \rho C_H \overline{\Delta \theta \bar{u}}, \quad (2.16)$$

und für den Fluss latenter Wärme:

$$H_L = -L_v \rho C_E \overline{\Delta q \bar{u}}. \quad (2.17)$$

Für den Impulsfluss erhält man:

$$\tau = \rho C_D \bar{u}^2 = \rho u_*^2. \quad (2.18)$$

Hierbei ist  $C_D$  der Transportkoeffizient für den Impulsfluss (Dragkoeffizient),  $C_H$  der Transportkoeffizient für den fühlbaren Wärmefluss (Stanton-Zahl) und  $C_E$  der Transportkoeffizient für den latenten Wärmefluss (Dalton-Zahl) (Large und Pond (1981)). Die Transportkoeffizienten erhält man durch den Vergleich der direkten Messungen der turbulenten Flüsse mit denen der gemittelten Größen. Sie sind stabilitätsabhängig, ändern sich daher mit der Temperaturdifferenz zwischen Ozean und Atmosphäre ( $\Delta\theta$ ), sind abhängig von der mittleren Windgeschwindigkeit und müssen deshalb in Abhängigkeit von  $\frac{z}{L}$  korrigiert werden. Dies geschieht durch den Wert in 10 m Höhe ( $z = 10$ ), da auch der Wind aus 10 m Höhe in die Messung eingeht.

Für den neutralen Dragkoeffizienten ergibt sich:

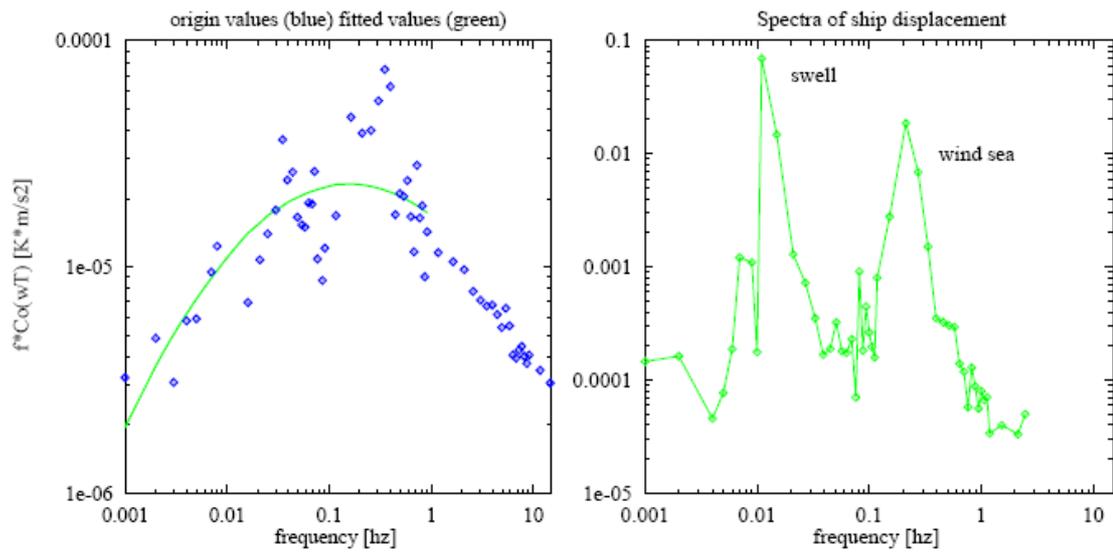
$$C_{Dn} = \kappa^2 / \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2, \quad (2.19)$$

für die neutrale Stanton-Zahl:

$$C_{Hn} = \kappa^2 / \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_t}\right) \right], \quad (2.20)$$

und für die neutrale Dalton-Zahl:

$$C_{En} = \kappa^2 / \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_q}\right) \right], \quad (2.21)$$



**Abb. 2.1:** Kospektrum vom Fluss fühlbarer Wärme (links) und Spektrum der Schiffsbewegungen (rechts).

mit den Rauigkeitslängen an der Oberfläche für Impuls ( $z_0$ ), Temperatur ( $z_t$ ) und Feuchte ( $z_q$ ) (Large und Pond, 1982).

Sieht man sich ein Kospektrum verglichen mit einem Spektrum der Schiffsbewegungen an (Abb. 2.1), so liegen sowohl Schiffsbewegungen als auch Messwerte im gleichen Frequenzbereich. Es gibt aber eine Methode, die Messwerte benutzt, welche aus dem höherfrequenten Bereich (Dissipationsbereich) des Spektrums sind und diese Methode wird deswegen Dissipationsmethode genannt.

## 2.3 Dissipationsmethode

Die Dissipationsmethode eignet sich vor allem für Messungen auf bewegten Körpern (Schiffe, Bojen). Die vertikale Windkomponente wird nicht explizit benötigt. Trotz dieser Vorteile ist die Dissipationsmethode in Fachkreisen sehr umstritten, z.B. bei Fairall und Larsen (1986). Vor allem die Annahme lokaler Isotropie führt zu kontroversen Diskussionen. Im Folgenden wird der theoretische Hintergrund dieser Methode vorgestellt.

Mit der turbulenten kinetischen Energie  $e$  pro Masseneinheit:

$$e = (u^2 + v^2 + w^2)/2, \quad (2.22)$$

unter der Annahme von Stationarität

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} \equiv 0 \quad (2.23)$$

und horizontaler Homogenität

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_k} = 0, \quad (2.24)$$

für  $k = 1, 2$ ,

geht man von der Bilanzgleichung der turbulenten kinetischen Energie aus:

$$\begin{aligned} 0 &= -\overline{u'w'} + g \frac{\overline{w'\theta'}}{\theta} \left(1 + \frac{0.07}{B_{ow}}\right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{w'p'}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{ew'}}{\partial z} - 15\nu \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)^2} \\ &= P + B + D_e + D_p + \varepsilon. \end{aligned} \quad (2.25)$$

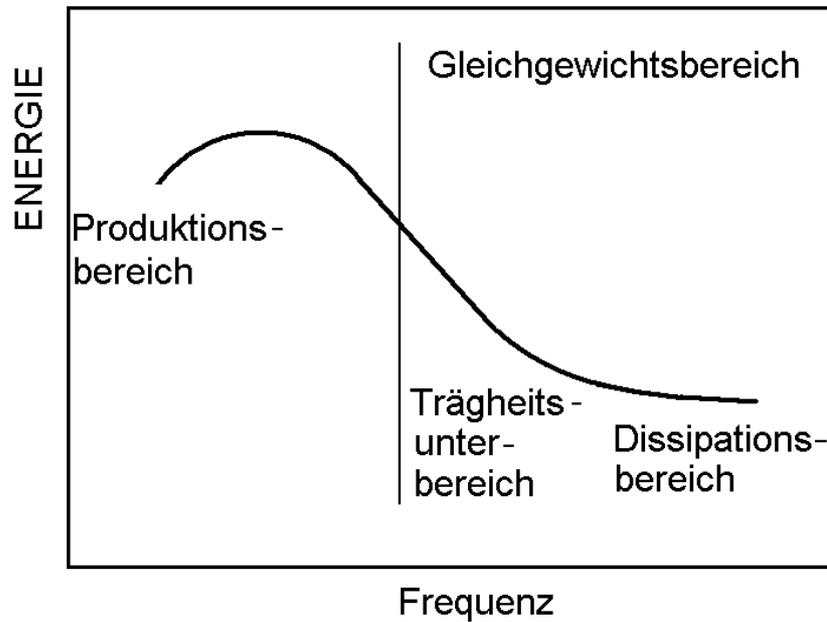
Die einzelnen Terme haben dabei folgende Bedeutung:

- $P$  : Umwandlung von kinetischer Energie der mittleren Strömung in turbulente kinetische Energie der longitudinalen Komponente durch vertikale Windscherung.
- $B$  : Umwandlung von potentieller Energie der Dichteschichtung in kinetische Energie der vertikalen turbulenten Komponente durch thermischen Auftrieb.
- $D_e$  : Divergenz des turbulenten Flusses kinetischer Energie.
- $D_p$  : Energietransfer zwischen turbulenten Komponenten durch Druck-Geschwindigkeitsfluktuation.
- $\varepsilon$  : Dissipation turbulenter kinetischer Energie durch viskose Reibungskräfte in Wärme.

Hierbei wurde wieder die Boussinesq-Approximation (s.o.) angenommen. Außerdem liegt ein kartesisches Koordinatensystem vor, in welchem die x-Achse in Richtung des mittleren Windes liegt. Die molekulare Reibung wird vernachlässigt.

Nach Normierung der einzelnen Terme mit  $\kappa z/u_*^3$ , Substitution von  $-\overline{u'w'}$  durch  $u_*^2$  (Definition der Schubspannungsgeschwindigkeit), Einführung der dimensionslosen Windscherung  $\phi_m(\frac{z}{L}) = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z}$  und dimensionslosen Dissipation  $\phi_\varepsilon(\frac{z}{L}) = \frac{\kappa z}{u_*^3} \varepsilon$ , erhält man die Bilanzgleichung (2.26) in dimensionsloser Form (vergl. Large und Pond (1982)):

$$0 = \phi_m\left(\frac{z}{L}\right) - \frac{z}{L} - D_e - D_p - \phi_\varepsilon\left(\frac{z}{L}\right). \quad (2.26)$$



**Abb. 2.2:** Schematische Darstellung eines Energiespektrums mit Einteilung in Bereiche.

Gleichsetzen der Terme und Vernachlässigung von  $D_e$  und  $D_p$  ((Large und Pond, 1981)) führt zu:

$$\frac{\varepsilon \kappa z}{u_*^3} = \phi_m\left(\frac{z}{L}\right) - \frac{z}{L}. \quad (2.27)$$

Analog erhält man mit den Dissipationsraten für Temperatur  $N_T$  und Feuchte  $N_q$  für die Bilanzgleichungen (u.a. Edson et al. (1991)):

$$\frac{N_T \kappa z}{u_*^3} = \phi_h\left(\frac{z}{L}\right) \quad (2.28)$$

und

$$\frac{N_q \kappa z}{u_*^3} = \phi_w\left(\frac{z}{L}\right), \quad (2.29)$$

mit den dimensionslosen Gradientenfunktionen für den Fluss fühlbarer  $\phi_h\left(\frac{z}{L}\right)$  und den Fluss latenter Wärme  $\phi_w\left(\frac{z}{L}\right)$  (Dyer, 1974).

In einer turbulenten Strömung (hohe Reynoldszahl<sup>2</sup>) lassen sich Energiespektren in folgende Bereiche einteilen (Abb. 2.2):

<sup>2</sup>Die Reynoldszahl (nach Osborne Reynolds) gibt an ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Je höher die Reynoldszahl, desto turbulenter ist die Strömung.

- Produktionsbereich  
Hier wird die Energie bei anisotropen Verhältnissen aus der mittleren Bewegung in turbulente Bewegung umgewandelt.
- Trägheitsunterbereich  
Trägheitskräfte transferieren die Energie von großen zu immer kleineren Wirbeln, wobei Druck-Geschwindigkeitsfluktuationen für lokal isotrope Verhältnisse sorgen.
- Dissipationsbereich  
In diesem Bereich wird die Energie aufgrund von Viskosität dissipiert, wobei die Spektren bei der Wellenlänge  $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}$  (Kolmogoroff-Mikroskala) stark abfallen.

Für dreidimensionale Geschwindigkeitsspektren gilt (nach Kolmogoroff):

$$S(k) = a\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}, \quad (2.30)$$

bei lokaler Isotropie (z.B. Hinze (1959) oder Wucknitz (1978)):

$$S_u(k) = a\varepsilon^{2/3}k^{-5/3} = S(k) \quad (2.31)$$

und

$$S_w(k) = \frac{4}{3}S_u(k), \quad (2.32)$$

wobei  $k$  die Wellenzahl darstellt.

Zur Festlegung des Frequenzbereiches muss also überprüft werden, ob das Verhältnis der Spektren von horizontaler ( $S_u$ ) und vertikaler Windkomponente ( $S_w$ )

$$S_w : S_u = 4 : 3 \quad (2.33)$$

entspricht, und ob die Spektren im Trägheitsunterbereich proportional zu  $k^{-5/3}$  abfallen (vergl. z.B. Bumke et al. (2002)).

Mit Taylors Prinzip der "eingefrorenen" Turbulenz, welches die Annahme beinhaltet, dass an einem Punkt gemessene Zeitserien als räumliche Turbulenz angesehen werden können, d.h. die Wirbel mit der mittleren Windgeschwindigkeit ohne Veränderung transportiert werden:

$$kS(k) = fS(f), \quad (2.34)$$

und

$$f = \bar{u}k, \quad (2.35)$$

erhält man die Spektraldichten im Trägheitsunterbereich:

$$S_u(f) = a(2\pi)^{2/3}\varepsilon^{2/3}f^{-5/3}\left(\frac{\bar{u}}{2\pi}\right)^{2/3}, \quad (2.36)$$

$$S_w(f) = \frac{4}{3}a(2\pi)^{2/3}\varepsilon^{2/3}f^{-5/3}\left(\frac{\bar{u}}{2\pi}\right)^{2/3}. \quad (2.37)$$

Das führt zur Dissipationsrate

$$\varepsilon = \left(\frac{S_u(f)}{a(2\pi)^{2/3}}f^{5/3}\right)^{3/2}\frac{2\pi}{\bar{u}}. \quad (2.38)$$

Als Schubspannungsgeschwindigkeit erhält man mit Gl. (2.27):

$$u_*^2 = \left(\frac{2\pi\kappa z}{\bar{u}}\right)^{2/3}\left(\frac{S_u(f)}{a(2\pi)^{2/3}}f^{5/3}\right)\left(\phi_\varepsilon\left(\frac{z}{L}\right)\right)^{-2/3}. \quad (2.39)$$

Mit Dissipationsrate ( $N_T$  bzw.  $N_q$ ), Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  und dimensionslosen Gradientenfunktionen ( $\phi_h$  bzw.  $\phi_w$ ) lassen sich die Skalenparameter für die Wärmeflüsse ( $t_*$  bzw.  $q_*$ ) berechnen (Gln. (2.28) und (2.29)) und dadurch die Flüsse mit den Gleichungen (2.7) - (2.9).

Problematisch ist, dass die Monin-Obukhov-Länge  $L$  selber von der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  abhängt. Um dieses Problem zu lösen, gibt es zwei Möglichkeiten. Die erste ist die Berechnung von  $u_*$  über eine Bulkparametrisierung und daraus die Herleitung der Monin-Obukhov-Länge (z.B. bei Large und Pond (1982)). Diese Methode wird Dissipations-Bulk-Algorithmus (DB) genannt und ist die weitaus robustere Methode im Vergleich mit der zweiten Methode, welche Dissipations-Dissipations-Algorithmus (DD) genannt wird. Dort werden die Flüsse vom Sonicanemometer benutzt, um  $u_*$  iterativ zu bestimmen. Dabei wird  $u_*$  dadurch berechnet, dass es immer wieder selbst in die Berechnung der MO-Länge eingesetzt wird, bis es konvergiert (vergl. Dupuis et al. (1997) oder auch Bumke et al. (2002)).

## 2.4 $CO_2$ -Fluss

Die Berechnung des  $CO_2$ -Flusses mit der Dissipationsmethode geschieht analog zur Berechnung des Flusses fühlbarer Wärme in Kapitel 2.3. Nur dass die entscheidende Größe jetzt nicht mehr die Feuchte ist, sondern die  $CO_2$ -Konzentration. Für die Flüsse aus den Parametrisierungen wird analog zu den Bulkparametrisierungen vorgegangen. Der  $CO_2$ -Fluss ist definiert durch:

$$F_{CO_2} = k\Delta_{pCO_2} \quad (2.40)$$

mit  $\Delta_{pCO_2} = pCO_2^{oze} - pCO_2^{atm}$ .

$\Delta_{pCO_2}$  ist die Differenz von der  $CO_2$ -Konzentration im Ozean  $pCO_2^{oze}$  und der Atmosphäre  $pCO_2^{atm}$ .  $k$  ist der Transportkoeffizient.

Der Transportkoeffizient  $k$  ist abhängig von der Windgeschwindigkeit  $u$  und der

Schmidt-Nummer  $Sc$ , welche wiederum das Verhältnis von dynamischer Viskosität  $\nu$  und Massendiffusivität  $D$  beschreibt:

$$Sc = \frac{\nu}{D}. \quad (2.41)$$

Der Zusammenhang wird zum Beispiel von Wanninkhof (1992) sehr gut beschrieben, deswegen soll an dieser Stelle darauf verwiesen werden.

## 3 Messgeräte

Zur Bestimmung der turbulenten Flüsse sind hochaufgelöste Daten von Wind, Temperatur und Feuchte notwendig. Im Rahmen der zwei Polarsternexpeditionen ANT-XXIV/4 (Macke, 2009) und ANT-XXV/5 (Kapitel 4.2) sind die Daten, welche in dieser Arbeit verwendet wurden, aufgezeichnet worden. Zur Bestimmung der Windkomponenten und der Temperatur dienen zwei von der Funktionsweise identische Ultraschallanemometer (Sonic) und zur Messung der Feuchte zwei Absorptionshygrometer, welche in diesem Kapitel im Einzelnen vorgestellt werden sollen.

### 3.1 Ultraschallanemometer



**Abb. 3.1:** *Ultraschallanemometer Sonic USA-1 auf dem Krähennest.*

Die Ultraschallanemometer USA-1 der Firma METEK<sup>1</sup> (Abbildungen. 3.1 und 3.2) dienen der hochfrequenten Messung aller 3 Windkomponenten ( $u, v, w$ ) und der Temperatur. Das Messprinzip besteht aus Laufzeitmessungen von Ultraschall (20 kHz bis 1 GHz), wobei der Wind die Laufzeiten beeinflusst. Das Anemometer besteht aus 6 Wandlern, welche jeweils  $45^\circ$  zur Horizontalen versetzt sind. Zwei Wandler stehen

---

<sup>1</sup>METEK GmbH, Fritz-Straßmann-Straße 4, 25337 Elmshorn, Deutschland

sich dabei immer gegenüber. Ein Wandler ist immer abwechselnd Sender und Empfänger. Der Ultraschallimpuls wird vom Sender in Richtung Empfänger geschickt, danach dreht sich die Richtung um, und der Sender wird zum Empfänger respektive der Empfänger zum Sender. Aufgrund des Abstandes der Wandler (17-18 cm) und der Schallgeschwindigkeit bei 20°C Lufttemperatur (343 m/s) sind theoretisch bis an die 200 Impulse pro Sekunde möglich.

Mit den Laufzeiten aus Hin- und Rückrichtung können nun Windgeschwindigkeit und Temperatur berechnet werden. Subtrahiert man die beiden Laufzeiten voneinander bleibt nur der "radiale" Wind übrig, welcher die Projektionen des wahren Windes auf die Messstrecken darstellt. Man erhält für jede Laufstrecke eine Komponente, welche zusammen den 3d-Windvektor bilden.

Bei der Addition der Laufzeiten bleibt die "akustische" Temperatur, ein Skalar, als einzige Größe übrig. Diese ist eine Funktion von Druck und Feuchte und kann auf Meeresniveau als virtuelle Temperatur angesehen werden. Diese ist i.d.R. höher als die tatsächliche Temperatur, da sie die Temperatur darstellt, welche trockene Luft bei gleicher Dichte und gleichem Volumen hätte.

Bei denen in dieser Arbeit verwendeten Messungen haben beide Anemometer jeweils mit 30 Hz gemessen.



**Abb. 3.2:** *Ultraschallanemometer auf dem Peildeck während ANT XXV-5.*

## 3.2 Absorptionshygrometer

Zur Bestimmung der absoluten Feuchte der Luft, welche eine entscheidende Größe beim Fluss latenter Wärme ist, wurden zwei Absorptionshygrometer benutzt, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.



Abb. 3.3: M100 auf dem Krähennest während ANT XXV-5.

### 3.2.1 M100

Das M100-Absorptionshygrometer (im folgenden kurz: M100) (Abb. 3.3) ist ein Infrarothygrometer, welches auf der Transmission und Absorption von infrarotem Licht durch Wasserdampf beruht. Es misst die absolute Feuchte (in  $gm^{-3}$ ) mit einer Frequenz von 10 Hz. Der Aufbau besteht aus einem Lichtquellengehäuse und einem Detektorgehäuse, welche auf der Fahrt ANT XXV-5 aus Platzgründen horizontal zueinander ausgerichtet waren, im Gegensatz zur vertikalen Ausrichtung auf früheren Fahrten. Beide Gehäuse sind an einem Arm festgemacht. Die Lichtquelle ist ein Wolframfaden, dessen Licht von einem Chopperrad, welches sich mit 2400 U/min dreht, auf 400 Hz moduliert wird. Des Weiteren sind auf dem Rad zwei Filter aufgebaut, welche die beiden Wellenlängen ( $2,5 \mu m$  und  $2,6 \mu m$ ) herausfiltern. Nach Aussenden des Lichtstrahls und Passieren der feuchten Luft wird der Lichtstrahl auf der anderen Seite detektiert. Das Gerät rechnet daraufhin das empfangene Signal in die absolute Feuchte um. Der mathematische Hintergrund dieser Berechnung wird im Folgenden erklärt.

Die gesendeten und empfangenen Signale stellen jeweils eine Strahldichte<sup>2</sup> dar und die Änderung dieser, beim Passieren eines Mediums (in der Regel die Erdatmosphäre), wird durch die Strahlungstransportgleichung (Gl. 3.1) beschrieben.

$$\frac{dF(\lambda)}{dz} = -(\kappa + \sigma)F(\lambda) + j \quad (3.1)$$

<sup>2</sup>Die Strahldichte ist die Strahlungsenergie  $dQ$ , welche pro Zeiteinheit  $dt$  durch ein Flächenelement  $dA$  unter einem Zenithwinkel  $\theta$  in einer vorgegebenen Richtung in ein Raumwinkelement  $d\Omega$  geht oder von ihr kommt:  $F = \frac{d^3Q}{dt dA d\Omega \cos\theta}$  ( $[F] = \frac{W}{m^2 sr}$ )

Werden Streuprozesse ( $-\sigma F$ ) und Emission ( $j$ ) vernachlässigt, so vereinfacht sich Gl. (3.1) zu:

$$\frac{dF(\lambda)}{dz} = -\kappa F(\lambda). \quad (3.2)$$

Diese Differentialgleichung ist im monochromatischen Fall durch Variablentrennung sofort zu lösen und man erhält mit  $\kappa = a\rho$  und nach Integration von  $z = 0$  bis  $z = l$  das Beer-Lambert-Bouguer-Gesetz:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \exp(-a\rho l), \quad (3.3)$$

wobei  $F(\lambda)$  die empfangene Strahldichte am Detektor darstellt,  $F_0(\lambda)$  die Ausgangsstrahldichte an der Lichtquelle,  $a = a(\lambda)$  den Absorptionskoeffizienten als Funktion der Wellenlänge,  $\rho$  die Gasdichte und  $l$  die Weglänge (15 cm). Das M100 benutzt zwei Wellenlängen (2,5  $\mu\text{m}$  und 2,6  $\mu\text{m}$ ), eine zentriert im Absorptionsband des Wasserstoffs und eine Referenzwellenlänge, welche in einem Band zentriert liegt, in dem Wasserstoff nicht absorbiert. Zum Teil wird auch bei dieser Wellenlänge absorbiert, der Anteil der Absorption kann allerdings vernachlässigt werden. Normiert man die Absorptionswellenlänge mit der Referenzwellenlänge, so werden Umgebungseffekte minimiert und man erhält die Transmissivität:

$$\tau_i = \frac{F(A)}{F(R)} = b \exp(-a_A \rho_\nu l) \quad (3.4)$$

und daraus die Absorptivität:

$$\alpha_i = 1 - \tau_i = 1 - b \exp(-a_A \rho_\nu l), \quad (3.5)$$

mit  $F(A)$  als Strahldichte im Absorptionsband,  $F(R)$  als Strahldichte im Referenzband, und  $b$  als das Verhältnis der beiden Ausgangsstrahldichten im Absorptions- und im Referenzband. Die Konstanten  $a_A$  und  $b$  sind empirisch ermittelt und  $l$  ist die feste Weglänge zwischen Lichtquelle und -detektor. Die Absorptivität ist jetzt nur noch eine Funktion der Gasdichte, nach welcher man die Gleichung umstellen kann, um den Wert der Gasdichte (= absoluter Feuchte) zu bestimmen.

Die gemessenen Daten werden direkt auf dem Computer gespeichert, welcher mit der Datenbox des M100 verbunden ist.

## 3.2.2 LiCor

### 3.2.2.1 Sensor für $H_2O$

Das Licor-Absorptionshygrometer LI-7500 (im folgenden kurz: Licor) (Abb. 3.4) misst die Absorption von infrarotem Licht an Wasserdampfmolekülen. Das Prinzip



**Abb. 3.4:** LI-7500-Absorptionshygrometer (Licor).

ist ähnlich dem des M100. Die Absorption eines beliebigen Gases ( $\alpha_i$ ) wird beschrieben durch

$$\alpha_i = 1 - \tau_i = 1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_0}, \quad (3.6)$$

wobei  $\tau_i$  die Transmission,  $\Phi_i$  den transmittierten Strahlungsfluss<sup>3</sup> im Absorptionsband mit bestimmter Konzentration darstellt und  $\Phi_0$  den transmittierten Strahlungsfluss im Absorptionsband ohne Konzentration des Gases (in diesem Fall Wasserstoff) darstellt. Das Gerät selber approximiert die Absorption zu

$$\alpha_i = \left(1 - \frac{A_i}{A_{i0}}\right), \quad (3.7)$$

mit  $A_i$  als Leistung, welche den Detektor in einer absorbierenden Wellenlänge erreicht.  $A_{i0}$  ist die Leistung in einer Referenzwellenlänge, in welcher das Gas kein Licht absorbiert.  $A_i$  und  $A_{i0}$  werden abwechselnd 152-mal pro Sekunde gemessen. Diese Gleichung wird jetzt benutzt um mit Hilfe der Absorption die Teilchendichte des jeweiligen Gases zu berechnen. Ausgehend vom Skalierungsgesetz von Jaimeson et al. (1963):

$$\frac{\alpha_i}{P_{ei}} = h_i \left(\frac{u_i}{P_{ei}}\right), \quad (3.8)$$

welches den Druckeffekt auf infrarote Absorption beschreibt, erhalten wir mit Einführung der Weglänge  $\lambda$  ( $u_i = \rho_i \lambda$ ):

$$\rho_i = \frac{P_{ei}}{\lambda} h_i^{-1} \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}}\right) \quad (3.9)$$

bzw. nach Kombination von  $\lambda$  und  $h$  zu  $f$ :

$$\rho_i = P_{ei} f_i \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}}\right). \quad (3.10)$$

---

<sup>3</sup>Der Strahlungsfluss ist die Strahlungsenergie  $dQ$  pro Zeiteinheit  $dt$ :  $\Phi = \frac{dQ}{dt}$  ( $[\Phi] = W$ )

Mit Einsetzen der Absorption folgt:

$$\rho_i = P_{ei} f_i \left( \left[ 1 - \frac{A_i}{A_{i0}} z_i \right] \frac{S_i}{P_{ei}} \right). \quad (3.11)$$

$z_i$  bezeichnet man als Nullterm und  $S_i$  ist ein Term, der die Messspanne beschreibt. Da der Detektor des Licor sowohl Wasserdampf als auch  $CO_2$  misst, entsteht eine Querempfindlichkeit (= Cross-Sensitivity), welche folgendermaßen beschrieben wird:

$$\alpha_i = \left( 1 - \left[ \frac{A_i}{A_{i0}} + X_{ij} \left( 1 - \frac{A_j}{A_{j0}} \right) \right] \right), \quad (3.12)$$

mit  $X_{ij}$  als Cross-Sensitivity-Antwort von Gas  $j$  auf Gas  $i$ . Daraus folgt:

$$\rho_i = P_{ei} f_i \left( \left[ 1 - \frac{A_i}{A_{i0}} + X_{ij} \left[ 1 - \frac{A_j}{A_{j0}} \right] z_i \right] \frac{S_i}{P_{ei}} \right). \quad (3.13)$$

Aufgrund der Materialeigenschaft ist der Detektor abhängig von Temperaturänderungen, welches von der Software allerdings selber korrigiert wird. Als Nullterm haben wir

$$z_i = Z_{i0} + Z_i V_d, \quad (3.14)$$

mit der Kühlerspannung  $V_d$ ,  $Z_i$  als Anstieg im Zusammenhang zwischen  $V_d$  und  $z_i$  und dem Nullfaktor  $Z_{i0}$ .

Für den Wasserdampf ergibt sich als Absorption

$$\alpha_w = \left( 1 - \left[ \frac{A_w}{A_{w0}} + X_{cw} \left( 1 - \frac{A_c}{A_{c0}} \right) \right] (Z_{w0} + Z_w V_d) \right) \quad (3.15)$$

und daraus als Teilchendichte

$$\rho_w = P f_w \left( \frac{\alpha_w S_w}{P} \right), \quad (3.16)$$

wobei  $f_w$  ein Polynom dritter Ordnung ist.  $P$  beschreibt in diesem Fall den totalen Luftdruck, da die Absorption durch Wasserdampf kaum von anderen Gasen beeinflusst wird. Dadurch gilt

$$P_{ew} = P, \quad (3.17)$$

daher ist der effektive Druck für Wasserdampf gleich dem totalen Druck.

### 3.2.2.2 Sensor für $CO_2$

Das Licor misst auch die Absorption von Licht durch  $CO_2$ -Moleküle. Das Messprinzip ist identisch zu dem des Wasserdampfes und als Absorption erhalten wir

$$\alpha_c = \left( 1 - \left[ \frac{A_c}{A_{c0}} + X_{wc} \left( 1 - \frac{A_w}{A_{w0}} \right) \right] (Z_{c0} + Z_c V_d) \right). \quad (3.18)$$

Die Absorption des  $CO_2$  ist durch viele andere Gase beeinflusst ( $O_2$ ,  $H_2O$ ). Somit ist der effektive Druck nicht gleich dem totalen Druck wie beim Wasserdampf. Besonders die Konzentration von Wasserdampf muss in die Berechnung mit eingezogen werden. Eine Möglichkeit ist z.B.:

$$P_{ec} = P\Psi(m_w), \quad (3.19)$$

mit  $\Psi(m_w) = 1 + (a_w - 1)m_w$ .

$m_w$  ist der Molbruch des Wasserdampfes und  $a_w$  ist eine Konstante, die auf den Wert 1,15 für das Licor bestimmt wurde.

Es ergibt sich für die Teilchendichte von  $CO_2$ :

$$\rho_c = P_{ec}f_c\left(\frac{\alpha_c S_c}{P_{ec}}\right). \quad (3.20)$$

Dabei entspricht  $f_c$  einem Polynom 5. Ordnung.

In der Kontrollbox des Licor befindet sich auch ein Thermistor zur Messung der Temperatur und ein Luftdruckmesser. Beide Größen werden in der gleichen Frequenz (10 Hz) wie die Wasserdampf- bzw.  $CO_2$ -Dichte gemessen. Alle Daten (Licor und Kontrollbox) werden in einer Speicherbox (BlueBox) aufgezeichnet und können dort mit dem Computer heruntergeladen werden. Desweiteren wird über einen GPS-Empfänger die aktuelle Position aufgezeichnet.



## 4 Messungen auf FS Polarstern

Für die Berechnung der turbulenten Flüsse wurden zwei umfangreiche Datensätze, welche beide an Bord des deutschen Forschungseisbrechers Polarstern aufgezeichnet wurden, verwendet. Beide Fahrten waren Transfers von Punta Arenas (Chile) nach Bremerhaven (Deutschland), jeweils im Frühjahr 2008 (ANT XXIV-4) bzw. 2009 (ANT XXV-5). In Abb. 4.1 sind die jeweiligen Fahrtrouten der beiden Fahrten dargestellt.

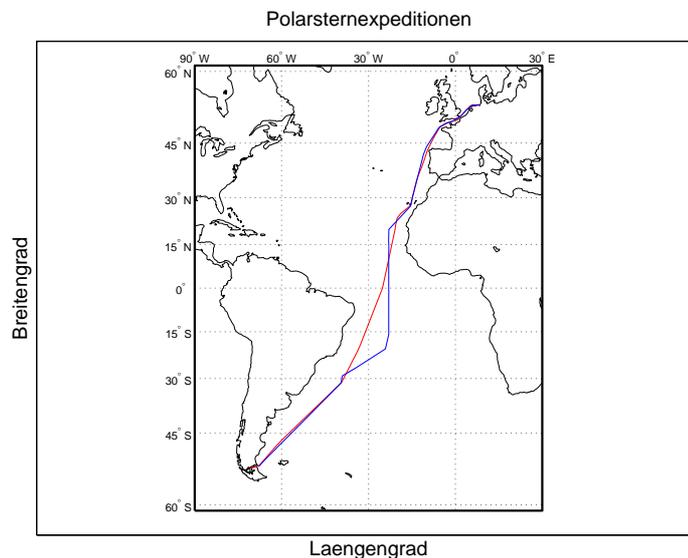


Abb. 4.1: Kursplot von ANT XXIV-4 (rot) und ANT XXV-5 (blau)

### 4.1 Expedition ANT XXIV-4

Erstmalig bestand auf dem Atlantiktransfer (ANT XXIV-4) im Frühjahr 2008 (18.04.-20.05.) die Möglichkeit, die für die Turbulenzmessungen erforderlichen Geräte (Kapitel 3) auf der Polarstern zu installieren. Zunächst sollen der Verlauf der Fahrt und die herrschenden Wetterbedingungen kurz erläutert werden.

### 4.1.1 Fahrtverlauf und Wetterbedingungen

Die Reise begann am 18. April abends (Ortszeit) bei Zwischenhocheinfluss. Bereits am nächsten Tag kam die Polarstern in den Bereich eines starken Tiefs mit Zentrum westlich der Antarktischen Halbinsel. Die nachfolgenden Tage wurden noch durch Ausläufer dieses Tiefs bestimmt, wobei der Wind stark nachließ. Nach kurzem Hocheinfluß erreichte am 25. April erneut ein Tief die Polarstern, mit Winden bis zu Windstärke 7. Mit fortlaufender Fahrt in Richtung Norden erreichte die Polarstern das Gebiet des Subtropenhochs. Allerdings war die vertikale Schichtung bis zum 29. April weiterhin instabil. In der Zeit vom 30. April bis zum 3. Mai durchquerte die Polarstern das Regime der Südostpassate mit nahezu konstanter Windstärke von 4 bis 5. Danach folgte die Querung der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ). Hierbei wurden nur sporadisch Gebiete mit typischen Verhältnissen für die äquatoriale Tiefdruckrinne berührt, d.h. es traten nur vereinzelt Schauer auf. Die Hauptkonvektionsgebiete lagen im Golf von Guinea.

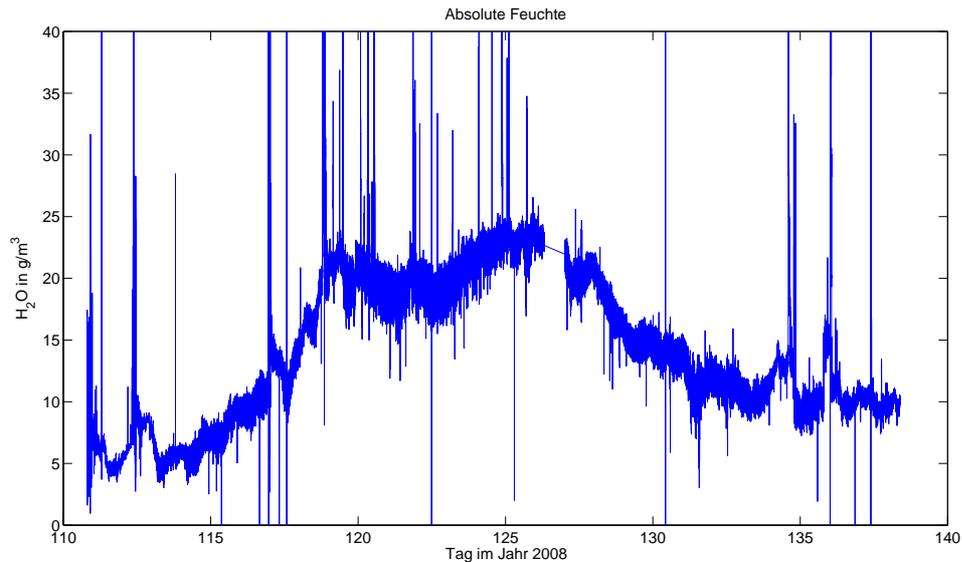
Vom 7. bis 11.05. durchquerte die Polarstern das Gebiet der Nordostpassate mit Windstärke 5, teilweise 6. Das Zentrum des Subtropenhochs lag südwestlich der Azoren mit Bewegungsrichtung Madeira. Am 11. April wurde in der Nähe der Kanaren das Phänomen der Karman-Wirbelstraße beobachtet.

Am 12. April wurde Las Palmas erreicht und in den darauffolgenden Tagen gelangte man in den Einfluß eines Hochs, wobei am Nachmittag des 13. Aprils die Kaltfront eines schwachen Tiefs aus der Biskaya passiert wurde. Dieses Tief bewegte sich am 14. und 15. April von der Biskaya langsam ostwärts. Das Druckfeld eines langgezogenen Tiefs von Spanien bis zum Baltischen Raum bestimmte die Reise durch die Biskaya und den Englischen Kanal (16.-18.05.), wobei am 18.05. eine südwärts ziehende Kaltfront durchquert wurde, was zu einem sprunghaften Anstieg der Windgeschwindigkeit führte. In der Nordsee gelangte die Polarstern zum Abschluß ihrer Forschungsfahrt in Nordwindeinfluß, welcher von einem über der Nordsee liegenden Hoch verursacht wurde. Unter diesen Wetterbedingungen erreichte die Polarstern am 20.05. Bremerhaven. (Macke (2009))

### 4.1.2 Messdaten

Für die Messungen auf ANT XXIV-4 wurden das Sonicanemometer USA-1, das M100 und das Licor verwendet (Kap. 3). Alle Geräte wurden auf dem Krähenest in ca. 28 m Höhe angebracht. Das Sonicanemometer misst mit einer Frequenz von 30 Hz kontinuierlich die 3 Windkomponenten und die Temperatur. Sowohl das M100 als auch das Licor messen die absolute Feuchte mit einer Frequenz von 10 Hz. Des Weiteren misst das Licor Druck und Temperatur, welche letztendlich für die Berechnungen der  $CO_2$ -Konzentration benötigt werden (s. Abschnitt 3.2.2.2). In Abb.

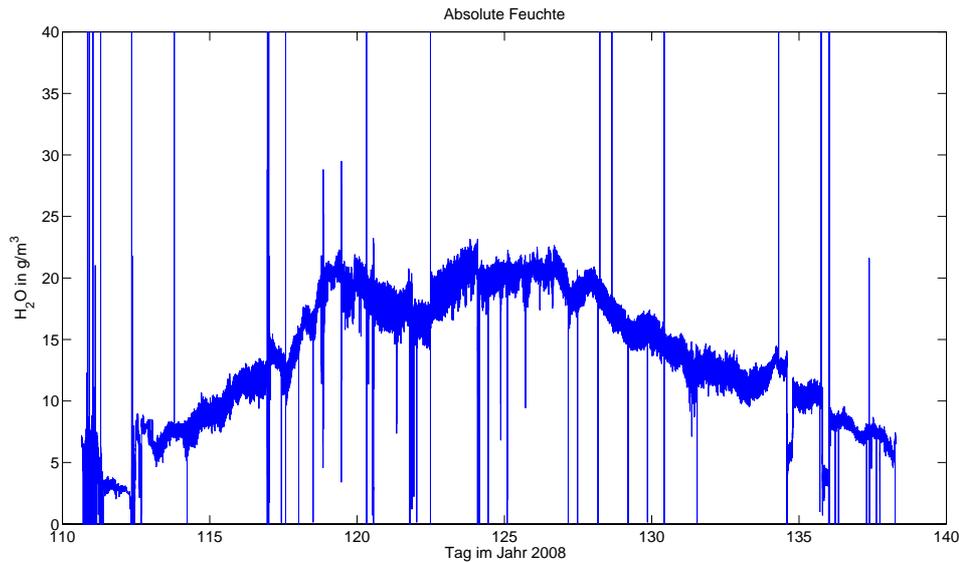
4.2 sind die Originaldaten der absoluten Feuchte des M100 dargestellt und in Abb. 4.3 die absolute Feuchte des Licors. Es ist zu sehen, dass die Zeitserie des M100 durch vereinzelte Ausreißer gestört ist, der Verlauf der absoluten Feuchte allerdings der Erwartung entspricht, mit einem Maximum in den Tropen und einem Abfall mit wachsenden Breitengraden auf beiden Hemisphären. Die Datenlücke an Tag 126 (05.05.09) ergab sich durch eine notwendige Messunterbrechung zum Zweck der Datensicherung.



**Abb. 4.2:** Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem M100, angebracht am Krähenest.

Die absolute Feuchte des Licors folgt ebenfalls diesem Verlauf. Wie beim M100 ist die Zeitserie auch beim Licor durch vereinzelte Ausreißer geprägt, was bei beiden Geräten verschiedene Ursachen haben kann. Der Einfluss von Gischt ist aufgrund der Höhe der Meßgeräte auf dem Krähenest höchst wahrscheinlich gering. So bleiben als weitere Störfaktoren Niederschlagsereignisse (hauptsächlich Regen) und Einflüsse von Menschenhand, wie z.B. durch das Abwischen der Sensoren.

Um mit den Daten weiter arbeiten zu können wurden verschiedene Untersuchungen vorgenommen. Zuerst wurden die Daten geglättet, d.h. es wurden Mittelwerte ausgerechnet und Werte, welche weiter als die vierfache Standardabweichung vom Mittelwert abweichen, wurden durch den Mittelwert ersetzt. Diese Vorgehensweise wurde für beide Feuchtedatensätze (M100 und Licor) vorgenommen. In Abb. 4.4 sind beide geglätteten Datensätze zusammen mit den Daten von der Bordwetterwarte dargestellt. Die Daten der Bordwetterwarte liegen in minütlicher Auflösung vor und werden ebenfalls am Krähenest, also in knapp 30 m Höhe, gemessen. Sie



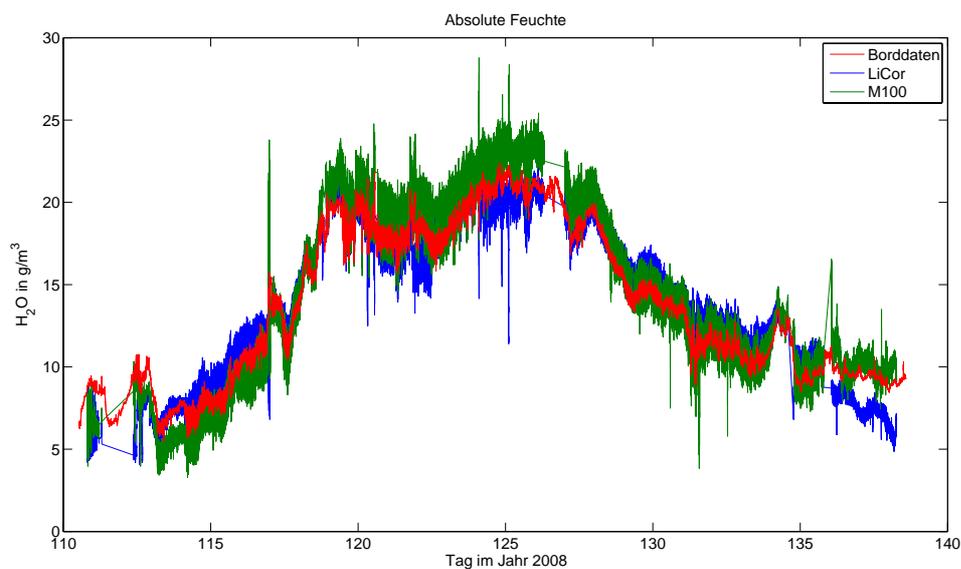
**Abb. 4.3:** Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem Licor, angebracht am Krähenest.

sollen des Weiteren als Referenzwerte dienen.

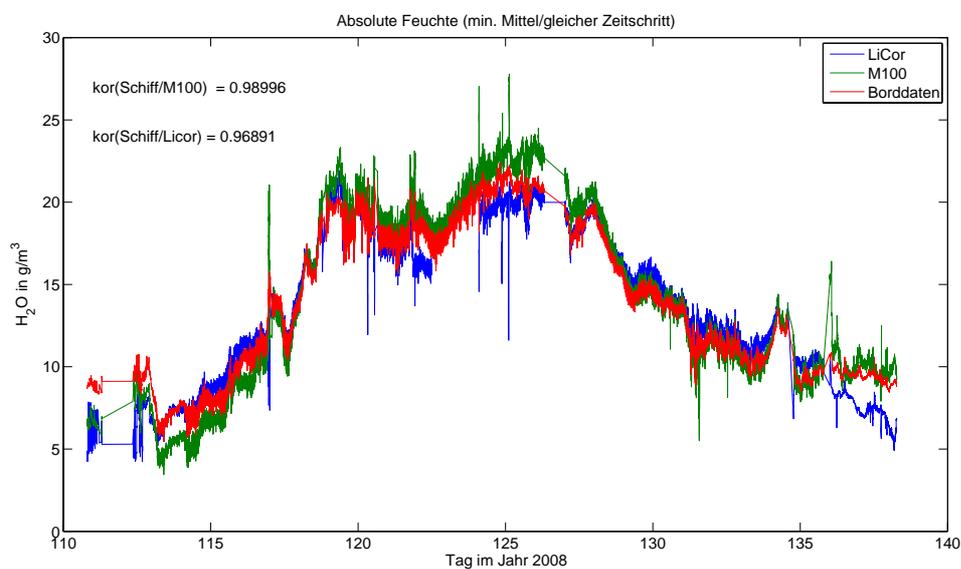
Um die Daten der Wetterwarte als Referenz verwenden zu können wurden die Daten vom M100 und vom Licor minütlich gemittelt und schließlich auf die gleichen Zeitschritte mit der Bordwetterwarte gebracht. Die Zeitreihen dieser Daten sind in Abb. 4.5 dargestellt.

Auffällig ist beim Vergleich der Zeitreihen der absoluten Feuchten, dass es Zeiträume gibt, in denen das Licor systematisch von den anderen Messgeräten abzuweichen scheint. Das passiert zum einen um den Tag 122 (01.05.08) und zum anderen ab Tag 135 (14.05.08) bis zum Ende der Messungen. Um den 01.05.08 bewegte sich die Polarstern im Einflußbereich der Südostpassate, wobei es hier keine besonderen Wettererscheinungen gegeben hat, welche diesen systematischen Fehler erklären könnten. Auch am Ende der Fahrt wurden verschiedene Wettererscheinungen passiert, aber auch hier kann das Abweichen nicht mit dem Wetter erklärt werden. Insgesamt stimmen die drei Zeitreihen der absoluten Feuchte nichts desto trotz sehr gut überein, was an den Korrelationen von  $r(\text{Schiff}/\text{M100})=0,98996$  bzw.  $r(\text{Schiff}/\text{Licor})=0,96891$  zu erkennen ist.

Zum Anpassen an die Borddaten sind in Abb. 4.6 Streuplots der absoluten Feuchten des jeweiligen Messgeräts mit den Borddaten dargestellt. Ebenfalls in den Bildern ist die lineare Abweichung zu sehen, mit welcher die Feuchtwerte beim Berechnen des Flusses fühlbarer Wärme korrigiert wurden. Tab. 4.1 listet den Anstieg und den Achsenabschnitt auf. Die verschiedenen Farben der Datenpunkte stellen die Stabi-



**Abb. 4.4:** Geglättete absolute Feuchten des M100 (grün) und des Licor (blau) und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot), alle auf dem Krähenest gemessen.

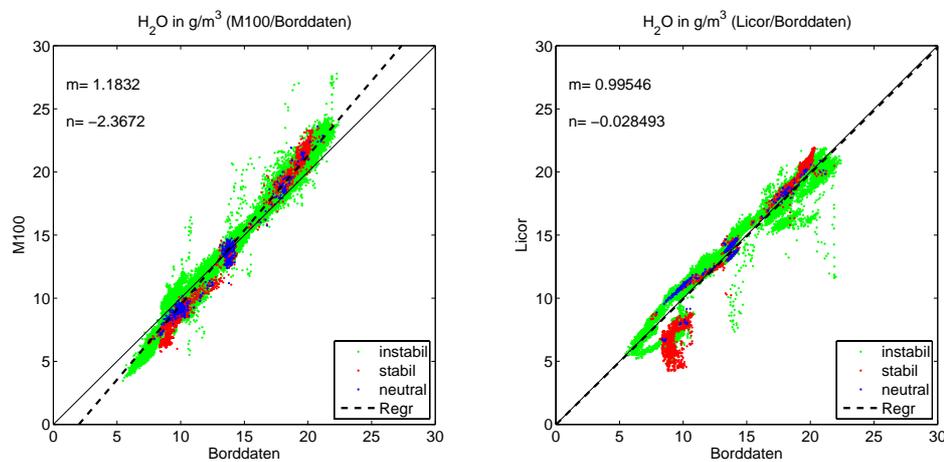


**Abb. 4.5:** Auf dem Krähenest gemessene, minutlich gemittelte und auf den gleichen Zeitschritt gebrachte absolute Feuchten des M100 (grün) und des Licor (blau) und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot).

| Messgerät                       | M100    | Licor     |
|---------------------------------|---------|-----------|
| Anstieg $m$                     | 1.1832  | 0.99546   |
| Achsenabschnitt $n$ ( $g/m^3$ ) | -2.3672 | -0.028493 |

**Tab. 4.1:** Korrekturwerte der absoluten Feuchten verglichen mit den Borddaten

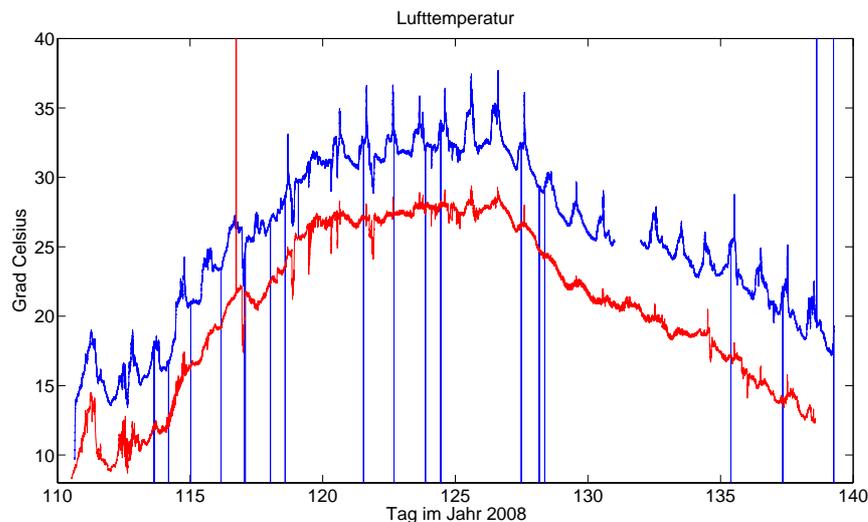
litätsverhältnisse (vergl. Gln. 2.4 bzw. 2.5) zum jeweiligen Zeitpunkt dar. Instabile Bedingungen sind grün, stabile Bedingungen blau und neutrale Bedingungen rot dargestellt. Der Grund dieser Unterscheidung war eine anfängliche Vermutung, dass die Stabilität, welche die Höhe der Prandtl-Schicht beeinflusst, einen Einfluß auf das Abweichen der Messwerte zu höheren bzw. niedrigeren Werten hat. Dieses ist hier nicht zu erkennen und wurde deswegen nicht weiter verfolgt.



**Abb. 4.6:** Streuplots der in Abb. 4.5 gezeigten Daten von M100 (links) und Licor (rechts) mit den Schiffsdaten unter verschiedenen Stabilitätsbedingungen: instabil (grün), stabil (blau) und neutral (rot)

In Abb. 4.7 ist die mit dem Licor gemessene Temperatur dargestellt. Es sind ebenfalls Ausreißer zu erkennen, welche sich allerdings nicht mit denen der Feuchte decken. Die Temperatur wird nicht am Messgerät selber gemessen, sondern in der dazugehörigen Kontrollbox. Diese ist nahezu verschlossen und es ist zu vermuten, dass die gemessenen Werte höher sind als die tatsächlichen, da sich die Box bei länger andauernder Sonnenbestrahlung aufheizt. Vermutlich gleichen sich die Werte nachts an, da die solare Einstrahlung nicht vorhanden ist. Hierbei ist aber ein systematischer Fehler zu vermuten, da alle Werte allgemein höher sind als die Borddaten, welche aber sonst den gleichen Verlauf zeigen. Die Temperaturen sind wichtig um

die gemessenen  $CO_2$ -Daten später in die Einheit eines Millionstel Mol (*ppm* bzw.  $\mu atm$ ) umzurechnen. Theoretisch wäre auch ein Vergleich mit den Temperaturen des Sonic sinnvoll. Diese Messwerte stellen allerdings, wie in Kapitel 3 beschrieben, die virtuelle Temperatur dar, welche also von der Feuchte abhängt. Die Temperaturen der Bordanlage sind wahre Temperaturen und somit ist ein Vergleich, gerade bei hohen Feuchten, nicht sehr aussagekräftig. Auch auf den Vergleich der Windwerte des Sonic USA-1 mit den Bordwerten wurde verzichtet, da sich die Messpositionen um mehrere Meter Höhe unterscheiden (Bordmessungen auf der Spitze des Turms) und die Schalenanemometer der Bordanlage so nicht mehr in der turbulenten Schicht liegen.

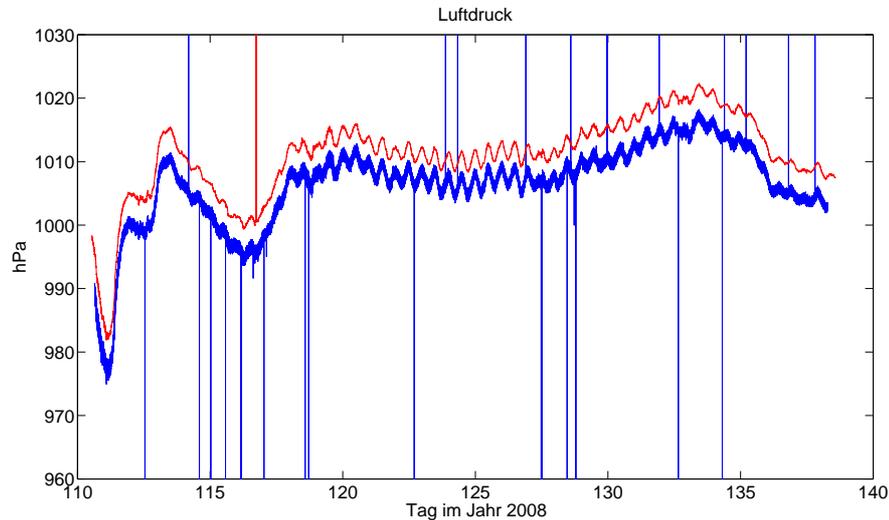


**Abb. 4.7:** Originaldaten der Lufttemperatur gemessen mit dem Licor (blau) und Borddaten (rot).

Bei den Originaldaten des Luftdrucks (Abb. 4.8) sind ähnlich wie bei der Temperatur geringfügig Ausreißer zu erkennen. Auch diese Daten werden für Umrechnungen in andere Einheiten, sowohl bei der  $H_2O$ -Konzentration als auch bei der  $CO_2$ -Konzentration, gebraucht. Wie oben erwähnt werden die Luftdruckdaten, wie alle anderen Daten auch, auf der Höhe des Krähenneests gemessen. Dadurch sind die Daten durchgängig niedriger als die auf Bodenniveau korrigierten Borddaten. Bei einem Höhenunterschied von 28 Metern sollte der Bias ca. 3,5 hPa betragen<sup>1</sup>. Tatsächlich sind es 4,55 hPa. Also haben die Messungen vom Licor auch hier einen systematischen Fehler von ca. einem Hektopascal. Die Genauigkeit der Druckmessungen wird vom Hersteller mit 1 % (ca. 10 hPa) angegeben. Somit liegt die gemessene systematische Abweichung innerhalb des gültigen Fehlerintervalls. Diese Höhendifferenz wird im nachfolgend verwendeten Turbulenzprogramm allerdings korrigiert.

<sup>1</sup>Barometrische Höhenstufe: 1 hPa/8m.

Insgesamt sind die Bord- und Licordaten aber sehr ähnlich. erinnert man sich an den Wetterverlauf während der Fahrt (Kap. 4.1.1), so erkennt man den Verlauf von Druckgebilden ziemlich gut wieder.



**Abb. 4.8:** Originaldaten des Luftdrucks gemessen mit dem Licor (blau) und Borddaten (rot).

In Abb. 4.9 ist die  $CO_2$ -Konzentration in  $mg/m^3$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die  $CO_2$ -Konzentration, welche ebenfalls durch das Licor gemessen wird, durch Ausreißer dominiert wird. Diese Ausreißer treten nicht wie bei den anderen Parametern vereinzelt auf, sondern streckenweise werden sogar über längere Zeiträume Werte gemessen, die schon aufgrund der Größenordnung unrealistisch sind. Die vorher beschriebenen Einflüsse (Regen, Säuberungen,...) können nicht allein Grund dafür sein.

Generell sind die Messungen der verschiedenen Parameter auf dem Krähennest auf der Fahrt ANT XXIV-4 durchaus als zufriedenstellend zu bezeichnen. So zeigen beide Hygrometer eine gute Übereinstimmung der absoluten Feuchten mit den Messungen der Bordanlage. Probleme traten prinzipiell durch Ausreißer auf, besonders bei der  $CO_2$ -Konzentration aber auch alle anderen Messgrößen sind davon betroffen. Dieses Problem ist insbesondere bei den Licor-Daten zu sehen, bei denen in allen Parametern systematische Fehler auftreten.

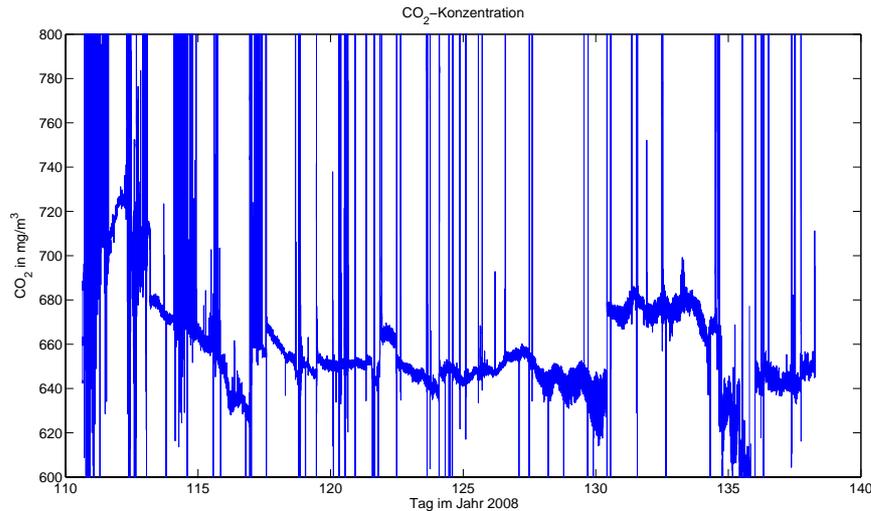


Abb. 4.9: Originaldaten der CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen mit dem Licor

## 4.2 Expedition ANT XXV-5

Im Rahmen des OCEANET-Projektes bestand auch im Frühjahr 2009 (12.04.-24.05.) während des Atlantiktransfers (ANT XXV-5) von Punta Arenas (Chile) nach Bremerhaven (Deutschland) die Möglichkeit, umfangreiche Messungen an Bord von FS Polarstern vorzunehmen. Zur Ausrüstung gehörten alle in Kapitel 3 beschriebenen Geräte. Zunächst soll wieder eine kurze Zusammenfassung der Fahrt und des Wetters erfolgen.

### 4.2.1 Fahrtverlauf und Wetterbedingungen

Am 11.04.2009 startete die Forschungsfahrt von Punta Arenas über den Atlantik nach Bremerhaven. Die Wetterlage war geprägt durch ein Sturmtief über der Drake-Passage, in dessen Rückseite die Polarstern nach Verlassen der Magellan-Straße gelangte. Zeitweise wurden Windstärken von 9 bis 10 erreicht. Dieses ausgeprägte Tiefdruckgebiet bestimmte die Wetterlage mit antarktischer Kaltluft für die nächsten Tage, bis auf ein kleines Zwischenhoch in der Nähe der La Plata-Mündung vor Brasilien. Am 17.04. passierte das Frontensystem die Route der Polarstern, wobei kräftige Gewitter zu beobachten waren. Das Wetter auf der Fahrt wurde durch die südliche Kaltluftströmung mehr als eine Woche lang geprägt. Dabei kam es immer wieder zu Störungen, wovon sich eine vor der brasilianischen Küste zu einem Sturmtief weiterentwickelte. In der Zeit vom 22.04. bis zum 29.04. blieb Polarstern im Einzugsbereich dieses Tiefs, wobei die Windrichtung von südöstlichen Richtun-

gen dominiert wurde. Danach kam Polarstern in den Einfluss des Subtropenhochs und des schwachen Südostpassates, bis am 04.05. ein südlicher Ast der ITCZ erreicht wurde. Erste starke konvektive Entwicklungen wurden bei etwa 2° S beobachtet, wobei die Hauptkonvektionsgebiete, wie im vorherigen Jahr, im Golf von Guinea vor der afrikanischen Küste beheimatet waren. Am 08.05. wurde das Gebiet der Nordostpassate erreicht und es herrschte kontinuierlich eine Nord-/Nordostströmung mit Windstärke 4 bis 6. Bei Annähern an die Kanarischen Inseln frischte der Wind zeitweise auf 6 bis 7, in Böen auf 8 auf. Nach dem Zwischenstopp in Las Palmas (14. Mai), wo die Polarstern im Tagesverlauf in der Nähe der Insel Gran Canaria blieb, wurde das Druckfeld durch das kräftige Azorenhoch und ein Tiefdruckgebiet über den Britischen Inseln bestimmt. Dabei kam es zu vereinzelt Kaltluftvorstößen und auffrischenden Winden an der Südostflanke des Hochs mit Windstärken 6 bis 7. Danach ließ der Wind, weiter aus nordöstlichen Richtungen kommend, nach, nur bei Kaltfrontdurchzügen frischte er etwas auf. Das Tiefdruckgebiet schwächte sich in den folgenden Tagen etwas ab und ein Hochdruckkeil des Azorenhochs Richtung Zentraleuropa bestimmte das weitere Reisewetter. Anfangs dominierten westliche, später südliche Windrichtungen. Nach Passieren des Eingangs des Englischen Kanals bei schwachen südlichen Winden, dominierte der Einfluss des Hochdruckkeils die weitere (ruhige) Fahrt bis Bremerhaven.<sup>2</sup>

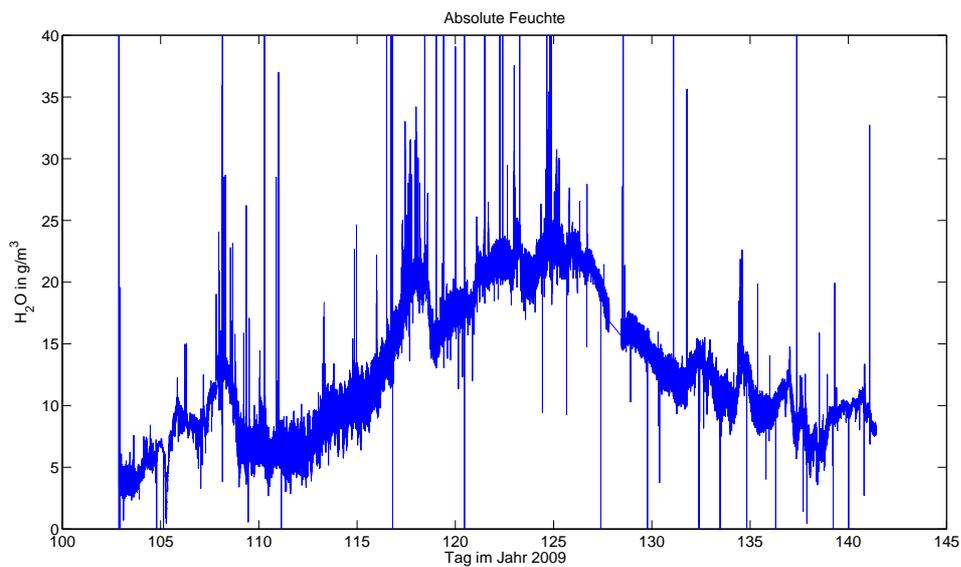
#### 4.2.2 Messdaten

Das Sonicanemometer USA-1 und das M100 wurden dabei erneut an der Reling am Krähenest angebracht, und zwar an der Vorderseite leicht nach Steuerbord verschoben. Für alle verwendeten Windwerte ( $\pm 60^\circ$  zur Schiffslängsachse) ist die freie Anströmung gewährleistet. Anemometer und M100-Hygrometer sind einigermaßen in gleicher Höhe angebracht. In Abb. 4.10 ist die absolute Feuchte dargestellt, welche mit dem M100 gemessen wurde. Das neue Sonicanemometer und der Licor-Sensor sind auf dem Peildeck in Richtung Bug aufgebaut worden. Aufgrund vieler Aufbauten (Container, große Antenne, Schiffsaufbauten) auf dem Peildeck war auch hier eine bessere Position nicht möglich. Eine freie Anströmung von vorn ( $\pm 60^\circ$  zur Schiffslängsachse) sollte auch hier gewährleistet sein. Die Geräte sind auf gleicher Höhe angebracht und stehen in einem relativ spitzen Winkel zueinander, um sich gegenseitig nicht zu behindern. Die absolute Feuchte des Licors ist in Abb. 4.11 dargestellt. Auffällig sind die vielen Ausreißer.

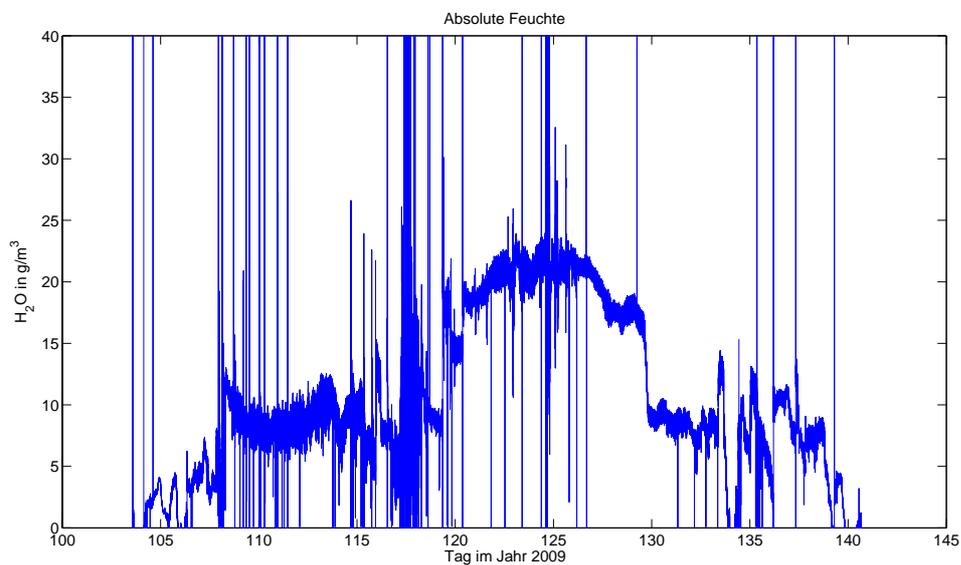
Auch diese Daten wurden wieder den gleichen Vereinfachungen und Untersuchun-

---

<sup>2</sup>Quelle: Bordwetterwarte FS Polarstern; Bericht über die Reise ANT XXV-5; Autoren: Heinz-Günther Hill, Hartmut Sonnabend;  
Pers. Kontakt mit Edmund Knuth vom Deutschen Wetterdienst (DWD)

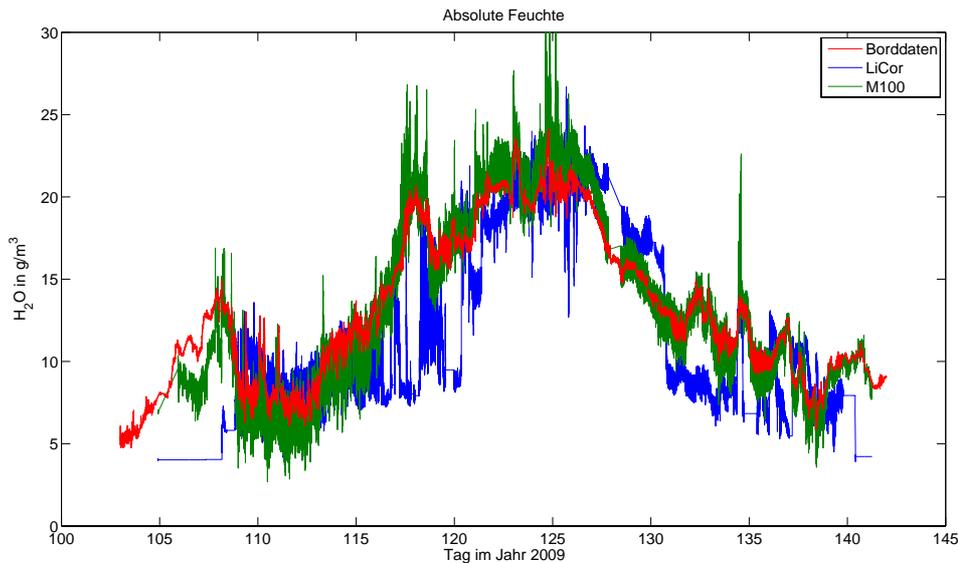


**Abb. 4.10:** Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem M100 auf dem Krähenest.



**Abb. 4.11:** Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem Licor auf dem Peildeck.

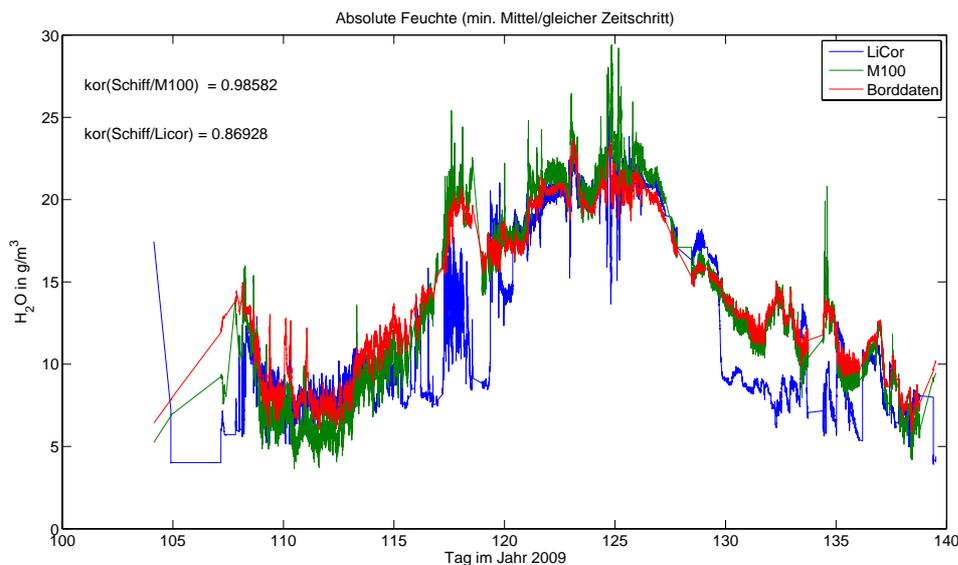
gen unterzogen, wie schon beim ersten Datensatz (vgl. Kapitel 4.1.2). Zuerst wurden wieder die Mittelwerte bestimmt und Werte, welche mehr als die vierfache Standardabweichung vom Mittelwert entfernt sind, durch den Mittelwert ersetzt. Der Mittelwert selber ist dabei als fließendes Mittel zu sehen, welcher sich den Daten anpasst. Dadurch wird vermieden, dass Werte eliminiert werden, welche richtig sind, aber aufgrund der großen natürlichen Amplitude der absoluten Feuchte nicht innerhalb der vierfachen Standardabweichung liegen. (Abb. 4.12)



**Abb. 4.12:** Geglättete absolute Feuchten des M100 (grün) auf dem Krähennest und des Licor (blau) auf dem Peildeck und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot), ebenfalls auf dem Krähennest.

Danach wurden erneut die minütlichen Mittelwerte genommen, damit sie mit den Daten der Bordwetterwarte vergleichbar sind. Es wurden nur die Daten verwendet, die den gleichen Zeitschritt besitzen. Die Karenz hierbei betrug - wie schon 2008 - ein Millionstel eines Tages ( $10^{-6}$ ), demnach ca. eine Zehntel Sekunde (Abb. 4.13).

Auffallend ist auch auf der Reise 2009, dass das Licor teilweise sehr stark von den Messwerten der beiden anderen Geräte abweicht. Große Unterschiede sieht man zwischen Tag 115 (25.04.09) und 120 (30.04.09) zum Einen und zum Anderen zwischen Tag 130 (10.05.09) und 136 (16.05.09). Im ersten Zeitraum war die Polarstern in leichtem Tiefdruckeinfluss, wobei allerdings wenig Niederschlagsereignisse registriert wurden. Während des zweiten Zeitraums scheinen sich die Messwerte kurzzeitig denen der anderen Messgeräte anzugleichen, was interessanterweise genau an dem Tag passiert, an dem die Polarstern in Las Palmas angelegt hatte (14.04.09). Allgemein spricht die Korrelation zwischen Licordaten und Bordanlage



**Abb. 4.13:** Minütlich gemittelte und auf den gleichen Zeitschritt gebrachte absolute Feuchten des M100 (grün) auf dem Krähennest und des Licor (blau) auf dem Peildeck und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot), ebenfalls auf dem Krähennest.

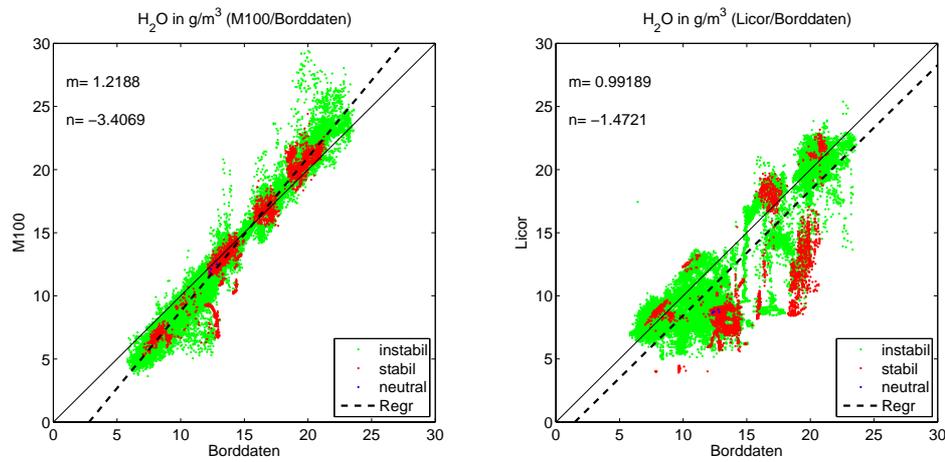
| Messgerät                     | M100    | Licor   |
|-------------------------------|---------|---------|
| Anstieg m                     | 1.2188  | 0.99189 |
| Achsenabschnitt n ( $g/m^3$ ) | -3.4069 | -1.4721 |

**Tab. 4.2:** Korrekturwerte der absoluten Feuchten verglichen mit den Borddaten

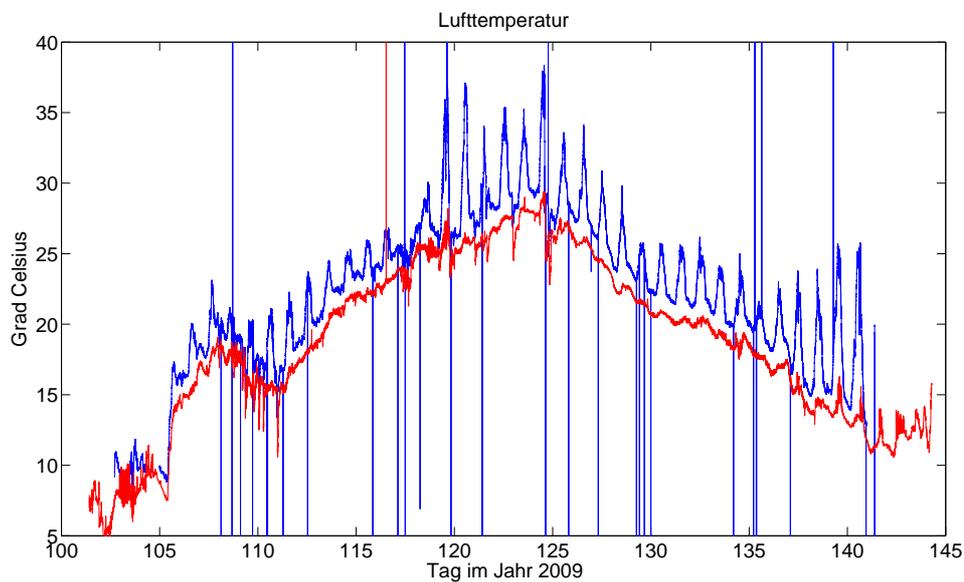
( $r(\text{Schiff/Licor})=0.86928$ ) trotzdem für eine gute Vergleichbarkeit dieser Datensätze. Die Korrelation zwischen M100 und Bordanlage ist, wie schon 2008, außerordentlich hoch ( $r(\text{Schiff/M100})=0.98528$ ).

Genau wie ein Jahr zuvor wurden nun mit Streuplots (Abb. 4.14) die linearen Zusammenhänge zwischen den Feuchtedaten untersucht und die resultierenden linearen Glieder bestimmt, mit welchen später die Feuchtedaten für die Berechnung der turbulenten Flüsse korrigiert wurden. Die Parameter sind in Tab. 4.2 der besseren Übersichtlichkeit wegen dargestellt. Auffällig ist bei den Licor-Feuchten die wesentlich breitere Streuung der Werte, die nach Abb. 4.13 schon zu vermuten war.

Auch die Zeitserien von Temperatur (Abb. 4.15), Luftdruck (Abb. 4.16) und  $CO_2$ -Konzentration (Abb. 4.17) sind dargestellt. Die Kurve der Lufttemperatur ist erneut durch vereinzelte Ausreißer geprägt, folgt insgesamt aber dem beschriebenen Wetterverlauf und ist z.B. auch gut mit dem Druckverlauf vergleichbar. Sehr gut ist auch der Tagesgang der Temperatur zu erkennen. Wie schon bei der ersten Fahrt sind die Temperaturen des Licor insgesamt wieder höher als die der Bordanlage, welches für

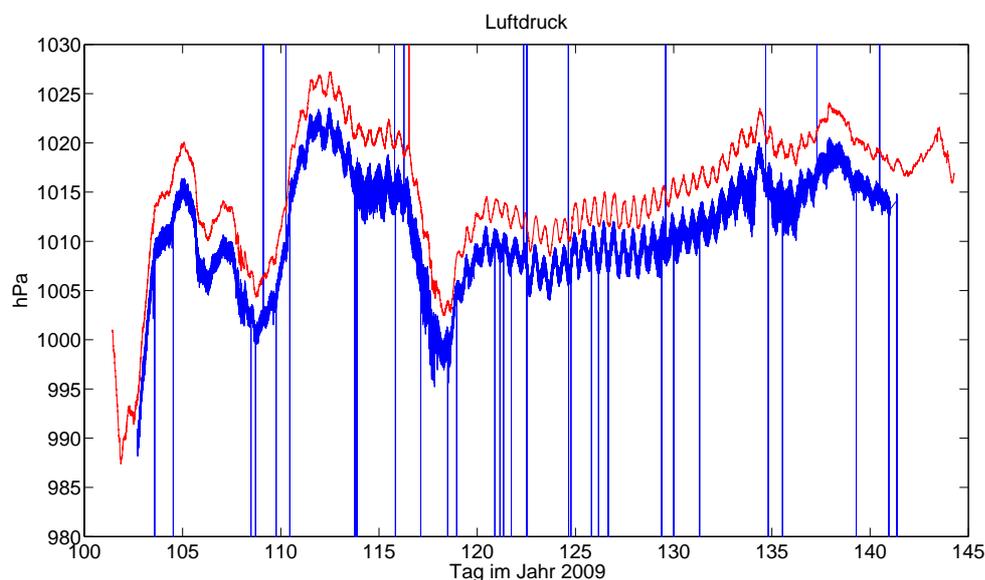


**Abb. 4.14:** Streuplots der in Abb. 4.13 gezeigten Daten von M100 (links) auf dem Krähennest und Licor (rechts) auf dem Peildeck mit den Schiffsdaten (vom Krähennest) unter verschiedenen Stabilitätsbedingungen: instabil (grün), stabil (blau) und neutral (rot)



**Abb. 4.15:** Originaldaten der Lufttemperatur gemessen mit dem Licor (blau) vom Peildeck und Borrdaten (rot).

den gleichen systematischen Fehler wie im Jahr zuvor spricht. Wie ein Jahr zuvor wurde wieder auf den Vergleich der virtuellen Temperaturen mit den wahren Werten der Bordanlage verzichtet und auch die Winddaten wurden vernachlässigt, da zum Einen das neue Sonic noch weiter unten angebracht war (Peildeck) und zum Anderen die Borddaten erneut an der Spitze des Turms gemessen wurden.



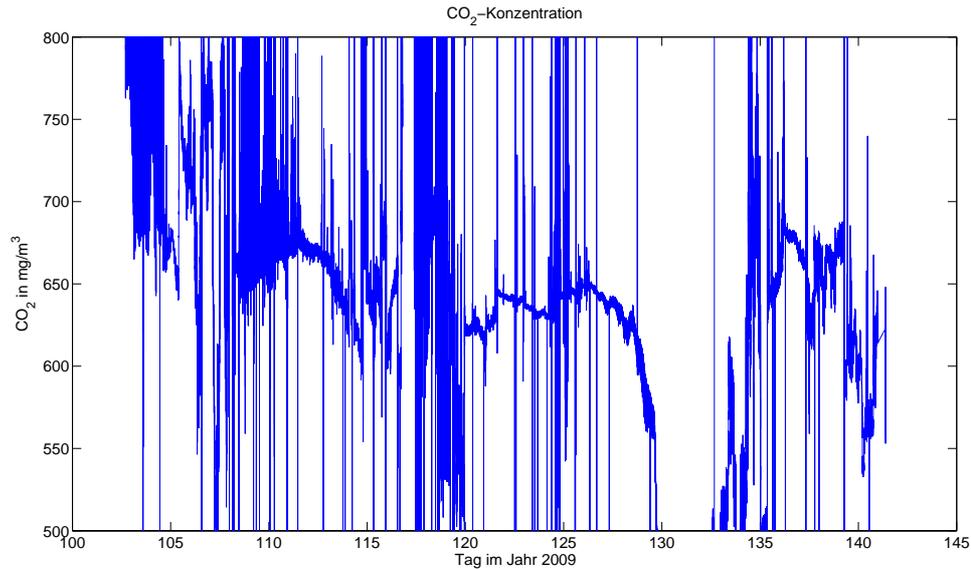
**Abb. 4.16:** Originaldaten des Luftdrucks gemessen mit dem Licor (blau) auf dem Peildeck und Borddaten (rot).

Beim Vergleich mit den Wetterbedingungen (Kap. 4.2.1) sind in der Luftdruckzeitserie (Abb. 4.16) vor allem Tief- und Hochdruckphasen sehr gut zu erkennen. Nichtsdestotrotz traten auch bei diesen Messungen wieder Ausreißer auf. Im Vergleich mit den Daten der Bordanlage ist der gleiche Verlauf zu erkennen, wobei (wie schon 2008) die Licordruckwerte wieder allgemein etwas niedriger als die der Wetterwarte auf der Polarstern sind. Zu vermuten wäre ein Bias von ca. 2,6 hPa<sup>3</sup>, also kleiner als 2008. Der ausgerechnete Bias ist mit ca. 4,3 hPa zwar geringer als 2008, aber wesentlich höher als der theoretische Wert. Auch hier aber liegen die Daten trotzdem noch im Fehlerbereich von 1 % bzw. ca. 10 hPa.

Die Zeitreihe der  $CO_2$ -Konzentration (Abb. 4.17) ist in einem größeren Intervall dargestellt (500-800  $mg/m^3$ ), damit zu erkennen ist, welche Werte womöglich Messwerte und welche Ausreißer sind.

In Kap. 5.4 wird beschrieben wie die Daten weiter verwendet werden.

<sup>3</sup>Barometrische Höhenstufe bei ca. 21 Metern Höhe



**Abb. 4.17:** Originaldaten der  $CO_2$ -Konzentration gemessen mit dem Licor auf dem Peildeck.

Allgemein wurde bei den Messungen während der Expedition ANT XXV-5 festgestellt, dass, wie im Vorjahr, die Messreihen der Hygrometer eine gute Qualität aufweisen, ausgenommen sind die  $CO_2$ -Daten. Beim Licor im Speziellen wurde festgestellt, dass Ausreißer vermehrt auftraten und diese schwierig zu eliminieren sind, was zu erheblichen Problemen führt. Hier kommt noch die neue Position des Licor hinzu, welche möglicherweise einen Einfluss darauf hat, dass sich die Streuung der gemessenen Daten vergrößert hat. Bei den Daten vom Krähenest ist erneut ein guter Zusammenhang mit den Borddaten zu sehen, wie schon 2008.

# 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die, mit den Daten der beiden Polarsternfahrten, berechneten turbulenten Flüsse gezeigt und diskutiert werden. Zuerst wird das Programm vorgestellt, welches Grundlage der Berechnungen ist. Danach werden die Flüsse der einzelnen Fahrten gezeigt.

## 5.1 Turbulenzprogramm

Das Turbulenzprogramm berechnet die verschiedenen turbulenten Flüsse sowohl nach der Dissipationsmethode, der Kreuzkorrelationsmethode als auch nach Bulkparametrisierungen. Es wurden sechs verschiedene Parametrisierungen verwendet, welche alle, nach den in Kap. 2.2 beschriebenen Gleichungen, die Flüsse berechnen. Es handelt sich um zwei Parametrisierungen von Smith (1980, 1988), eine von Bunker (1976), eine von Liu et al. (1979), eine von Large und Pond (1981)(Impulsfluss) bzw. Large und Pond (1982)(Wärmefflüsse) und schließlich eine von Isemer und Hasse (1987).

Es wird auch nach der Kreuzkorrelationsmethode gerechnet, obwohl diese Methode ungeeignet für Schiffsmessungen ist. Die Ergebnisse (nicht gezeigt) bestätigen diese Vermutung, und werden daher nicht weiter betrachtet.

Die Berechnungen nach der Dissipationsmethode sind aufwendig und folgen den Arbeiten von Large und Pond (1981), Edson et al. (1991), Yelland und Taylor (1996) oder auch Gravech et al. (1998). Das bestehende Programm wurde an einigen Stellen verändert, um die neuen Sonicdaten einlesen zu können oder auch die Licordatensätze mit einzubinden, um den latenten Wärmeffluss und den  $CO_2$ -Fluss bestimmen zu können.

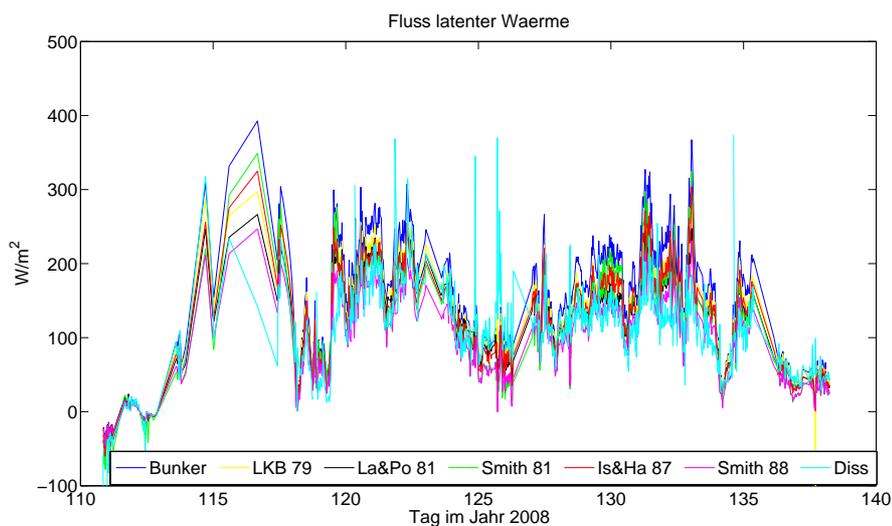
Mit den Ergebnissen dieses Programms erhält man vollständige Datensätze für alle Flüsse, Dragkoeffizienten, Spektren und weiteres. Diese wurden weiteren Test unterzogen, um festzustellen ob sie auch den Bedingungen entsprechen, in denen die Dissipationsmethode gilt. Am Ende ergaben sich für die Fahrt ANT XXIV-4 210 Datensätze für das M100/Sonic-System und 200 für das Licor/Sonic. Für die Fahrt ANT XXV-5 folgten 257 für M100/Sonic und 80 für Licor/Sonic. Die genauen Kriterien sollen bei der Beschreibung der Wärmefflüsse vorgestellt werden.

## 5.2 Fluss fühlbarer und latenter Wärme

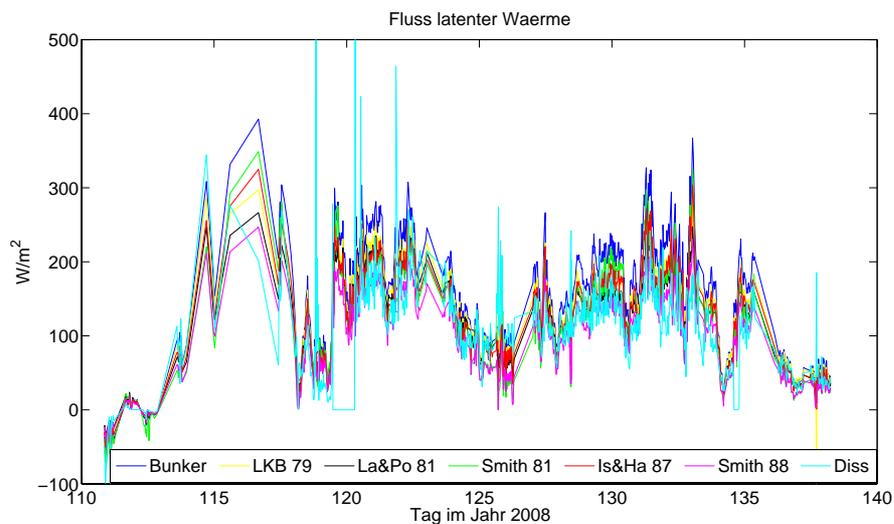
Die Flüsse fühlbarer und latenter Wärme werden zusammenfassend Wärmeflüsse bezeichnet. Theoretisch ist es möglich, sich nur den Transportkoeffizienten anzusehen, wie nachfolgend beim Impulsfluss in Kap. 5.3. Da die Wärmeflüsse nicht nur von der Windgeschwindigkeit und den windabhängigen Transportkoeffizienten  $C_E$  für den Fluss latenter Wärme und  $C_H$  für den Fluss fühlbarer Wärme, sondern auch entscheidend von der gemittelten Temperaturdifferenz  $\overline{\Delta\theta}$  (latent) bzw. der gemittelten Feuchtedifferenz  $\overline{\Delta q}$  (fühlbar) abhängen, werden in diesem Kapitel die Flüsse selber betrachtet.

### 5.2.1 Expedition ANT XXIV-4

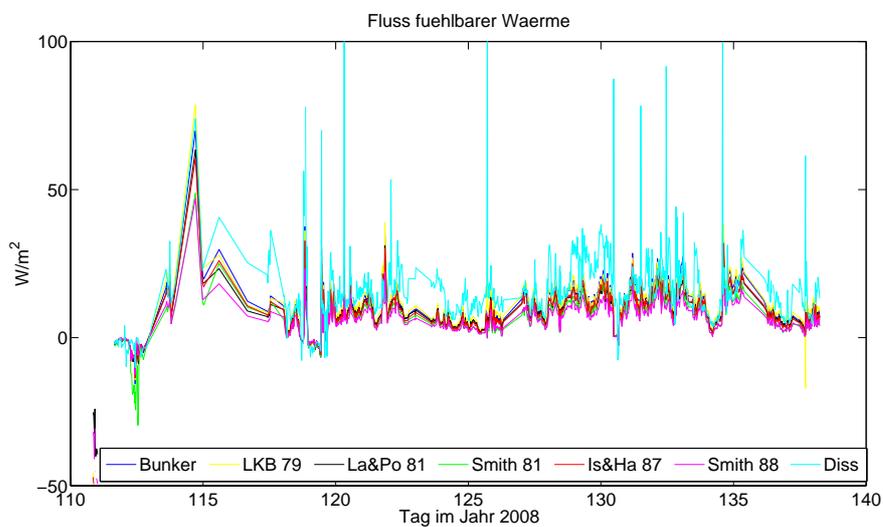
In den Abbildungen. 5.1 und 5.2 ist jeweils der Fluss latenter Wärme als Zeitreihe mit den beiden Messsystemen dargestellt. Ebenso ist in den Abbildungen. 5.3 und 5.4 der Fluss fühlbarer Wärme als Zeitreihe, wiederum mit beiden Messsystemen ermittelt, dargestellt.



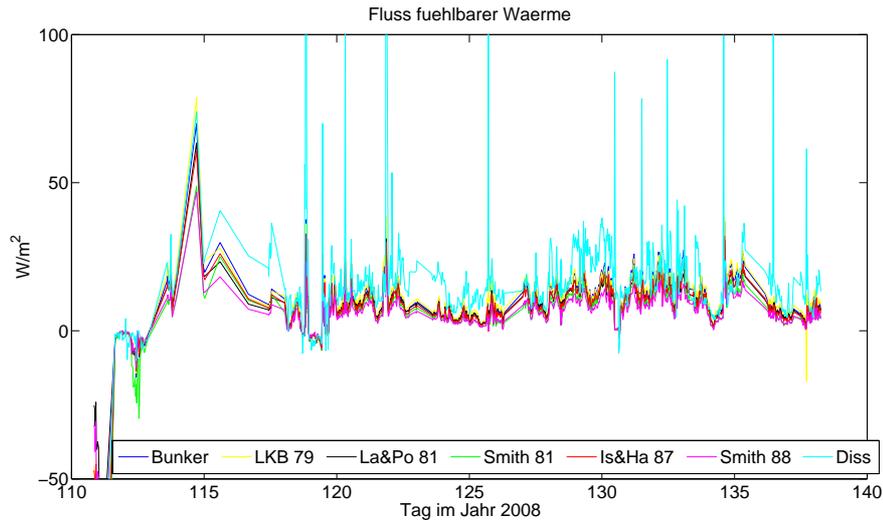
**Abb. 5.1:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest.



**Abb. 5.2:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/Licor auf dem Krähennest.

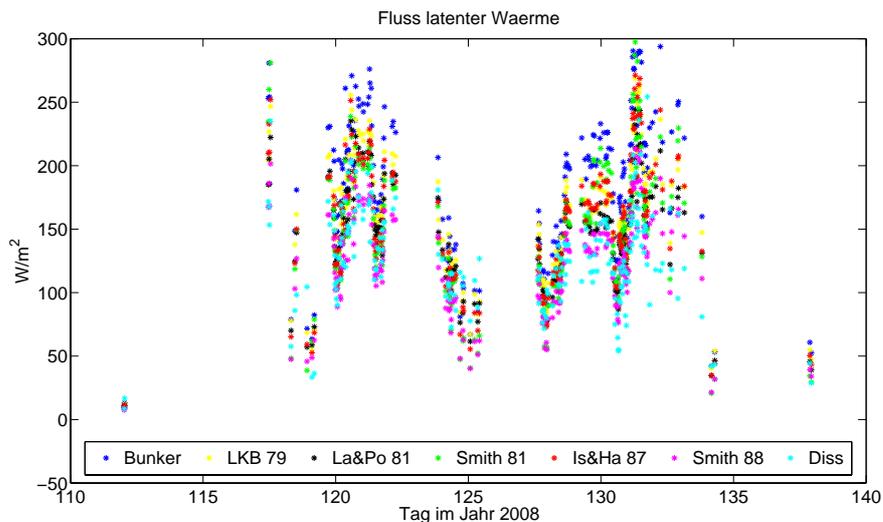


**Abb. 5.3:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit M100).

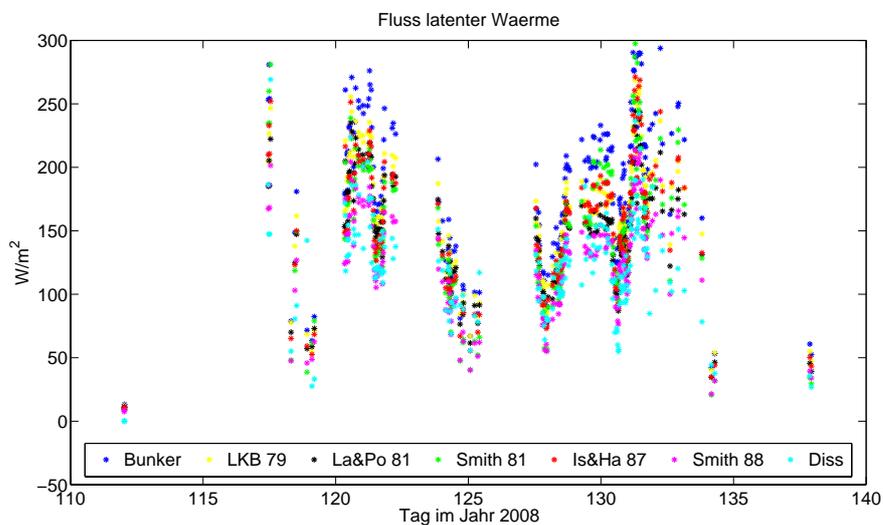


**Abb. 5.4:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem Licor).

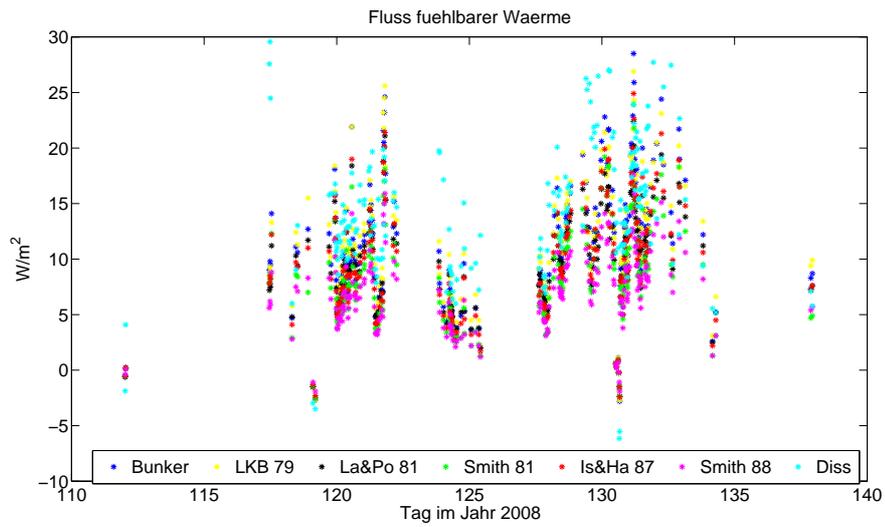
Um die Daten weiter auswerten zu können, wurden weitere Anpassungen vorgenommen. Es wurden nur Datensätze verwendet, bei denen das Verhältnis der berechneten Dragkoeffizienten vertikal zu longitudinal in einem Intervall von  $1,0 \cdot 10^3$  bis  $1,65 \cdot 10^3$  ist. So ergeben sich letztendlich für das Messsystem M100/Sonic 210 und für das Messsystem Licor/Sonic 200 Datensätze, welche weiter verwendet wurden. In den Abbildungen 5.5, 5.6, 5.7 und 5.8 sind ein weiteres Mal die Zeitreihen der beiden Wärmeflüsse für beide Messsysteme dargestellt, in diesen Fällen allerdings nur mit den Datensätzen, welche nach Anwendung der oben beschriebenen Kriterien übriggeblieben sind. Zweck der Vereinfachung bzw. Glättung der Daten ist nur solche Daten zu verwenden, die bei Bedingungen gemessen wurden, bei denen die Dissipationsmethode Gültigkeit besitzt. Sieht man sich jetzt die geglätteten Zeitreihen an, so fällt sofort auf, dass die Ausreißer bei den Dissipationswerten verschwunden sind. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass es große Zeiträume gibt, in denen die Bedingungen ungeeignet sind bzw. die Werte zu stark streuen. Viele Datenlücken haben ihre Ursache in relativen Windrichtungen, die mehr als die erlaubten  $\pm 60^\circ$  von Wind von vorn abweichen.



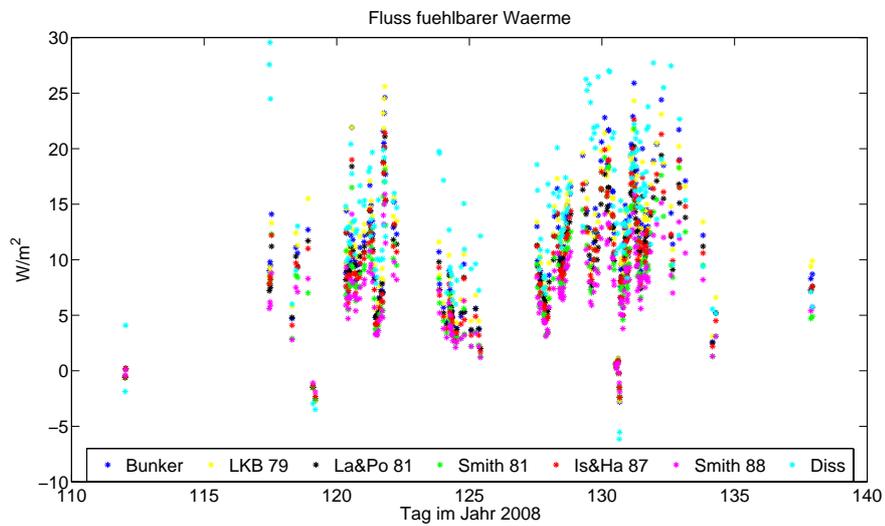
**Abb. 5.5:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest. Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden.



**Abb. 5.6:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/Licor auf dem Krähennest. Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden.



**Abb. 5.7:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem M100). Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden.



**Abb. 5.8:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem Licor). Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden.

## Fluss fühlbarer Wärme

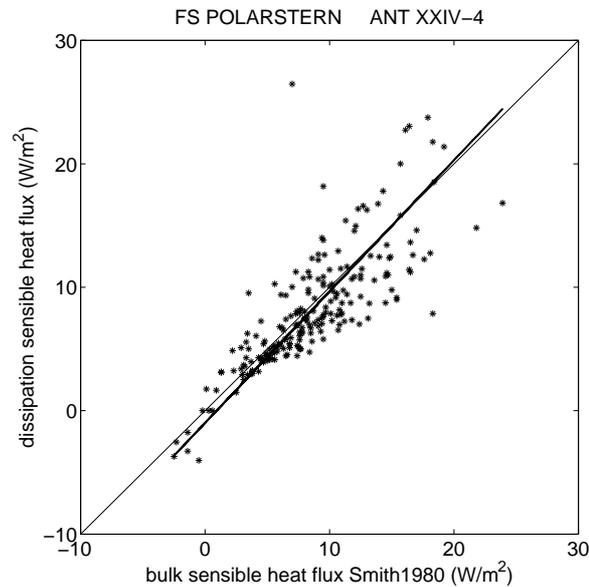
|                          | Bunker  | LKB79   | Smith80 | LaPo   | IsHa   | Smith88 |
|--------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 11,1767 | 11,5610 | 8,6038  | 9,6581 | 9,7105 | 7,2143  |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 3,5063  | 3,4220  | 3,0405  | 3,1407 | 3,1715 | 3,0117  |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 3,0065  | 3,3908  | 0,4336  | 1,4879 | 1,5403 | 0,9559  |
| r                        | 0,7947  | 0,7877  | 0,7964  | 0,7789 | 0,7939 | 0,7866  |

**Tab. 5.1:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss fühlbarer Wärme vom Sonic USA-1 (in Verbindung mit dem M100), jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 8,1702 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.

Die Daten besitzen als Zeitreihe wenig Aussagekraft, da das Schiff sich nahezu permanent bewegt hat und somit zu jedem Zeitpunkt eine andere geographische Position eingenommen wurde. Sinnvoller ist es daher die Daten untereinander zu untersuchen. Ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist die Dissipationsmethode (Kapitel 2.3). Im folgenden werden die Ergebnisse dieser Methode mit den Ergebnissen der einzelnen Parametrisierungen (siehe Kapitel 5.1) verglichen. In den Tabellen 5.1 und 5.2 sind Standardabweichungen (genauer: Standardabweichung der Differenzen von Parametrisierung und Dissipation), Korrelationskoeffizient und Bias (Mittelwert der Differenzen von Parametrisierung und Dissipation) von jeder Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationswerten dargestellt, und zwar für das M100/Sonic-Messsystem; dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. Das Gleiche ist in den Tabellen 5.3 und 5.4 für das Licor/Sonic-System dargestellt.

Es zeigt sich, dass für den Fluss fühlbarer Wärme beim M100/Sonic-System die Parametrisierung von Smith (1980) die beste Übereinstimmung zeigt (Tabelle 5.1). Der Mittelwert von  $8,6038 W/m^2$  führt - mit dem Mittelwert der Dissipation:  $8,1702 W/m^2$  - zu einem Bias von  $0,4336 W/m^2$  und zu einer Standardabweichung von  $3,0405 W/m^2$ . Die Korrelation mit der Dissipation beträgt  $0,7964$  und ist damit die höchste aller Parametrisierungen an dieser Stelle. Generell ist aber zu sagen, dass alle Parametrisierungen sehr gut mit den Dissipationswerten korreliert sind. In einem Streuplot ist zu erkennen (Abbildung 5.9), dass nur Werte im Intervall von 0 bis 50 den Bedingungen entsprechen, in welchen die Dissipationsmethode gültig ist. Der Anstieg der Regressionsgerade beträgt  $m = 1,0642$  und der Achsenabschnitt ist  $n = -0,9857 W/m^2$ .

Beim Fluss latenter Wärme mit dem M100/Sonic-System stellt sich heraus, dass zwei Parametrisierungen näher untersucht werden können (Tabelle 5.2). Zum einen wäre dies jene von Large und Pond (1982). Der Mittelwert beträgt  $148,1729 W/m^2$ , der Bias ist  $20,3358 W/m^2$ , die Standardabweichung  $25,8004 W/m^2$  und der Korre-



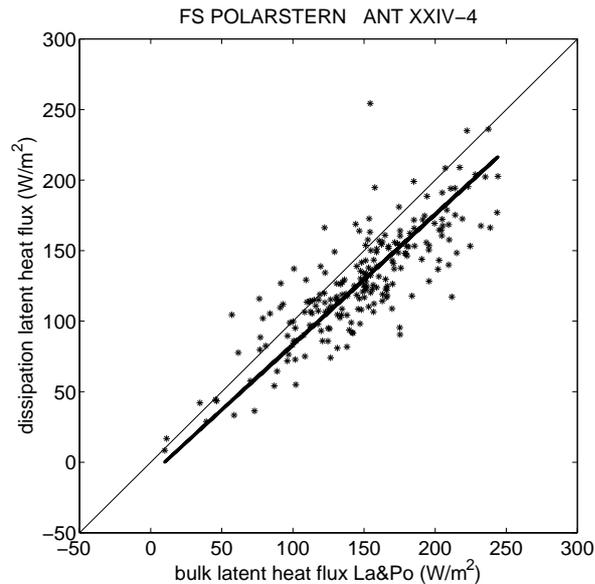
**Abb. 5.9:** Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode ( $y$ -Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1980) ( $x$ -Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem M100), Regression:

$$H_{diss} = 1,0642 * H_{bulk} - 0,9857 \text{ W/m}^2$$

#### Fluss latenter Wärme (M100/Sonic)

|                                 | Bunker   | LKB79    | Smith80  | LaPo     | IsHa     | Smith88  |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mittelwert ( $\text{W/m}^2$ )   | 185,8681 | 161,8405 | 149,7648 | 148,1729 | 154,0695 | 125,3495 |
| Standardabw. ( $\text{W/m}^2$ ) | 38,6166  | 28,1094  | 36,1267  | 25,8000  | 31,1052  | 25,8375  |
| Bias ( $\text{W/m}^2$ )         | 58,0310  | 34,0034  | 21,9277  | 20,3373  | 26,2324  | 2,4860   |
| r                               | 0,7960   | 0,8202   | 0,7583   | 0,8204   | 0,7954   | 0,7960   |

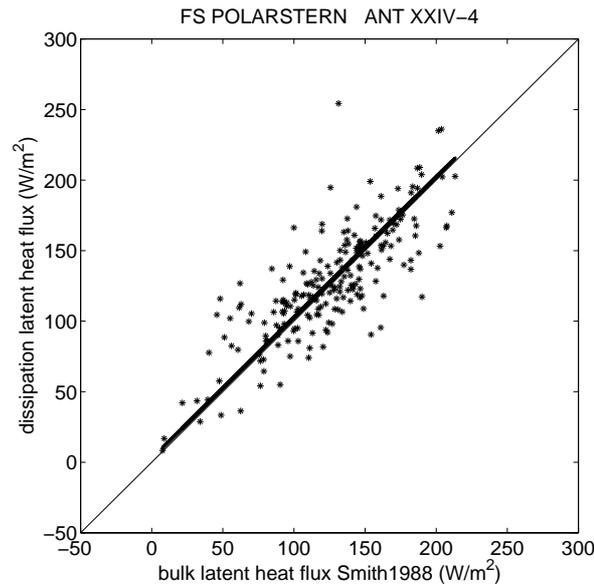
**Tab. 5.2:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem M100/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen (Mittelwert<sub>diss</sub> = 127,8355  $\text{W/m}^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.



**Abb. 5.10:** Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Large und Pond (1982)(x-Achse), gemessen mit dem M100/Sonic-Messsystem, Regression:  $H_{diss} = 0,9236 * H_{bulk} - 9,0107 W/m^2$

lationskoeffizient 0,8203. Die zweite gut übereinstimmende Parametrisierung ist die von Smith (1988)(Mittelwert= $125,3495 W/m^2$ ; Bias= $2,4876 W/m^2$ ; Standardabweichung= $25,8374 W/m^2$ ;  $r=0,7960$ ). Allgemein kann man auch hier davon reden, dass die Parametrisierungen sehr gut mit den Dissipationsberechnungen korreliert sind (0,7954 bis 0,8204). Von den beiden ausgewählten Parametrisierungen sind Streuplots mit den Dissipationsmessungen dargestellt (Abbildungen 5.10 und 5.11). Die Parameter der linearen Regression betragen bei Large und Pond:  $m=0,9236$  und  $n=-9,0107 W/m^2$  und bei Smith:  $m=0,9979$  und  $n=2,7500 W/m^2$ .

Beim Betrachten der beiden Abbildungen 5.10 und 5.11 fällt sofort auf, dass die Parametrisierung von Smith (1988) besser durch die berechneten Dissipationsdaten beschrieben ist als die von Large und Pond (1982). Das liegt wahrscheinlich daran, dass der Mittelwert wesentlich näher an dem der Dissipationsdaten lag und auch der Bias eine Größenordnung kleiner war und somit fast zu vernachlässigen ist (vergl. Tabelle 5.2). Der Korrelationskoeffizient ist zwar kleiner, aber das wird durch die anderen Parameter ausgeglichen.



**Abb. 5.11:** Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (*y*-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988) (*x*-Achse), gemessen mit dem M100/Sonic-Messsystem auf dem Krähennest, Regression:  
 $H_{diss} = 0,9979 * H_{bulk} + 2,7500 W/m^2$

Betrachtet man die statistischen Parameter für das Licor/Sonic-System (Tabellen 5.3 und 5.4), sieht man beim Fluss fühlbarer Wärme, dass erneut die Parametrisierung von Smith (1980) am besten passt (Mittelwert= $8,6565 W/m^2$ ; Bias= $0,3583 W/m^2$ ; Standardabw.= $3,0881 W/m^2$ ;  $r=0,7908$ ). Auch hier ist eine durchgehend hohe Korrelation zu erkennen, man kann die weitere Auswahl also anhand der anderen Parameter treffen. Im Streuplot (Abbildung 5.12) ist der Zusammenhang ebenfalls gut zu erkennen. Als Parameter der Ausgleichsgeraden ergeben sich:  $m = 1,0805$  und  $n = -1,0552 W/m^2$ .

Beim Fluss latenter Wärme ist ebenfalls eine Analogie zum M100/Sonic-System zu erkennen. Die Korrelationen sind niedriger, bewegen sich aber immer noch in der Größenordnung von 0,74 bis 0,79. Bei der Auswahl für eine nähere Untersuchung eignet sich wieder die Parametrisierung von Smith (1988) am besten (Mittelwert= $125,4146 W/m^2$ ; Bias= $0,3697 W/m^2$ ; Standardabw.= $29,6776 W/m^2$ ;  $r=0,7758$ ). Auch hier wird der Streuplot zwischen Parametrisierung und Dissipation genauer angeschaut (Abbildung 5.13). Die lineare Regression ergibt einen Anstieg von  $m = 1,1149$  und einen Achsenabschnitt von  $n = -14,7799 W/m^2$ .

## Fluss fühlbarer Wärme

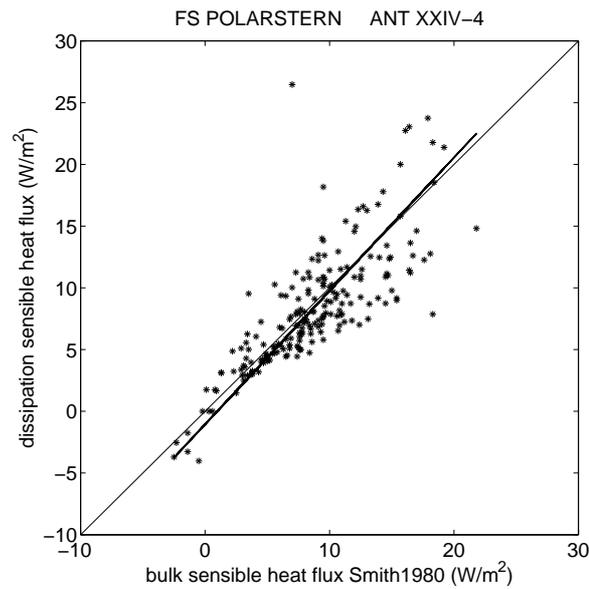
|                          | Bunker  | LKB79   | Smith80 | LaPo   | IsHa   | Smith88 |
|--------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 11,2500 | 11,6395 | 8,6565  | 9,7190 | 9,7730 | 7,2575  |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 3,5276  | 3,4588  | 3,0882  | 3,1958 | 3,2099 | 3,0747  |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 2,9518  | 3,3413  | 0,3583  | 1,4208 | 1,4748 | 1,0407  |
| r                        | 0,7892  | 0,7821  | 0,7908  | 0,7730 | 0,7884 | 0,7810  |

**Tab. 5.3:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss fühlbarer Wärme vom Sonic USA-1 (in Verbindung mit dem Licor), jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 8,2982 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.

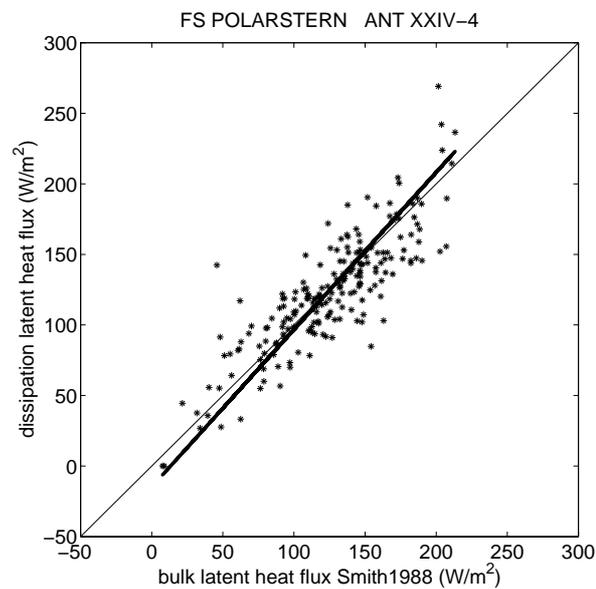
## Fluss latenter Wärme (Licor/Sonic)

|                          | Bunker   | LKB79    | Smith80  | LaPo     | IsHa     | Smith88  |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 186,1325 | 161,9740 | 149,9660 | 148,1205 | 154,2910 | 125,4145 |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 39,9105  | 31,1291  | 37,5358  | 29,5980  | 33,6675  | 29,6776  |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 61,0880  | 36,9295  | 24,9215  | 23,0760  | 29,2465  | 0,3697   |
| r                        | 0,7705   | 0,7919   | 0,7457   | 0,7912   | 0,7700   | 0,7758   |

**Tab. 5.4:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem Licor/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 125,0448 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.



**Abb. 5.12:** Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1980) (x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest, Regression:  $H_{diss} = 1,0805 * H_{bulk} - 1.0552 \text{ W/m}^2$

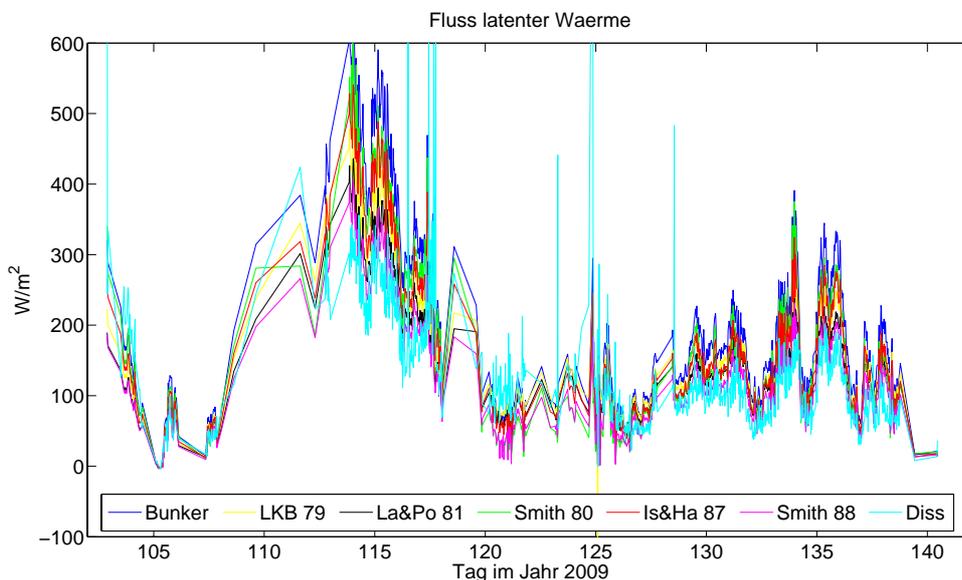


**Abb. 5.13:** Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988) (x-Achse), gemessen mit dem Licor/Sonic-Messsystem auf dem Krähenest, Regression:  $H_{diss} = 1,1149 * H_{bulk} - 14,7799 \text{ W/m}^2$

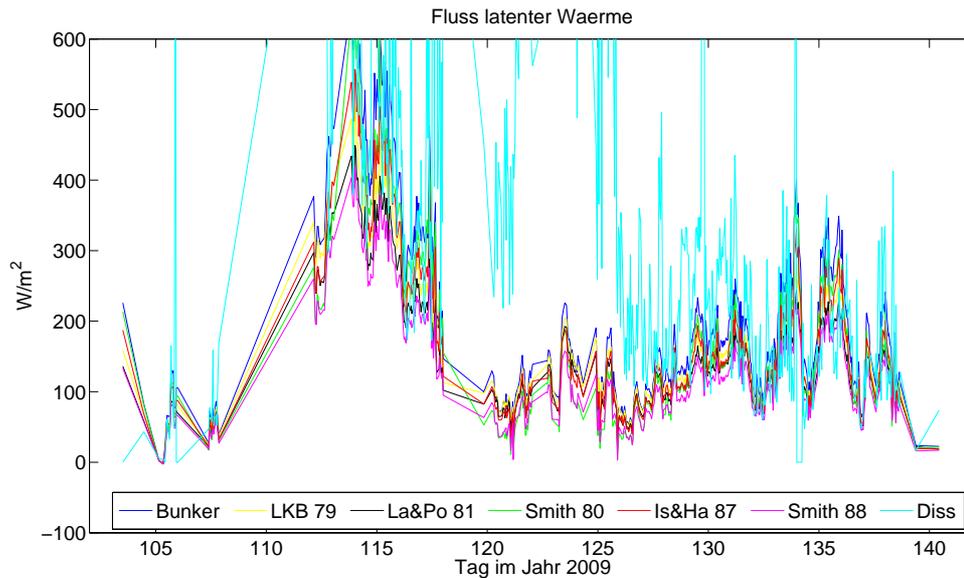
Zusammenfassend ist für die Fahrt ANT XXIV-4 zu sagen, dass die Messungen mit den verschiedenen Messgeräten durchaus erfolgreich waren und gute Ergebnisse hervorgebracht haben, gerade auch im Vergleich der beiden Hygrometer. Da beide Hygrometer mit dem gleichen Sonicanemometer ein Messsystem bildeten, sind die Daten auch untereinander sehr gut vergleichbar. Der Platz auf dem Krähennest hat sich durchaus als geeigneter Messplatz erwiesen, wobei zu erwähnen ist, dass die Höhe des Krähennests mit ca. 28 m durchaus grenzwertig ist für die Messung von Turbulenz, da die Höhe schon an die obere Grenze der Prandtl-Schicht heranreicht. Das Krähennest erwies sich allerdings unter schwierigen Wetter- und Seebedingungen nicht als geeigneter Platz, da z.B. bei erhöhtem Reinigungsbedarf der Geräte jedesmal nach ganz oben gestiegen werden muss, was unter Sturm- oder Gewitterbedingungen nicht möglich war.

### 5.2.2 Expedition ANT XXV-5

Auf der Fahrt ANT XXV-5 im Frühjahr 2009 sollten erstmals zwei unabhängige Systeme an zwei unterschiedlichen Positionen messen, um die Eignung des Peildecks für Turbulenzmessungen zu untersuchen. Zunächst sollen die Zeitreihen der Flüsse betrachtet werden. In den Abbildungen 5.14 und 5.15 ist der Fluss latenter Wärme mit den beiden Messsystemen dargestellt.



**Abb. 5.14:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest.



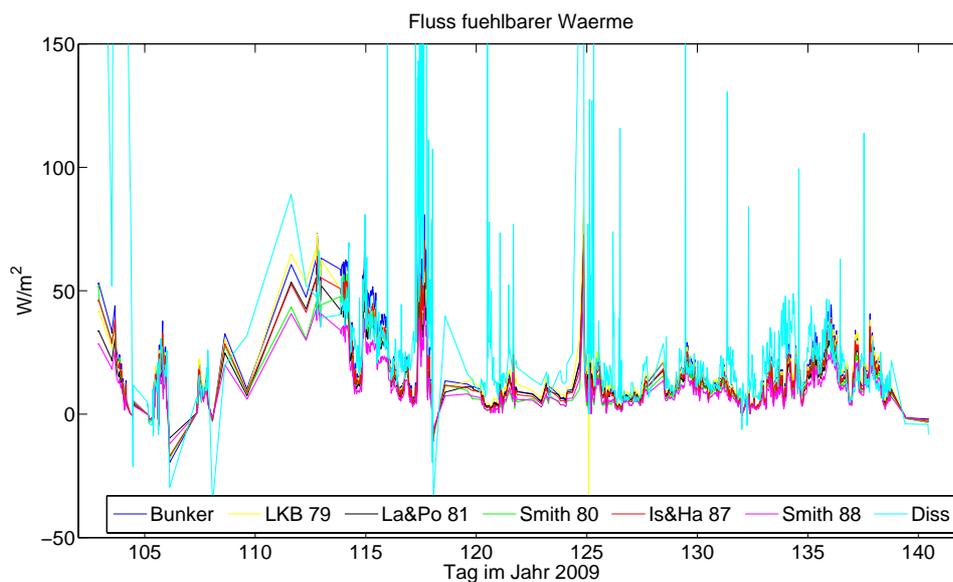
**Abb. 5.15:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/Licor auf dem Peildeck.

Die Abbildungen 5.16 und 5.17 zeigen den Fluss fühlbarer Wärme mit den beiden unterschiedlichen Messsystemen.

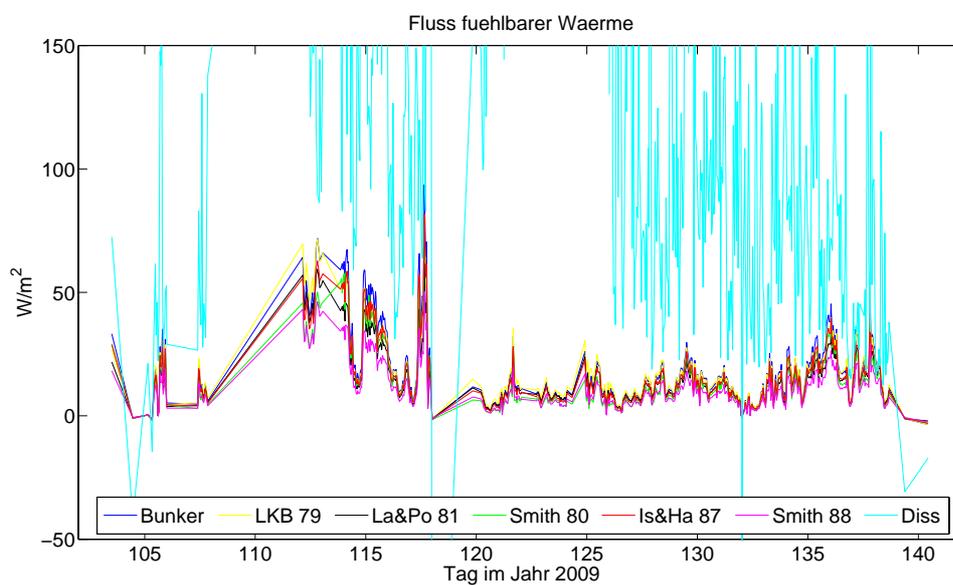
Auch für diese Fahrt wurden die Daten wieder zahlreichen Vereinfachungen (s.o.) unterzogen. So ergibt sich in diesem Fall ein Wert von 257 verwendeten Datensätzen für das M100/Sonic-System. Zunächst sollen kurz die Zeitreihen des Flusses fühlbarer (Abbildung 5.18) und latenter Wärme (Abbildung 5.19) nach diesen Vereinfachungen gezeigt werden.

In den Tabellen 5.5 und 5.6 sind die statistischen Parameter Mittelwert, Korrelationskoeffizient, Standardabw. und Bias für das M100/Sonic-Messsystem bzw. nur das alte Sonic USA-1 dargestellt; sowohl für den fühlbaren Wärmefluss (Tabelle 5.5) als auch für den latenten Wärmefluss (Tabelle 5.6). Von den Differenzen jeder Parametrisierung mit den Dissipationsergebnissen wird erneut die Standardabweichung ausgerechnet und der Bias stellt wiederum den Mittelwert der Differenzen von Parametrisierung und Dissipation dar.

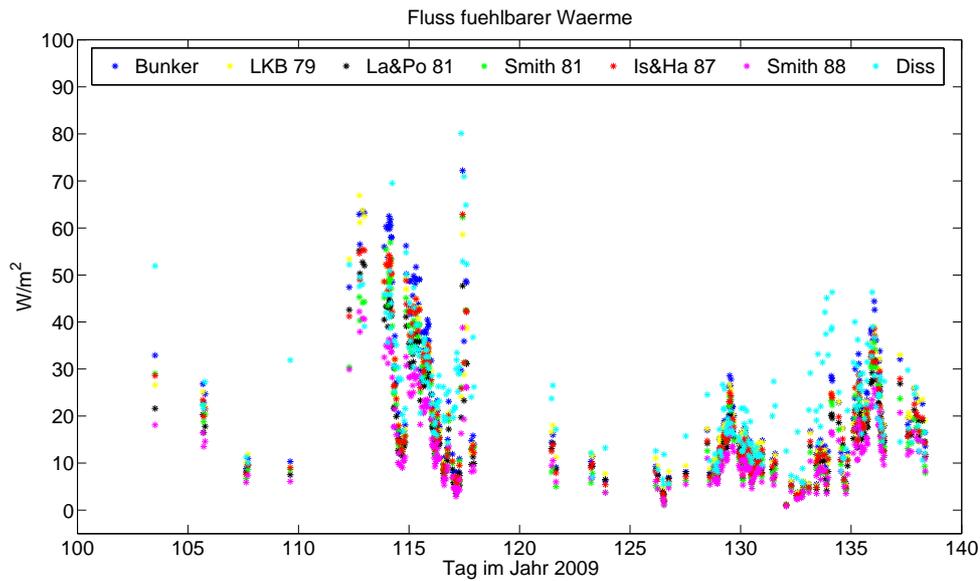
Die Werte zeigen, dass zwei Parametrisierungen näher untersucht werden sollten. Zum einen ist das jene von Large und Pond (1982) und zum Anderen die von Smith (1988). Bei beiden sind die Korrelationskoeffizienten im Vergleich zu den anderen relativ gering (aber trotzdem auf sehr hohem Niveau, da alle Korrelationskoeffizienten größer als 0,81 sind), allerdings sprechen die anderen Parameter für diese Auswahl. Bei der Parametrisierung von Large und Pond ist der Mittelwert gleich  $17,8934 \text{ W/m}^2$ . Zusammen mit dem Mittelwert der Dissipation ( $16,0834 \text{ W/m}^2$ )



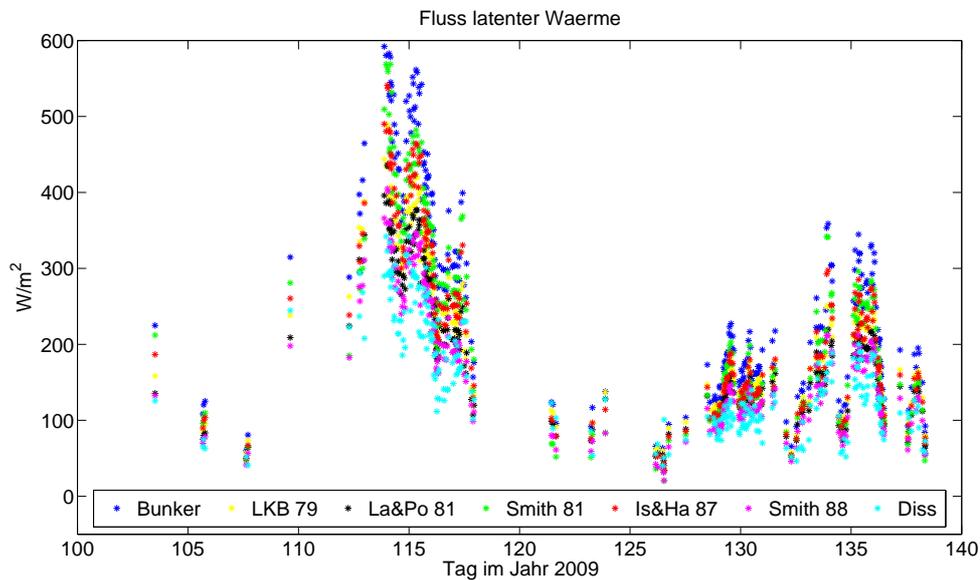
**Abb. 5.16:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Sonic USA-1 auf dem Krähennest (Daten in Verbindung mit dem M100).



**Abb. 5.17:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit neuem Sonic auf dem Peildeck (Daten in Verbindung mit dem Licor).



**Abb. 5.18:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Sonic USA-1 auf dem Krähenest. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze.



**Abb. 5.19:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähenest. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze.

## Fluss fühlbarer Wärme

|                          | Bunker  | LKB79   | Smith80 | LaPo    | IsHa    | Smith88 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 23,2922 | 21,6549 | 18,8482 | 17,8934 | 20,2432 | 14,1339 |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 9,0990  | 7,8717  | 7,2362  | 6,5752  | 7,5930  | 5,7375  |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 7,2088  | 5,5714  | 2,7648  | 1,8099  | 4,1597  | 1,9496  |
| r                        | 0,8293  | 0,8170  | 0,8234  | 0,8118  | 0,8294  | 0,8181  |

**Tab. 5.5:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabw. für den Fluss fühlbarer Wärme vom Sonic USA-1, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 16,0834 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.

## Fluss latenter Wärme (M100/Sonic)

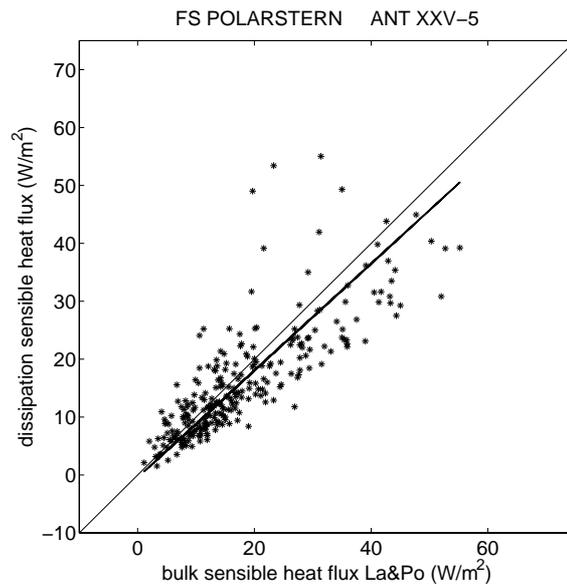
|                          | Bunker   | LKB79    | Smith80  | LaPo     | IsHa     | Smith88  |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 269,5658 | 213,4268 | 232,5817 | 190,5903 | 223,3708 | 172,8191 |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 75,3296  | 41,6303  | 66,0501  | 34,4336  | 53,5589  | 31,4499  |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 113,7917 | 57,6528  | 76,8077  | 34,8162  | 67,5968  | 17,0450  |
| r                        | 0,9331   | 0,9343   | 0,9197   | 0,9332   | 0,9331   | 0,9313   |

**Tab. 5.6:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem M100/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 155,7740 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.

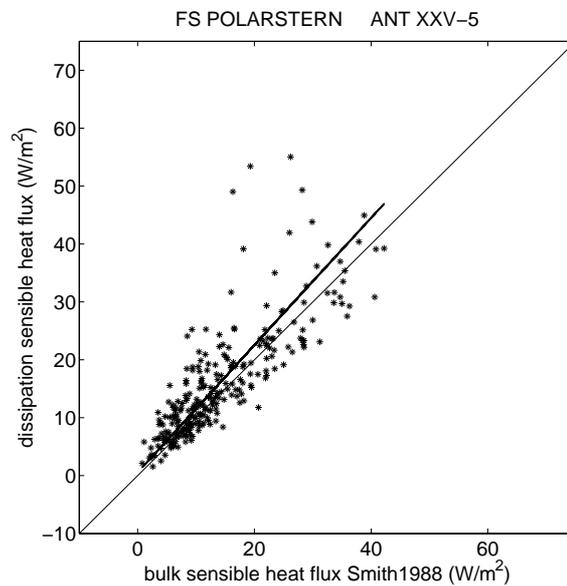
erhalten wir als Standardabw.  $6,5752 W/m^2$  und als Bias  $1,8099 W/m^2$ . In einem Streuplot sind die Daten der Parametrisierung gegen jene der Dissipation dargestellt (Abbildung 5.20). Für die Parametrisierung von Smith ergeben sich als Parameter: Mittelwert= $14,1339 W/m^2$ , Standardabw.= $5,7375 W/m^2$  und Bias= $1,9496 W/m^2$ . Auch hier sind die Daten als Streuplot dargestellt (Abbildung 5.21).

Beide Datensätze zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Dissipationsdaten, wobei die Dissipation bei Large und Pond (1982) den Fluss fühlbarer Wärme etwas unterschätzt, während sie bei Smith (1988) leicht überschätzt wird.

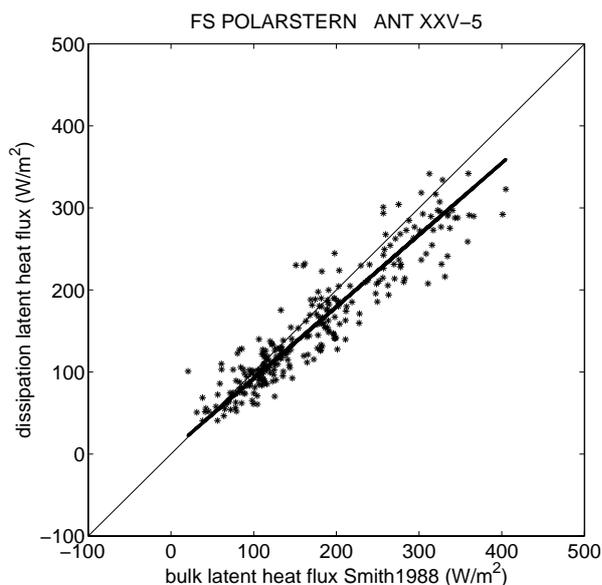
In der Untersuchung der statistischen Parameter für den Fluss latenter Wärme (Tabelle 5.6) zeigt sich, dass auch hier die Parametrisierungen von Smith (1988) die beste Vergleichbarkeit mit den Dissipationsdaten aufweist. Die Auswahl in Abhängigkeit von Standardabweichung und Bias ist am besten geeignet, da alle Korrelationskoeffizienten größer als 0,91 sind und deswegen die Korrelation kein entscheidender Faktor dafür ist, welche Parametrisierung weiter untersucht werden sollte. In Abbildung 5.22 sind die Werte in einem Streuplot dargestellt. Als Ausgleichsgerade



**Abb. 5.20:** Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Large und Pond (1982)(x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1, Regression:  $H_{diss} = 0,9234 * H_{bulk} - 0,4396 \text{ W/m}^2$



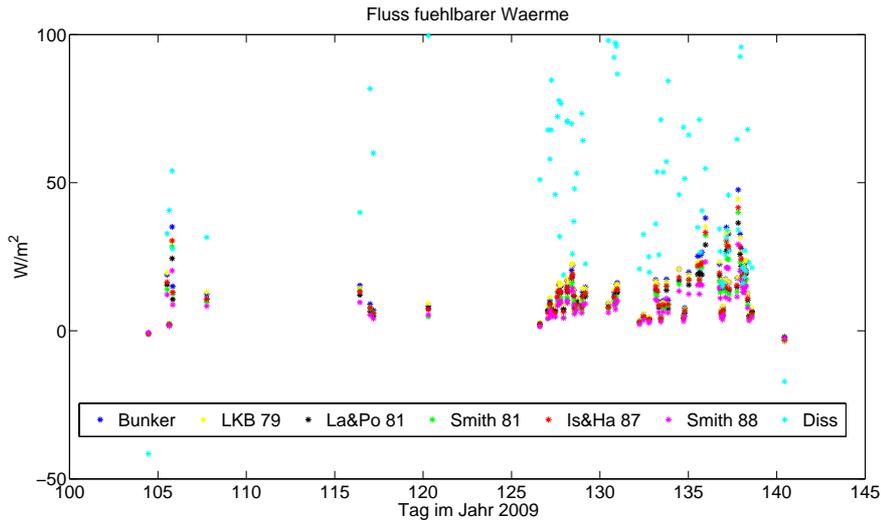
**Abb. 5.21:** Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988)(x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1, Regression:  $H_{diss} = 1,0998 * H_{bulk} + 0,5392 \text{ W/m}^2$



**Abb. 5.22:** Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988)(x-Achse), gemessen mit dem M100/Sonic-Messsystem auf dem Krähennest, Regression:

$$H_{diss} = 0,8758 * H_{bulk} + 4,4187 \text{ W/m}^2$$

ergibt sich:  $H_{diss} = 0,8758 * H_{bulk} + 4,4187 \text{ W/m}^2$ . Auch wenn die Parametrisierung die Dissipation leicht überschätzt, so ist doch ein klarer (linearer) Zusammenhang offensichtlich.



**Abb. 5.23:** Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit neuem Sonic auf dem Peildeck. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze.

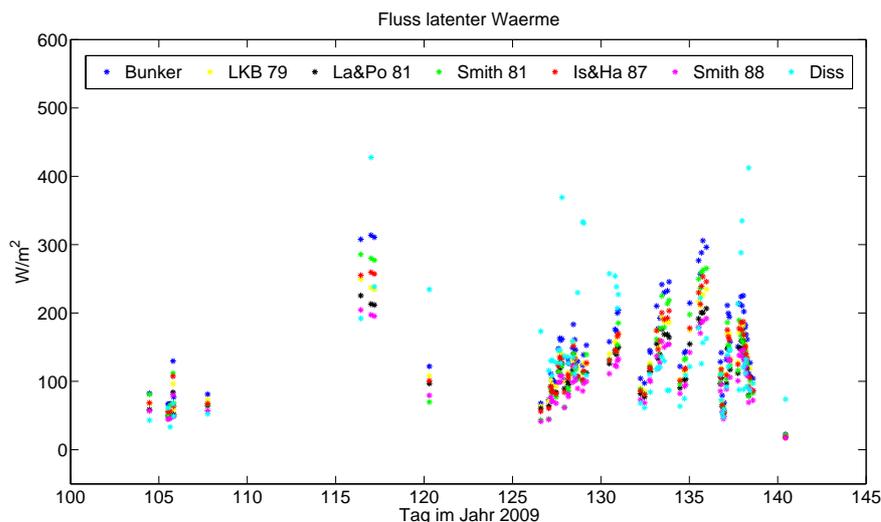
Auch für das neue Messsystem Licor/Sonic sollen kurz die Zeitreihen (Abbildungen 5.23 und 5.24) gezeigt werden, in denen die tatsächlich verwendeten Daten dargestellt sind.

In den Tabellen 5.7 und 5.8 sind die statistischen Parameter für das Licor/Sonic-System dargestellt. Auffällig ist am Fluss fühlbarer Wärme, dass die Korrelationen sich nur noch in der Größenordnung unterhalb von 0,4 bewegen, und dass sowohl Standardabweichung als auch Bias beide die Größenordnung des Mittelwertes haben. In diesem Fall wurden nur 80 Datensätze verwendet, da alle anderen nicht den Konditionen entsprachen. Als “am besten” geeignete Parametrisie-

Fluss fühlbarer Wärme

|                          | Bunker  | LKB79   | Smith80 | LaPo    | IsHa    | Smith88 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 15,0600 | 14,9213 | 11,6738 | 12,2575 | 13,0875 | 9,4988  |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 18,3293 | 17,9996 | 18,4063 | 17,9618 | 18,1916 | 18,1109 |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 14,3668 | 14,5056 | 17,7531 | 17,1693 | 16,3393 | 19,9281 |
| r                        | 0,3510  | 0,3774  | 0,3186  | 0,3727  | 0,3505  | 0,3571  |

**Tab. 5.7:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss fühlbarer Wärme vom neuen Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 29,4268 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.



**Abb. 5.24:** Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit System Licor/Sonic auf dem Peildeck. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze.

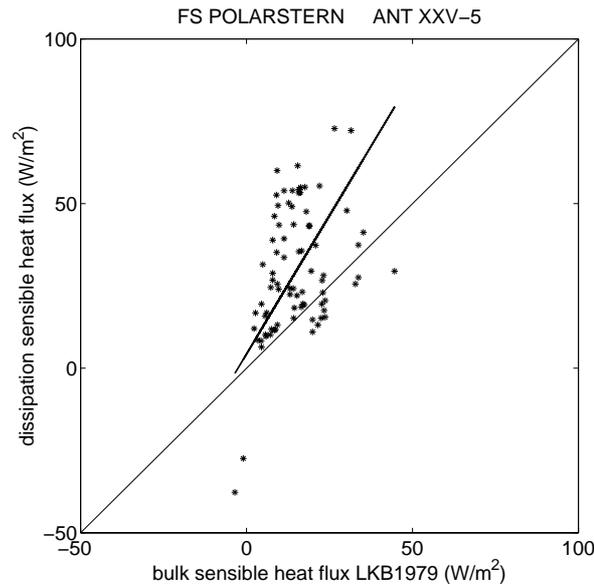
nung scheint sich jene von Liu et al. (1979) zu erweisen. In Abbildung 5.25 ist die LKB-Parametrisierung (Mittelwert=14,9213  $W/m^2$ ; Standardabw.=17,9996  $W/m^2$ ; Bias=14,5056  $W/m^2$ ) gegen die Dissipation aufgetragen. Es ergibt sich für die Regressionsgerade:  $H_{diss} = 1,6821 * H_{bulk} + 4,3271 W/m^2$ . Es ist eine eindeutige Überschätzung der Dissipation zu erkennen. Generell sind diese Daten nicht sehr aussagekräftig, da nur 80 Datensätze vorhanden sind.

Ähnlich wie beim Fluss fühlbarer Wärme, sieht man auch beim Fluss latenter Wärme eine sehr große Diskrepanz zwischen den Parametrisierungen und den Dissipationsergebnissen. Auch hier sollen zwei Parametrisierungen näher betrachtet werden, die

Fluss latenter Wärme (Licor/Sonic)

|                          | Bunker   | LKB79    | Smith80  | LaPo     | IsHa     | Smith88  |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mittelwert ( $W/m^2$ )   | 161,5750 | 135,1587 | 132,7987 | 120,1262 | 133,9287 | 106,7288 |
| Standardabw. ( $W/m^2$ ) | 86,6920  | 79,9517  | 88,3751  | 78,7220  | 82,8015  | 80,0239  |
| Bias ( $W/m^2$ )         | 15,7156  | 10,7007  | 13,0607  | 25,7332  | 11,9307  | 39,1307  |
| r                        | 0,3608   | 0,3886   | 0,3042   | 0,3949   | 0,3603   | 0,3605   |

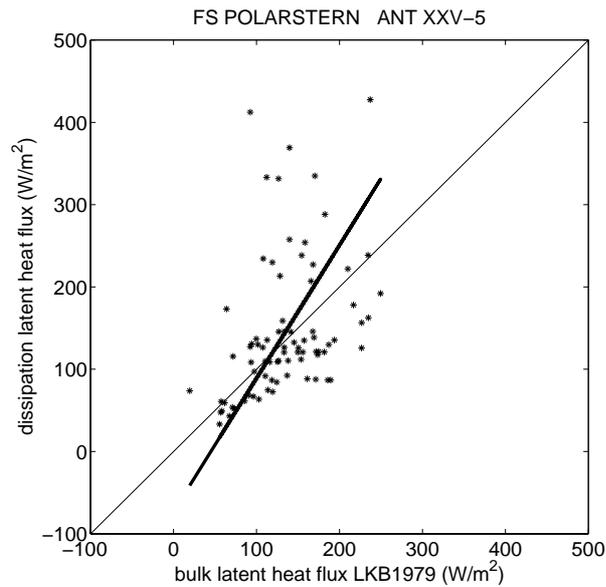
**Tab. 5.8:** Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem Licor/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen (Mittelwert<sub>diss</sub> = 145,8594  $W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung.



**Abb. 5.25:** Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode ( $y$ -Achse) und mit einer Parametrisierung von Liu et al. (1979) ( $x$ -Achse), gemessen mit dem neuen Sonic auf dem Peildeck, Regression:  $H_{diss} = 1,6821 * H_{bulk} + 4,3271 \text{ W/m}^2$

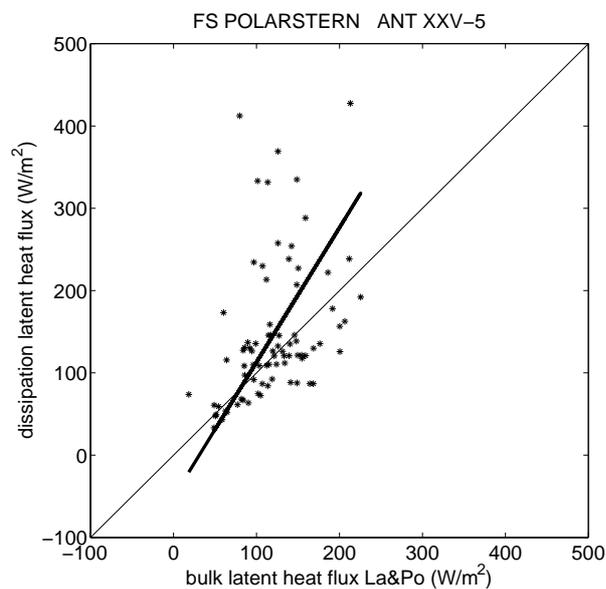
von Liu et al. (1979) und die von Large und Pond (1982). In den Abbildungen 5.26 und 5.27 sind erneut Streuplots der Ergebnisse der beiden Parametrisierungen mit denen der Dissipationsmethode dargestellt.

Der Einfluss von Ausreißern ist in diesen beiden Abbildungen sehr gut zu erkennen. So gibt es Werte der Dissipation, welche teilweise um  $300 \text{ W/m}^2$  höher liegen als die der jeweiligen Parametrisierung. Das sorgt dafür, dass die Regressionsgeraden in beiden Abbildungen - und bei den anderen Parametrisierungen auch - sehr stark ansteigen. Da die Parametrisierungen untereinander nahezu gleich sind, ist es wahrscheinlich, dass sie der Realität entsprechen. Da für die Parametrisierungen alle Messgrößen verwendet wurden (Wind, Temperatur, Feuchte), und diese Größen wie oben gezeigt durch Ausreißer dominiert sind, scheinen die Bulkparametrisierungen allgemein weniger anfällig als die Ableitung aus der Dissipationsmethode zu sein. Insgesamt sind die Ergebnisse für das Licor/Sonic-System auf dem Peildeck im Vergleich mit den Licor-Messungen von 2008 und auch mit den M100/Sonic-Ergebnissen auf dem Krähennest von beiden Fahrten schlechter ausgefallen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Messgeräte auf dem Container auf dem Peildeck höchstwahrscheinlich schlechtere Ergebnisse erbringen werden.



**Abb. 5.26:** Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Liu et al. (1979)(x-Achse), gemessen mit dem Licor/Sonic-Messsystem auf dem Peildeck, Regression:

$$H_{diss} = 1,6183 * H_{bulk} - 72,8726 \text{ W/m}^2$$



**Abb. 5.27:** Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Large and Pond (1982)(x-Achse), gemessen mit dem Licor/Sonic-Messsystem auf dem Peildeck, Regression:

$$H_{diss} = 1,6368 * H_{bulk} - 50,7644 \text{ W/m}^2$$

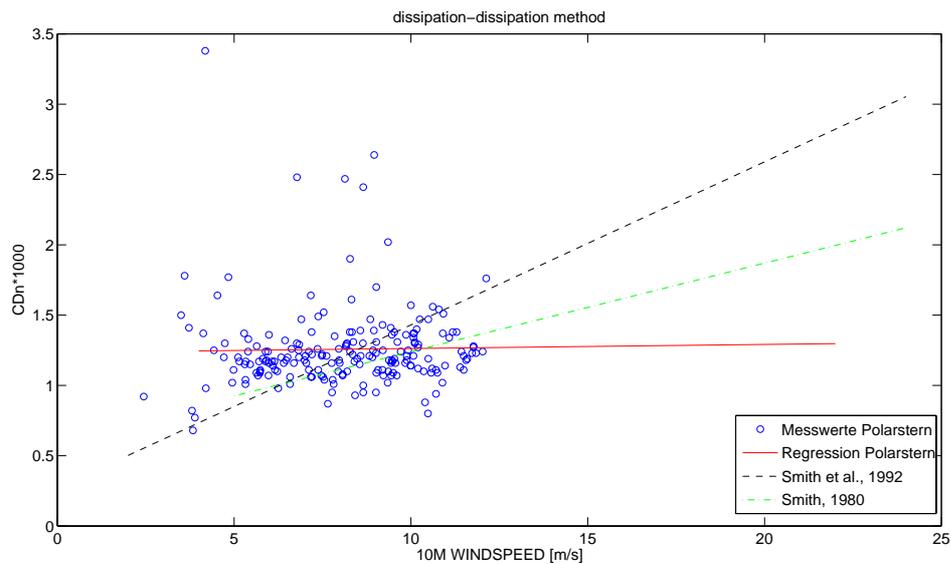
## 5.3 Dragkoeffizient und Impulsfluss

Für den Energieaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre ist der Wind eine entscheidende Komponente. Physikalisch wird dieser Zusammenhang über den Windstress beschrieben, welcher in der Regel die Bezeichnung Impulsfluss hat. Dieser ist nach Gl. (2.18) abhängig von einem Transportkoeffizienten, welcher Dragkoeffizient genannt wird. Der Dragkoeffizient ist eine Funktion der Windgeschwindigkeit und ist die entscheidende Größe für den Impulsfluss, so dass es ausreicht sich den Dragkoeffizienten näher zu betrachten. Um den Dragkoeffizienten vergleichen zu können, muss er auf eine einheitliche Höhe umgerechnet werden. Diese beträgt in der Regel 10m. Das geschieht über das logarithmische Windprofil und wurde bereits vielfach gezeigt (z.B. Charnock (1955); Paulson (1970); Smith (1988)). Des Weiteren ist der Dragkoeffizient von der Stabilität abhängig und muss auf neutrale Bedingungen normiert werden. Auch hier soll auf frühere Arbeiten verwiesen werden (z.B. Dyer (1974); Smith (1988)).

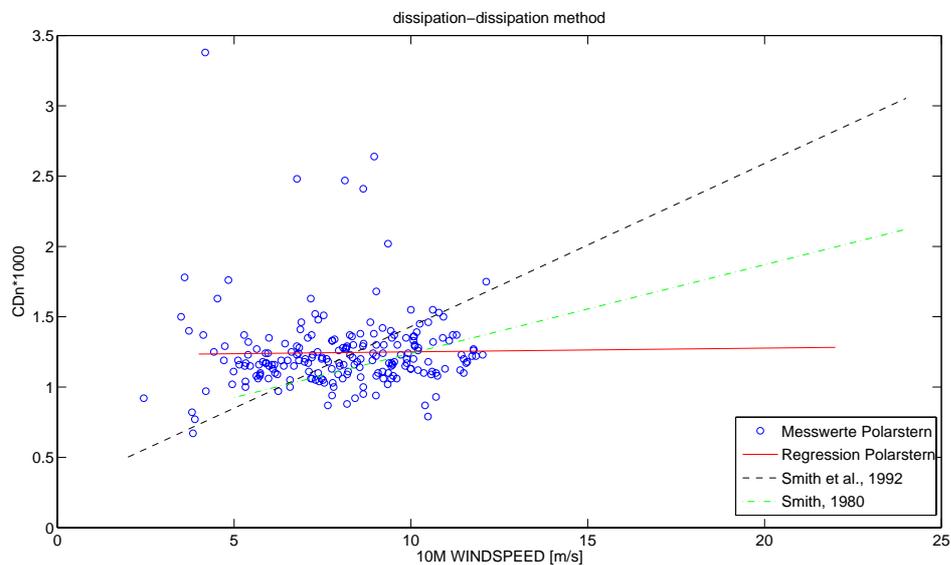
### 5.3.1 Expedition ANT XXIV-4

Viele Autoren haben bereits versucht, den Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Dragkoeffizient exakt zu parametrisieren. In den Abbildungen 5.28 und 5.29 sind die resultierenden Daten der Fahrt ANT XXIV-4 zusammen mit zwei Parametrisierungen von Smith (1980) und Smith et al. (1992) dargestellt.

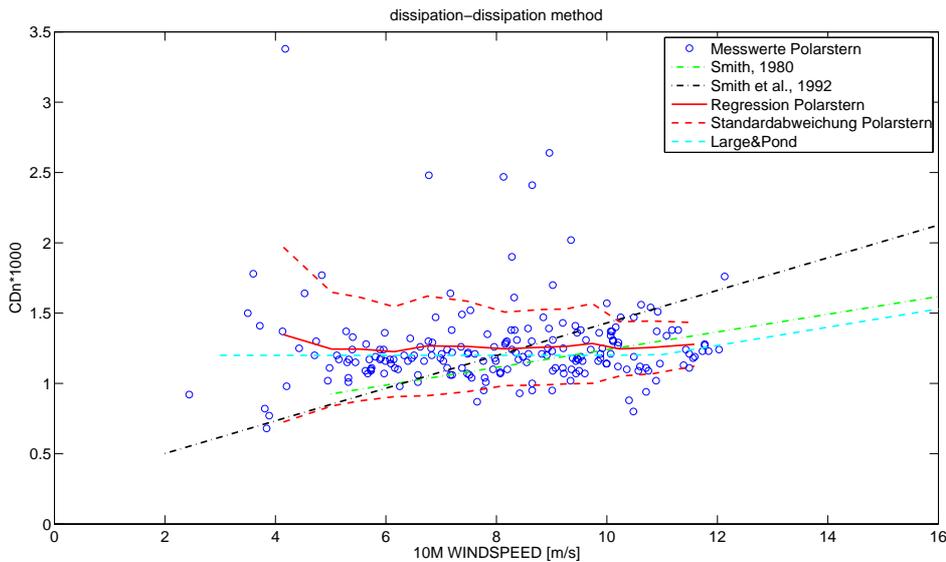
Es ist leicht zu erkennen, dass beide Plots annähernd gleiche Verläufe zeigen, da beide Dragkoeffizienten von den gleichen Sonicanemometerdaten ermittelt wurden. Es gingen einmal 200 (in Verbindung mit dem Licor) und einmal 210 (in Verbindung mit dem M100) Messwerte mit in die Berechnung eingehen. Die Regression wurde jetzt in beiden Fällen angepasst, indem die Windgeschwindigkeit in 13 Bereiche eingeteilt wurde. Für jeden Bereich wurde eine eigene Regression vorgenommen, in welche die Regression des vorderen (kleinere Windgeschwindigkeiten) Abschnitts und die Windgeschwindigkeit selber eingingen. Zudem wurde eine weitere Parametrisierung von Large und Pond (1981) eingefügt. Diese Parametrisierung unterscheidet sich von den anderen dadurch, dass sie einen konstanten Abschnitt hat, in dem der Dragkoeffizient nicht von der Windgeschwindigkeit abhängt (für  $u \leq 11 \text{ m/s}$ ) und einen Abschnitt, in welchem der Dragkoeffizient linear mit der Windgeschwindigkeit ansteigt ( $u \geq 12 \text{ m/s}$ ). Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.30 und 5.31 zu sehen.



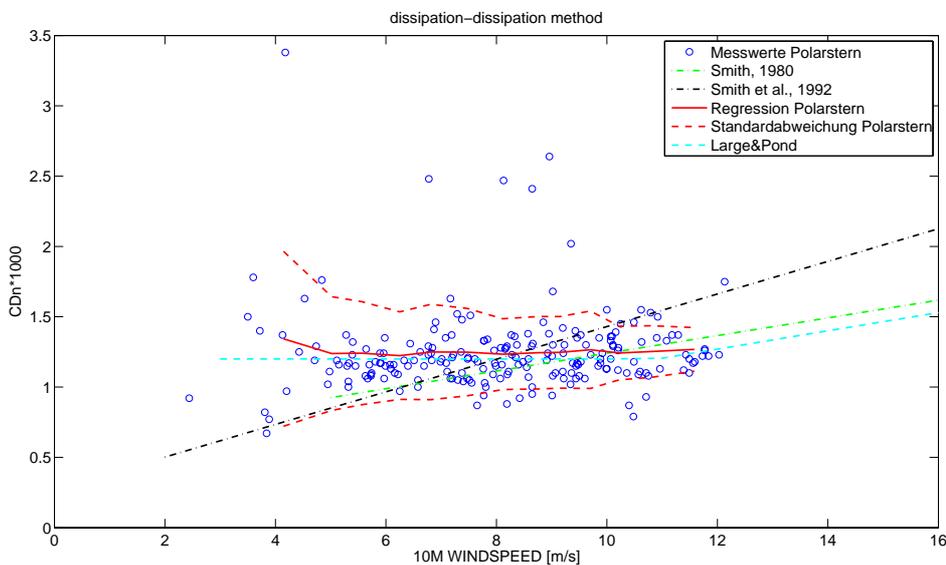
**Abb. 5.28:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest (Datensätze mit Licor)



**Abb. 5.29:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest (Datensätze mit M100)



**Abb. 5.30:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), gleitendes Mittel der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (Datensätze mit Licor)



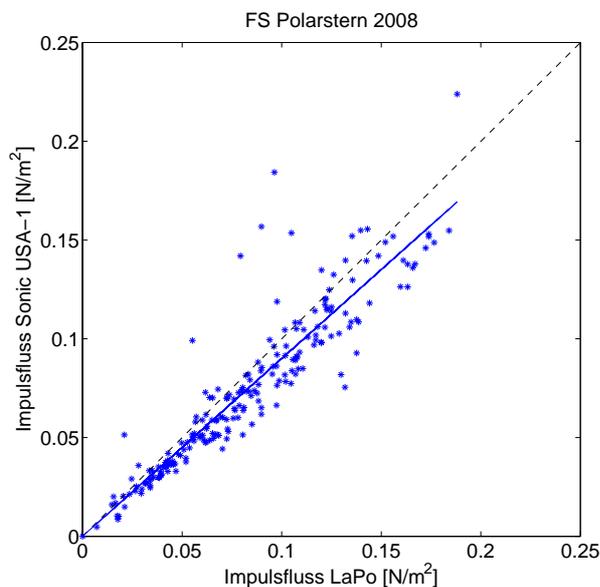
**Abb. 5.31:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), gleitendes Mittel der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (Datensätze mit M100)

## Impulsfluss Sonic USA-1

|                          | Smith80 | LaPo   | Smith92 |
|--------------------------|---------|--------|---------|
| Standardabw. ( $N/m^2$ ) | 0,0190  | 0,0163 | 0,0296  |
| Bias ( $N/m^2$ )         | 0,0064  | 0,0083 | 0,0159  |
| r                        | 0,9166  | 0,9190 | 0,9138  |

**Tab. 5.9:** Statistische Parameter verschiedener Parametrisierungen von Dragkoeffizienten in Verbindung mit den berechneten Dragkoeffizienten des Sonic USA-1.

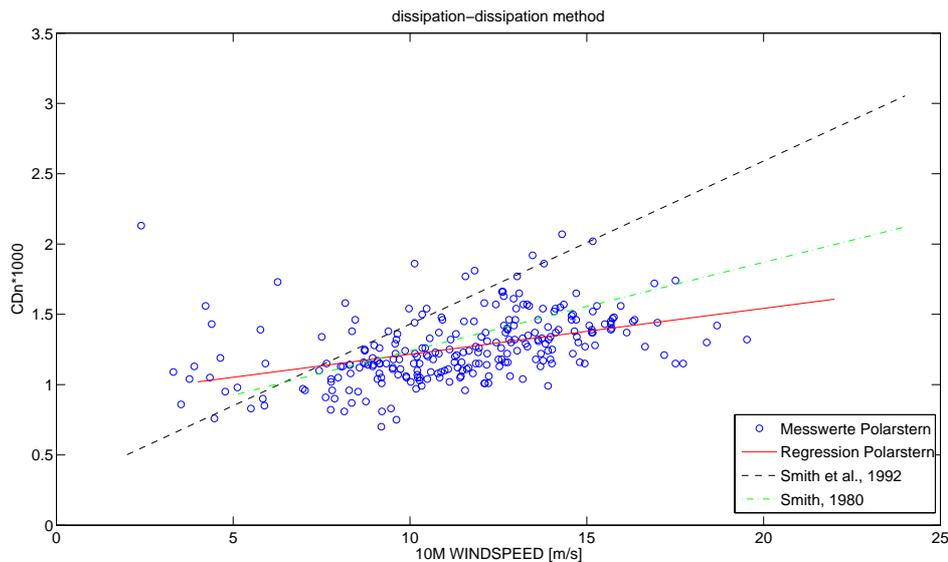
In Tabelle 5.9 sind die statistischen Parameter der Impulsflüsse, berechnet aus den Dragkoeffizienten und der Windgeschwindigkeit nach Gl. (2.18), des USA-1 gegen die der Parametrisierungen aufgetragen. Die Parametrisierung von Large und Pond (1981) stimmt mit den Daten des Sonic USA-1 am besten überein. Insgesamt sind die berechneten Flüsse aber nah an allen Parametrisierungen. Um den linearen Zusammenhang zu verdeutlichen, sind in Abbildung 5.32 die berechneten Impulsflüsse des Sonic USA-1 gegen die parametrisierten von Large und Pond aufgetragen. Die Parametrisierung überschätzt die berechneten Werte vom Sonicanemometer leicht. Insgesamt sind die Werte allerdings sehr ähnlich, wie bereits die statistischen Parameter gezeigt haben.



**Abb. 5.32:** Impulsfluss vom Sonic USA-1 auf dem Krähenest und von einer Parametrisierung von Large und Pond (1981)

### 5.3.2 Expedition ANT XXV-5

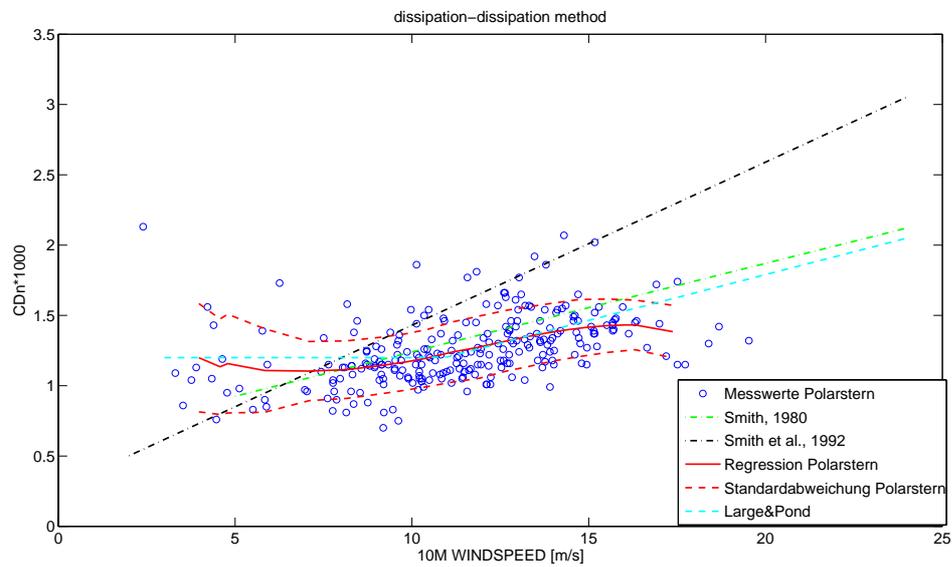
Der gleiche Vergleich soll mit den Daten der Polarsternexpedition ANT XXV-5 durchgeführt werden. In Abbildung 5.33 ist der Dragkoeffizient für das M100/Sonic-System zu erkennen. Die Regressionsgerade passt sehr gut zu der Parametrisierung von Smith (1980), auch wenn die Werte leicht erhöht sind. Die Regression wurde, wie schon bei ANT XXIV-4, durch ein gleitendes Mittel ersetzt, wobei in insgesamt 18 Teilbereiche getrennt wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.34 zu sehen.



**Abb. 5.33:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest.

Das gleitende Mittel der Dragkoeffizienten stimmt mit der Parametrisierung von Large und Pond (1981) überein. Um diese Übereinstimmung zu verdeutlichen, sind in Tabelle 5.10 die statistischen Parameter Standardabweichung, Bias und Korrelationskoeffizient für die Impulsflüsse dargestellt. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen Messdaten und theoretischen Parametrisierungen in allen Fällen sehr groß ist.

Wie schon 2008 werden die Werte vom Sonic USA-1 erneut gegen die Parametrisierung von Large und Pond (1981) aufgetragen (Abbildung 5.35), da auch diese wieder die beste Übereinstimmung mit den berechneten Werten zeigt (Tabelle 5.10). Wiederum analog zu 2008 ist die Überschätzung der Parametrisierung, was hauptsächlich an den Werten für große Windgeschwindigkeiten, also den höheren Impulsflüssen, liegt, vergleichbar mit der Abbildung für den Dragkoeffizienten (Abbildung 5.31).

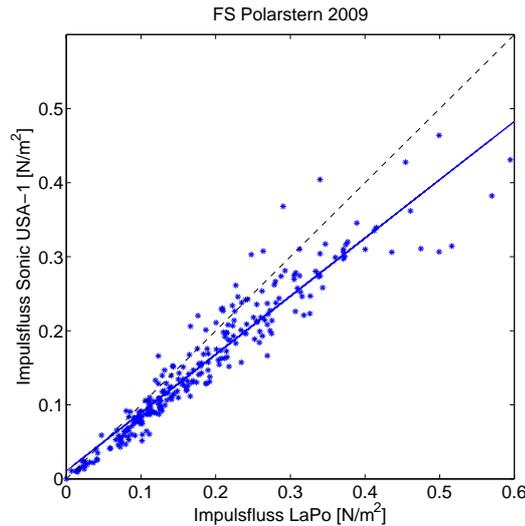


**Abb. 5.34:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), angepasste Regression der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest.

#### Impulsfluss Sonic USA-1

|              | Smith80 | LaPo   | Smith92 |
|--------------|---------|--------|---------|
| Standardabw. | 0,0434  | 0,0378 | 0,0836  |
| Bias         | 0,0390  | 0,0294 | 0,0868  |
| r            | 0,9553  | 0,9523 | 0,9513  |

**Tab. 5.10:** Statistische Parameter verschiedener Parametrisierungen des Impulsflusses in Verbindung mit dem berechneten Impulsfluss des Sonic USA-1 auf dem Krähenest.

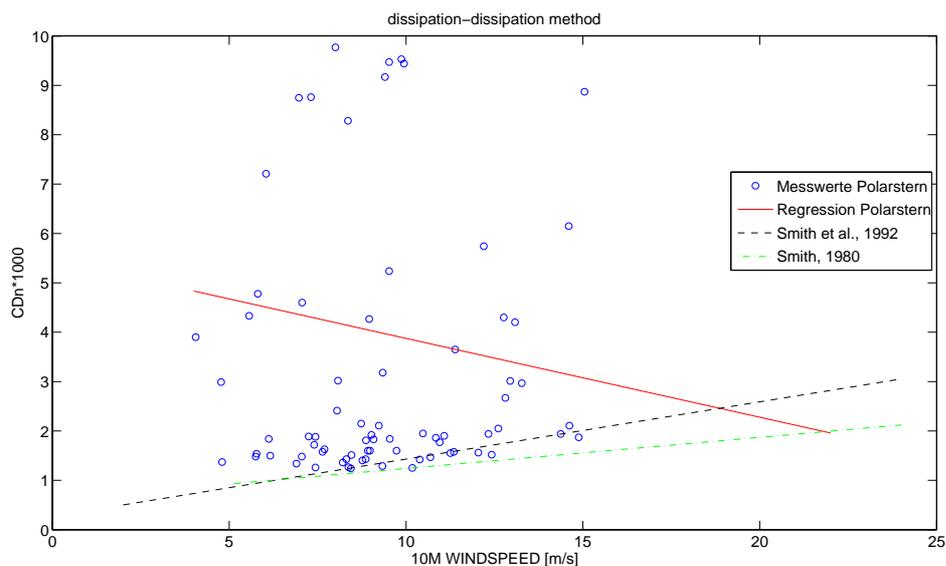


**Abb. 5.35:** *Impulsfluss vom Sonic USA-1 auf dem Krähennest und von einer Parametrisierung von Large und Pond (1981)*

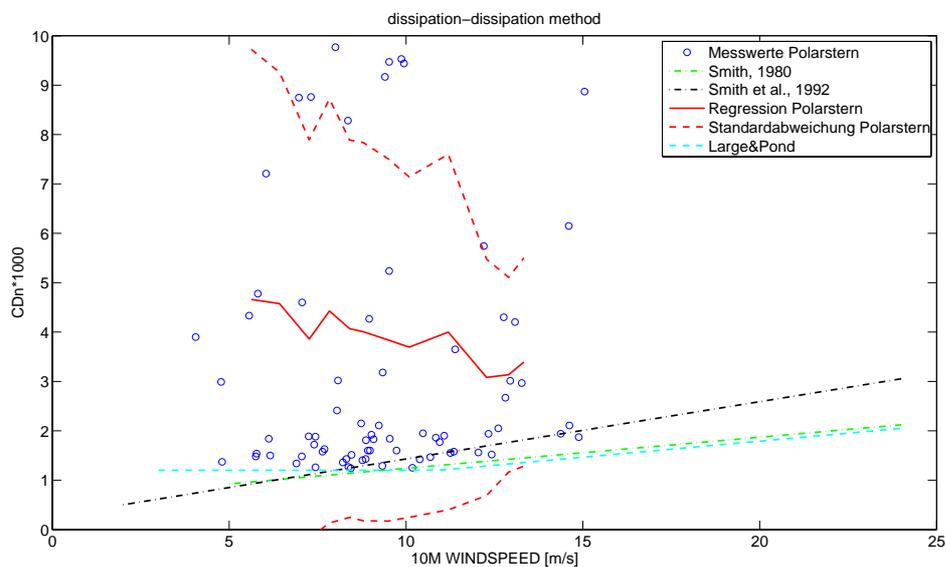
Die Berechnung des Dragkoeffizienten, wie auch der Flüsse fühlbarer und latenter Wärme, ergab wie bereits erwähnt nach allen Auswahlkriterien für das neue Sonic (plus Licor beim Fluss latenter Wärme) 80 Datensätze. In Abbildung 5.36 ist analog zu den vorherigen Bildern der Dragkoeffizient als Funktion der Windgeschwindigkeit mit zwei Parametrisierungen von Smith (1980) und Smith et al. (1992) dargestellt. Der Ausschnitt ist in diesem Fall größer (0 bis 10), da Werte auftreten, die wesentlich höher sind als alle bisher gezeigten (sowohl diese als auch letzte Fahrt). Dies beeinflusst die Regressionsgerade, welche einen negativen Anstieg und einen interpolierten Schnittpunkt mit der y-Achse von knapp 5 hat. Das widerspricht den Parametrisierungen, welche den Dragkoeffizienten als Produkt aus positivem Vorfaktor und Windgeschwindigkeit berechnen. Auch die vorher beschriebene, angepasste Regression (Abbildung 5.37) stellt keine Verbesserung dar, da hohe Werte für den Dragkoeffizienten weiterhin einen großen Einfluss auf die Regression haben und nur in 12 Bereiche unterteilt wurde. Interessant ist, dass die Standardabweichung (rotgestrichelte Linie) Werte von über 3 annimmt und damit selber größer ist, als die erwarteten Absolutwerte für den Dragkoeffizienten.

Die aus den Dragkoeffizienten berechneten Impulsflüsse wurden wieder mit drei Parametrisierungen verglichen (Tabelle 5.11). Bei allen drei fällt auf, dass sowohl Standardabweichung als auch Bias in der gleichen Größenordnung liegen wie die Impulsflüsse und auch der Korrelationskoeffizient deutlich kleiner ist als beim Sonic USA-1 und daher mehr mit den Korrelationen der Wärmeflüsse übereinstimmt.

Auch hier soll der Impulsfluss graphisch betrachtet werden. Er wird mit der Para-



**Abb. 5.36:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem neuen Sonic auf dem Peildeck.

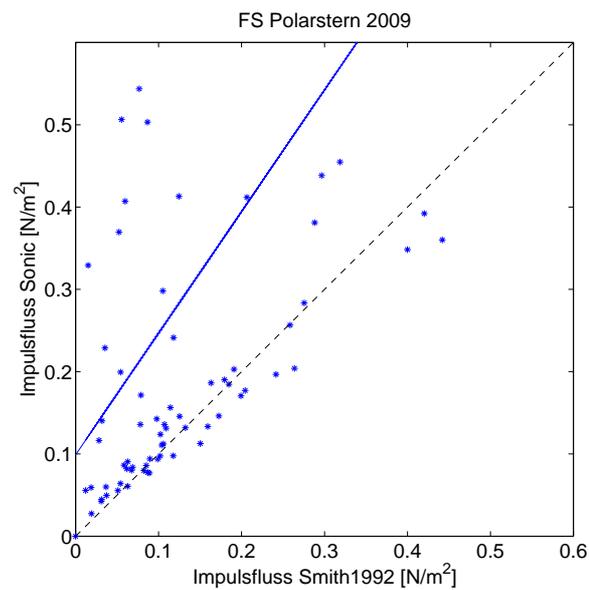


**Abb. 5.37:** Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), gleitendes Mittel der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem neuen Sonic auf dem Peildeck.

## Impulsfluss neues Sonic

|              | Smith80 | LaPo   | Smith92 |
|--------------|---------|--------|---------|
| Standardabw. | 0,2879  | 0,2899 | 0,2821  |
| Bias         | 0,1853  | 0,1871 | 0,1648  |
| r            | 0,4963  | 0,5007 | 0,4966  |

**Tab. 5.11:** Statistische Parameter verschiedener Parametrisierungen von Impulsflüssen in Verbindung mit den berechneten Impulsflüssen des neuen Sonic auf dem Peildeck.



**Abb. 5.38:** Impulsfluss vom neuen Sonic auf dem Peildeck und von einer Parametrisierung von Smith et al. (1992)

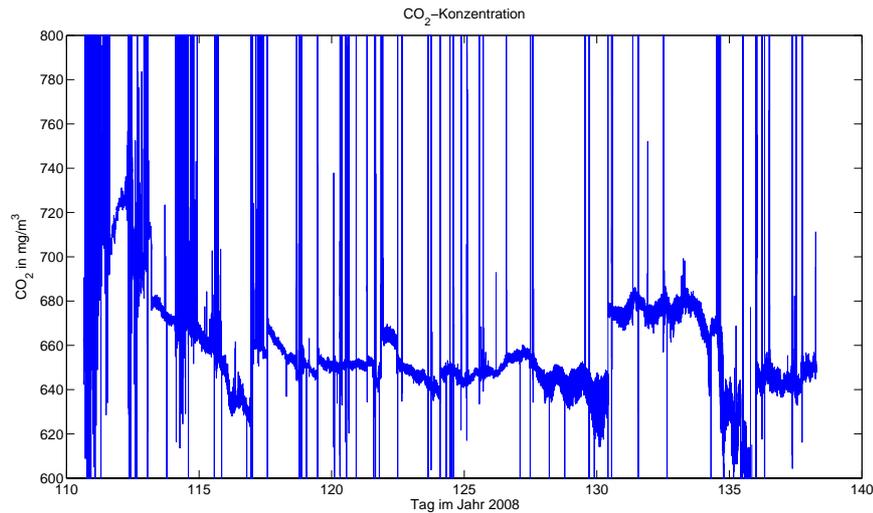
metrisierung von Smith et al. (1992) verglichen (Abbildung 5.38), welche anhand Tabelle 5.11 die beste (wenn auch geringe) Übereinstimmung zeigt. Wie schon beim Dragkoeffizienten gesehen, sind die gemessenen und damit berechneten Werte vom Sonic eindeutig zu hoch und mit der Parametrisierung nicht mehr vergleichbar.

Die Berechnungen des Dragkoeffizienten zeigen für das "alte" Ultraschallanemometer (Sonic USA-1), welches bei allen Messungen auf dem Krähenest angebracht war, eine sehr gute Übereinstimmung mit vorhergegangenen Arbeiten bzw. den aus diesen Arbeiten benutzen Parametrisierungen für die Dragkoeffizienten. Alle Werte wurden mit drei Parametrisierungen verglichen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)), wobei sich jene von Large und Pond (LaPo) als diese erwiesen hat, mit der die in dieser Arbeit verwendeten Werte am besten übereinstimmen. LaPo gehen dabei anders als vorherige Autoren vor und argumentieren, dass der Dragkoeffizient bei kleinen Windgeschwindigkeiten (bis 11  $m/s$ ) nicht von diesen abhängt und erst bei größeren ein linearer Zusammenhang herrscht. Diese Beziehung ist bei allen Messungen mit dem Sonic USA-1 sehr gut nachgewiesen worden.

In den Ergebnissen für den Dragkoeffizienten mit dem neuen Sonic ist dagegen kein Zusammenhang erkennbar, welche einer Parametrisierung ähneln würde. Das mag weniger an den Berechnungen liegen, sondern vielmehr an der Messposition und damit an den Messdaten. Das neue Sonic hat 2009 auf dem Peildeck gemessen und dieser Platz wurde bereits zuvor als ungeeignet eingeschätzt, was bestätigt wurde. Da man auch bei den Wärmeflüssen schlechtere Ergebnisse für die Peildeckmessungen mit dem neuen Sonic/Licor-System erhalten hat, ist es zu empfehlen die Messungen auf dem Peildeck nicht durchzuführen.

## 5.4 $CO_2$ -Fluss

Ein weiterer Aspekt dieser Diplomarbeit sollte der  $CO_2$ -Fluss zwischen Ozean und Atmosphäre sein. Auch hier soll zunächst auf die erste Fahrt 2008 näher eingegangen werden. Betrachtet man noch einmal die Rohdaten der  $CO_2$ -Dichte von dieser Fahrt (Abbildung 5.39) so erkennt man, wie schon in Kap. 4 erwähnt, dass die Zeitreihen des  $CO_2$  stark durch Fluktuationen bzw. Ausreißer dominiert sind.



**Abb. 5.39:** Originaldaten der  $CO_2$ -Konzentration gemessen mit dem Licor 2008

Für die Berechnung der Flüsse vom Kohlendioxid ist es üblich die Konzentration in den Partialdruck  $pCO_2$  umzurechnen, wobei der Partialdruck ( $[pCO_2]=\mu atm$ ) äquivalent mit dem Molanteil ( $[pCO_2]=ppm$ ) ist. Bei der Umrechnung sind Temperatur und Druck von entscheidender Bedeutung gemäß Gl. (5.1).

$$pCO_2 = \frac{\rho_c R(T + 273.15)}{p} \quad (5.1)$$

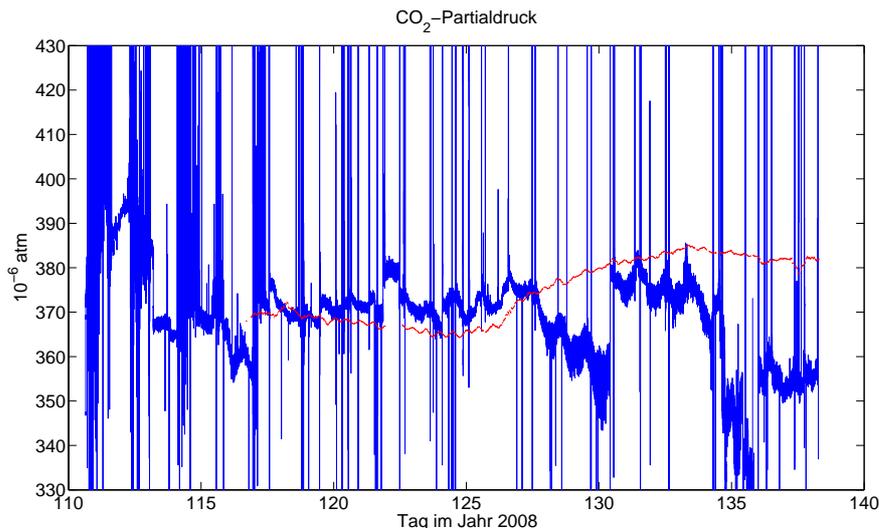
$\rho_c$  ist die Teilchendichte des  $CO_2$  (also der gemessene Wert des Licor),  $R^1$  die allgemeine Gaskonstante,  $T$  (in °C) die gemessene Temperatur des Licor und  $p$  (in kPa) der gemessene Druck vom Licor.

In Abbildung 5.40 ist der Partialdruck vom  $CO_2$  für die Fahrt ANT XXIV-4 dargestellt.

Vorteilhaft an dieser Darstellung ist, dass der Einfluss von Temperatur und Druck entscheidend in die Messgröße mit eingehen und somit im Nachhinein nicht explizit

---

<sup>1</sup>R=8.314 Nm/(mol K)



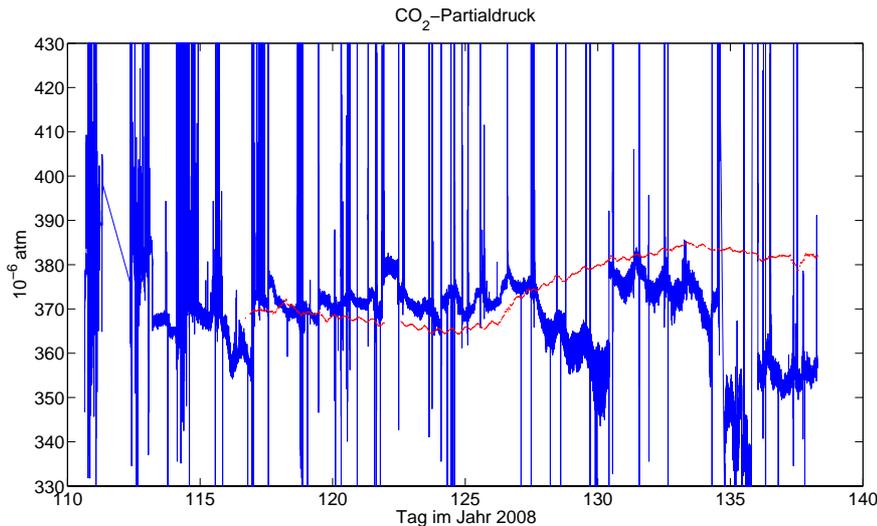
**Abb. 5.40:** Partialdruck des CO<sub>2</sub> während ANT XXIV-4, bestimmt aus den Licor-Messungen von Temperatur, Druck und CO<sub>2</sub>-Konzentration auf dem Krähennest (blau) und Messungen der Meereschemiker auf dem Peildeck (rot).

betrachtet werden müssen. Vergleicht man die beiden Graphiken von 2008 (ANT XXIV-4) (Abbildungen 5.39 und 5.40) sieht man allerdings, dass auch das Umrechnen keine Verbesserung der Daten gebracht hat. Zum Vergleich sind die von den Meereschemikern des IFM-GEOMAR gemessenen Partialdrücke des atmosphärischen CO<sub>2</sub> ebenfalls dargestellt, welche in Auflösung von einer Minute vorliegen.<sup>2</sup>

Es wurde versucht die in Kap. 3.2.2.2 beschriebene Cross-Sensitivity zwischen Kohlendioxid und Wasserdampf näher zu untersuchen. Bei Zeitschritten, bei denen die Wasserdampfdichte einen Ausreißer aufweist, wird auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration entsprechend beeinflusst. Diese Zeitschritte wurden in den Daten vernachlässigt. Auch für diesen Fall soll die Zeitreihe zusammen mit den Daten aus der Meereschemie gezeigt werden (Abbildung 5.41).

Die Dichte der Fehler hat sich leicht verringert. Dennoch sind die Zeitreihen weiterhin durch diverse Ausreißer dominiert. Des Weiteren hat sich auch die Schwankungsbreite nicht verringert. Die Werte bewegen sich weiterhin in einem Intervall von bis zu 100  $\mu atm$  für ANT XXIV-4. Die Frage stellt sich nach den Ursachen für diese recht ungewöhnlichen Abweichungen. Ein erster Punkt könnte die Position des Licors auf dem Krähennest sein. Die Position kann sich theoretisch bei bestimmten Windverhältnissen in der Abluftfahne des großen Schornsteins der Polarstern befinden. Da die Polarstern allerdings meistens fährt und dadurch der relative Wind in der Regel

<sup>2</sup>Daten von Tobias Steinhoff; tsteinhoff@ifm-geomar.de



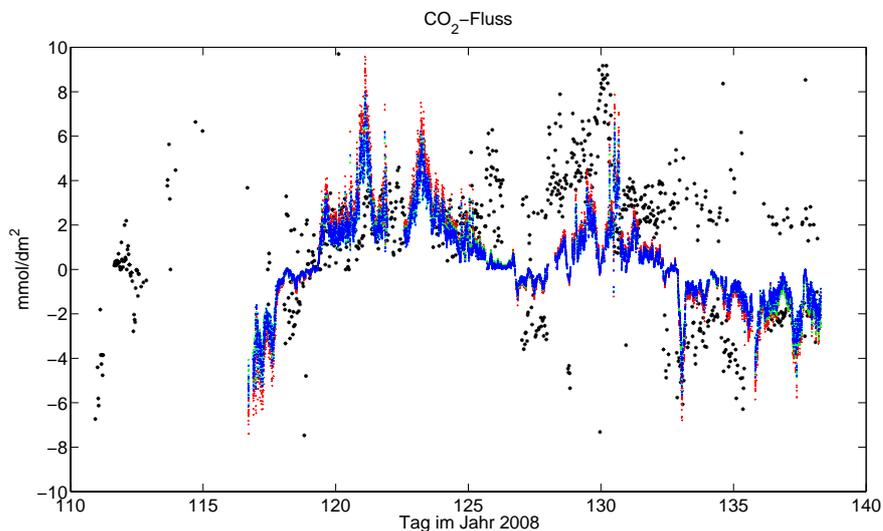
**Abb. 5.41:** *Partialdruck des  $CO_2$  während ANT XXIV-4 auf dem Krähennest (blau): Zeitschritte mit fehlerhaften Wasserdampfwerten wurden vernachlässigt. In rot erneut die Messungen der Meereschemiker.*

selten von hinten kommt, dürften diese Bedingungen nicht für permanente Fehler in den Daten verantwortlich sein und außerdem werden sowieso nur Daten benutzt, bei denen der Wind aus  $\pm 60^\circ$  längs zur Schiffsachse weht.

Um die Flüsse zu berechnen wurde das oben erwähnte Turbulenzprogramm erneut verwendet. Die Analogie besteht darin, dass jetzt anstelle des Wasserdampfes (genauer: Wasserdampfdichte) die  $CO_2$ -Konzentration benutzt wurde. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Flussdaten zu erreichen, wurden die Daten des  $CO_2$ -Partialdruckes benutzt (Abbildung 5.40). In Abbildung 5.42 sind die Zeitreihen der Flüsse des  $CO_2$  aus den Dissipationsergebnissen zusammen mit 4 Parametrisierungen<sup>3</sup> dargestellt. Die Ableitung der parametrisierten Flüsse  $F_{CO_2}$  erfolgt nach Gleichung (2.40). Verwendet wurden alle Datensätze, welche vom Turbulenzprogramm ausgerechnet wurden (840 Werte). Da es bei der Dissipationsmethode nicht möglich ist, das Vorzeichen der Flüsse zu bestimmen, wurden die Daten zusätzlich noch mit den Parametrisierungen verglichen. Bei annähernd gleichen Zeitschritten (Karenz: ein Tausendstel Tag, also ca. 1,5 Minuten) wurden die Vorzeichen verglichen, und gegebenenfalls wurde der negative Dissipationswert verwendet, wenn der parametri-

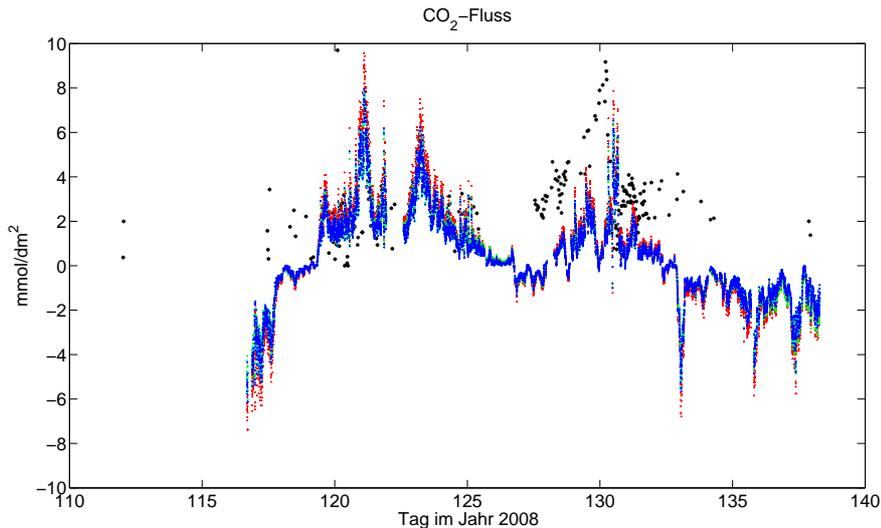
<sup>3</sup>Zur Ableitung der parametrisierten Flüsse wurden Daten der Meereschemie verwendet, welche die  $CO_2$ -Konzentration in Ozean und Atmosphäre gemessen haben. Parametrisierungen für den Transferkoeffizienten von Wanninkhof (1992), Nightingale et al. (2000), Ho et al. (2006) und Sweeney et al. (2007). Daten freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Tobias Steinhoff, IFM-GEOMAR.

sierte Wert auch negativ ist. Auch die hier verwendeten Dissipationsdaten wurden weiter untersucht; das Prinzip war dabei dasselbe, wie für die Flüsse latenter Wärme. Nach diesen Vereinfachungen blieben 212 Datensätze übrig, welche in Abbildung 5.43, wieder zusammen mit den Parametrisierungen, dargestellt sind.



**Abb. 5.42:**  $CO_2$ -Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind alle 840 ausgerechneten Datensätze gezeigt.

Beim Betrachten aller Werte fällt auf, dass die Dissipationswerte teilweise stark streuen. Ein Vergleich mit den Parametrisierungen ist erst ab dem 116. Tag (25.04.09) möglich, da vorher keine Werte von der Meereschemie vorhanden sind. Von diesem Tag an bis Tag 126 (05.05.09) stimmen die berechneten Dissipationswerte mit den Parametrisierungen gut überein und bewegen sich in der Größenordnung von  $0-5 \text{ mmol/dm}^2$ . Danach weichen die Dissipationswerte stärker ab und wechseln häufiger das Vorzeichen. Die Wahl des Vorzeichens hängt wie bei der Parametrisierung vom Vorzeichen der Differenz des  $CO_2$ -Partialdrucks zwischen Ozean und Atmosphäre ab. Ein positives Vorzeichen bedeutet in diesem Fall einen Gewinn an  $CO_2$  für den Ozean, wie bei den Chemikern üblich, im Gegensatz zu meteorologischen Flussbetrachtungen. Insgesamt liegt der Großteil der Werte allerdings durchaus in einem realistischen Rahmen. Bei der weiteren Glättung der Daten, aufgrund der Rahmenbedingungen für die Gültigkeit der Dissipationsmethode, ist dieses Verhalten ebenfalls zu erkennen. Im Zeitraum von den Tagen 119-125 liegen die Werte weiterhin sehr nah an den Parametrisierungen und für den Zeitraum Tag 128-132 liegen sie darüber. Allerdings ist der Trend in den Daten mit dem der Parametri-



**Abb. 5.43:**  $CO_2$ -Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind nur die Datensätze gezeigt, welche nach den Vereinfachungen übrig geblieben sind.

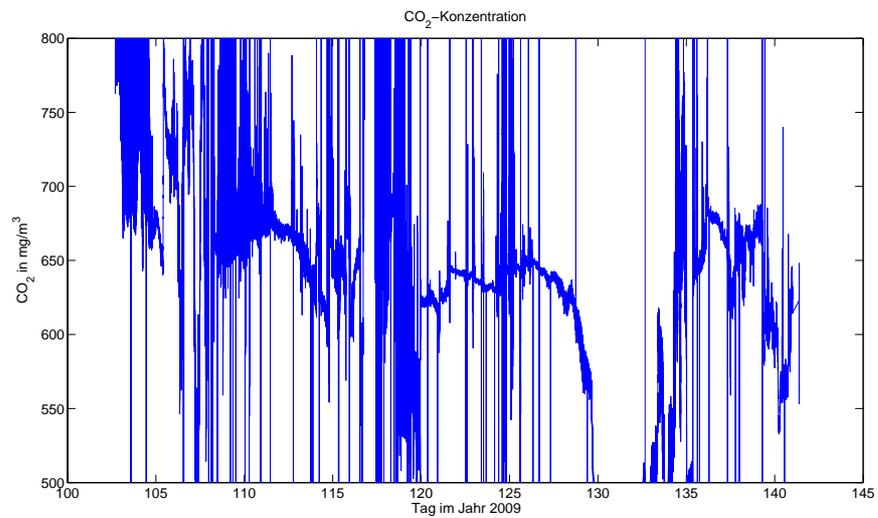
sierungen vergleichbar. Es bleiben zwei Zeiträume übrig in denen Bedingungen, wie z.B. Wind von vorn, herrschten, die eine Flussberechnung sinnvoll machen.

Auch für die Fahrt ANT XXV-5 soll das gleiche Verfahren angewendet werden. Zuerst sind nochmal die Daten der  $CO_2$ -Dichte des Licor dargestellt (Abbildung 5.44). Wie bereits in Kap. 4 erwähnt, sind die Daten durch Ausreißer dominiert und die Amplitude ist sogar noch größer als ein Jahr zuvor bei der Fahrt ANT XXIV-4.

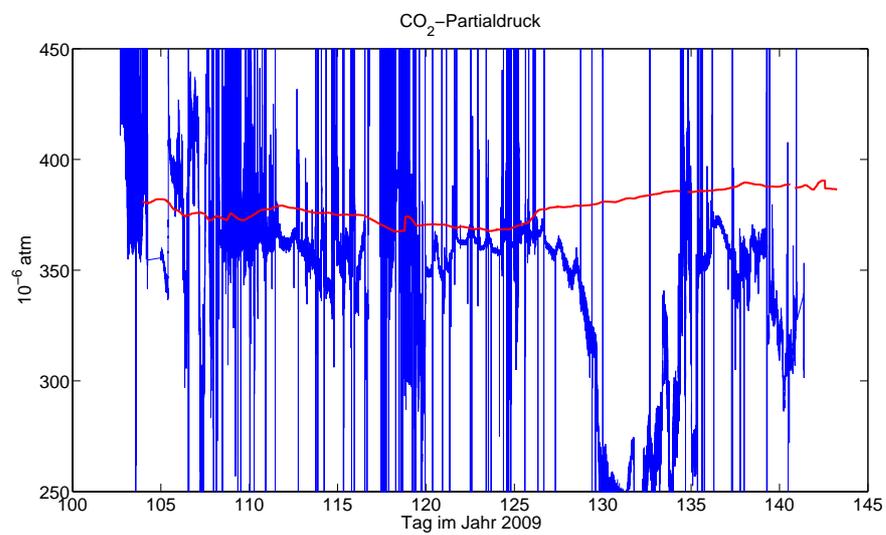
Analog zum vorher beschriebenen Vorgehen wurden auch diese Daten zuerst nach Gl. 5.1 in den Partialdruck umgerechnet (Abbildung 5.45) und anschließend wiederum die Werte vernachlässigt, bei den keine vernünftigen Wasserdampfwerte vorhanden sind (Abbildung 5.46). In beiden Abbildungen sind zum Vergleich die Messungen der Meereschemie des IfM-Geomar dargestellt<sup>4</sup>.

Auch hier hat sich mit diesen Umrechnungen bzw. Glättungen der Daten zumindestens auf den ersten Blick keine Verringerung der Ausreißer eingestellt. Ursache könnte erneut die Position des Licors (Peildeck) sein, wobei die freie Anströmung der Luft auch hier gewährleistet sein sollte. Damit dürfte der Einfluss der Abluftfahne hier keine Rolle spielen und es ist zu vermuten, dass die Position dadurch benachteiligt ist, dass der Sensor nicht permanent trocken gewesen ist, wie bereits

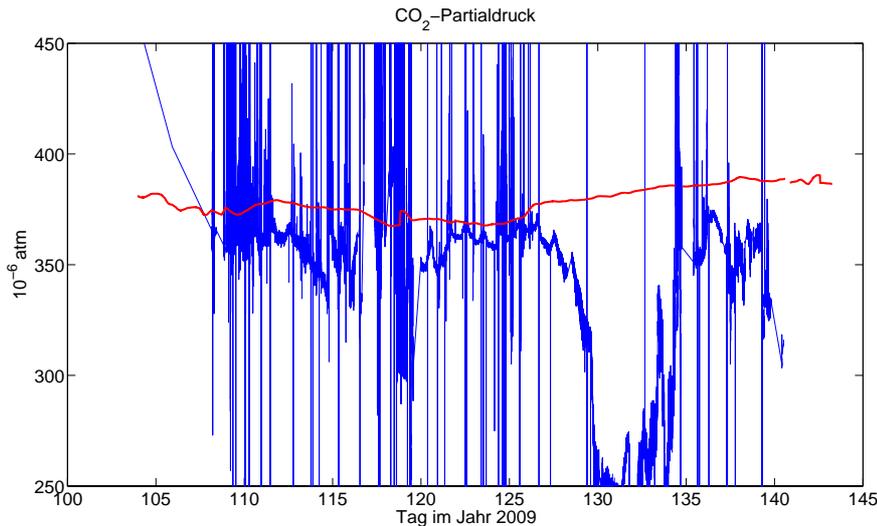
<sup>4</sup>Daten von Björn Fiedler (IfM-Geomar); bfiedler@ifm-geomar.de



**Abb. 5.44:** Originaldaten der CO<sub>2</sub>-Konzentration, gemessen mit dem Licor 2009 auf dem Peildeck.



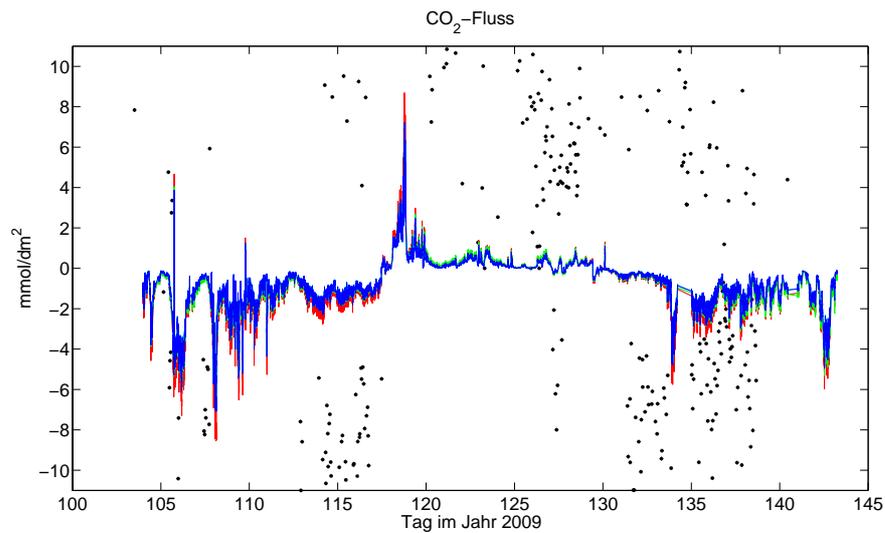
**Abb. 5.45:** Partialdruck des CO<sub>2</sub> während ANT XXV-5, bestimmt aus den Licor-Messungen von Temperatur, Druck und CO<sub>2</sub>-Konzentration auf dem Peildeck (blau). In rot sind die Messungen der Meereschemiker dargestellt.



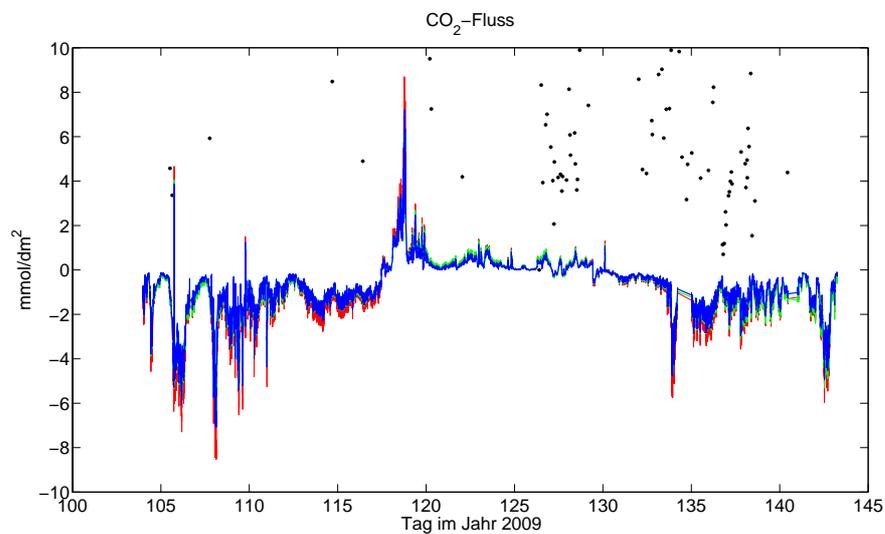
**Abb. 5.46:** *Partialdruck des  $CO_2$  während ANT XXV-5, gemessen auf dem Peildeck (blau): Zeitschritte mit fehlerhaften Wasserdampfwerten wurden vernachlässigt. In rot sind die Messungen der Meereschemiker dargestellt.*

bei den Wärmeflüssen (Kap. 5.2.2).

Auch mit den 2009 gewonnenen Messdaten für die  $CO_2$ -Konzentration wurden wieder die  $CO_2$ -Flüsse berechnet und mit den parametrisierten Flüssen verglichen, welche von der Chemischen Ozeanographie des IfM-Geomar zur Verfügung gestellt wurden. In Abbildung 5.47 sind die Flüsse dargestellt, welche mit der Dissipationsmethode bestimmt wurden zusammen mit den Parametrisierungen. Bei den Parametrisierungen handelt es sich um die gleichen, mit denen schon 2008 verglichen wurde. Insgesamt ergaben sich mit der Dissipationsmethode 518 Datensätze, welche allerdings nicht alle zu sehen sind, da viele einen enorm hohen Wert haben und hier nicht gezeigt sind. Verglichen mit 2008 fällt auf, dass die Dissipationsergebnisse diesmal stark von den Parametrisierungen abweichen und generell fast durchgängig größer sind. Auch nach der Glättung der Daten (Abbildung 5.48) ergibt sich kein anderes Bild. In diesem Fall bleiben wenig Werte übrig und diese streuen teilweise stark und sind mit den Parametrisierungen kaum vergleichbar. Auch hier kommt die Vermutung auf, dass diese Ergebnisse hauptsächlich mit der Position des Licor auf dem Peildeck zusammenhängen.



**Abb. 5.47:** CO<sub>2</sub>-Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind alle 518 ausgerechneten Datensätze gezeigt.



**Abb. 5.48:** CO<sub>2</sub>-Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind nur die Datensätze gezeigt, welche nach den Vereinfachungen übrig geblieben sind.

Zusammenfassend für den  $CO_2$ -Fluss ist zu sagen, dass die Bestimmung der Flüsse mit der Dissipationsmethode keine zufriedenstellenden Ergebnisse hervorgebracht hat. Nimmt man an, dass die Parametrisierungen, welche von der Meereschemie verwendet wurden, der Realität nahe kommen - die Annahme erscheint gerechtfertigt, da die Parametrisierungen untereinander nahezu identisch sind -, so weichen die Dissipationsergebnisse stark von diesen ab. Auch für diese Messungen ist wieder eine Positionsabhängigkeit auszumachen. So sind die Flüsse, welche aus Messungen auf dem Krähennest 2008 bestimmt wurden, eindeutig eher in Zusammenhang mit den Parametrisierungen zu bringen, als die Flüsse aus dem Jahr 2009, welche aus Peildeckmessungen berechnet wurden.

## 6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die Untersuchung der Durchführbarkeit für Messungen turbulenter Flüsse auf dem Forschungsschiff Polarstern hat sehr unterschiedliche Ergebnisse hervorgebracht. Messungen mit dem "alten" Sonicanemometer USA-1 auf dem Krähennest sowohl in Verbindung mit dem M100-Hygrometer als auch mit dem Licor-Hygrometer haben gezeigt, dass das Krähennest sich durchaus als Position eignet, an der Turbulenzmessungen vorgenommen werden können, obwohl die Höhe mit knapp 30 Metern eher als nachteilig vermutet wurde und die Polarstern im Allgemeinen aufgrund ihrer Form nicht für Turbulenzmessungen geeignet zu sein scheint. Die Ergebnisse für die einzelnen Flüsse sind sehr gut mit früheren Parametrisierungen vergleichbar, so zum Beispiel der Fluss latenter Wärme mit der Parametrisierung von Smith (1988), der Fluss fühlbarer Wärme ebenfalls mit jener von Smith (1988) und auch einer weiteren von Smith (1980) und der Dragkoeffizient - und damit der Impulsfluss - mit einer Parametrisierung von Large und Pond (1981). Das Krähennest sollte als Messposition für kommende Polarsternexpeditionen auf jeden Fall erhalten bleiben, sei es als Vergleichsmessung zum Peildeck oder weiterhin als Hauptstandort.

Die Messungen auf dem Peildeck sind schlechter ausgefallen als auf dem Krähennest. Sowohl bei den Wärmeflüssen als auch beim Dragkoeffizient/Impulsfluss sind Vergleiche mit Bulkparametrisierungen nicht sinnvoll. In allen Fällen überschätzen die Ergebnisse die Parametrisierungen und es ist davon auszugehen, dass das an der Position liegt. Auch beim  $CO_2$ -Fluss zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Messungen auf dem Krähennest sind besser mit Parametrisierungen vergleichbar, als jene auf dem Peildeck. Allerdings ist beim  $CO_2$ -Fluss zu erwähnen, dass die Ergebnisse generell nicht überzeugend sind und eine weitere Bestimmung der Flüsse aus hochaufgelösten Daten weiter untersucht werden muss, um dort in Zukunft mögliche Verbesserungen zu erreichen. Weitere Messkampagnen auf dem neuen OCEANET-Container können Aufschluss darüber bringen. Dieser Container arbeitet nahezu autonom und wird erstmals auf der Polarsternexpedition ANT XXVI-1 im Herbst 2009 auf der Fahrt von Bremerhaven (Deutschland) nach Punta Arenas (Chile) zum Einsatz kommen. Die Turbulenzmessgeräte werden auf dem Container installiert sein und somit ca. 3 m höher als an der Reling auf dem Peildeck messen. Diese neue Position kann

durchaus komplett andere Ergebnisse als die Peildeckmessung hervorbringen.

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                                                                                  |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Schema der Energiebilanz der Erde nach Kiehl und Trenberth (1997)                                                                                                                                | 5  |
| 2.1  | Kospektrum vom Fluss fühlbarer Wärme (links) und Spektrum der Schiffsbewegungen (rechts).                                                                                                        | 11 |
| 2.2  | Schematische Darstellung eines Energiespektrums mit Einteilung in Bereiche.                                                                                                                      | 13 |
| 3.1  | Ultraschallanemometer Sonic USA-1 auf dem Krähennest.                                                                                                                                            | 17 |
| 3.2  | Ultraschallanemometer auf dem Peildeck während ANT XXV-5.                                                                                                                                        | 18 |
| 3.3  | M100 auf dem Krähennest während ANT XXV-5.                                                                                                                                                       | 19 |
| 3.4  | LI-7500-Absorptionshygrometer (Licor).                                                                                                                                                           | 21 |
| 4.1  | Kursplot von ANT XXIV-4 (rot) und ANT XXV-5 (blau)                                                                                                                                               | 25 |
| 4.2  | Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem M100, angebracht am Krähennest.                                                                                                             | 27 |
| 4.3  | Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem Licor, angebracht am Krähennest.                                                                                                            | 28 |
| 4.4  | Geglättete absolute Feuchten des M100 (grün) und des Licor (blau) und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot), alle auf dem Krähennest gemessen.                                                  | 29 |
| 4.5  | Auf dem Krähennest gemessene, minütlich gemittelte und auf den gleichen Zeitschritt gebrachte absolute Feuchten des M100 (grün) und des Licor (blau) und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot). | 29 |
| 4.6  | Streuplots der in Abb. 4.5 gezeigten Daten von M100 (links) und Licor (rechts) mit den Schiffsdaten unter verschiedenen Stabilitätsbedingungen: instabil (grün), stabil (blau) und neutral (rot) | 30 |
| 4.7  | Originaldaten der Lufttemperatur gemessen mit dem Licor (blau) und Borddaten (rot).                                                                                                              | 31 |
| 4.8  | Originaldaten des Luftdrucks gemessen mit dem Licor (blau) und Borddaten (rot).                                                                                                                  | 32 |
| 4.9  | Originaldaten der $CO_2$ -Konzentration gemessen mit dem Licor                                                                                                                                   | 33 |
| 4.10 | Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem M100 auf dem Krähennest.                                                                                                                    | 35 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.11 | Originaldaten der absoluten Feuchte gemessen mit dem Licor auf dem Peildeck. . . . .                                                                                                                                                                             | 35 |
| 4.12 | Geglättete absolute Feuchten des M100 (grün) auf dem Krähennest und des Licor (blau) auf dem Peildeck und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot), ebenfalls auf dem Krähennest. . . . .                                                                          | 36 |
| 4.13 | Minütlich gemittelte und auf den gleichen Zeitschritt gebrachte absolute Feuchten des M100 (grün) auf dem Krähennest und des Licor (blau) auf dem Peildeck und Feuchtedaten der Bordwetterwarte (rot), ebenfalls auf dem Krähennest. . . . .                     | 37 |
| 4.14 | Streuplots der in Abb. 4.13 gezeigten Daten von M100 (links) auf dem Krähennest und Licor (rechts) auf dem Peildeck mit den Schiffsdaten (vom Krähennest) unter verschiedenen Stabilitätsbedingungen: instabil (grün), stabil (blau) und neutral (rot) . . . . . | 38 |
| 4.15 | Originaldaten der Lufttemperatur gemessen mit dem Licor (blau) vom Peildeck und Borddaten (rot). . . . .                                                                                                                                                         | 38 |
| 4.16 | Originaldaten des Luftdrucks gemessen mit dem Licor (blau) auf dem Peildeck und Borddaten (rot). . . . .                                                                                                                                                         | 39 |
| 4.17 | Originaldaten der $CO_2$ -Konzentration gemessen mit dem Licor auf dem Peildeck. . . . .                                                                                                                                                                         | 40 |
| 5.1  | Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest. . . . .                                                                                                                 | 42 |
| 5.2  | Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/Licor auf dem Krähennest. . . . .                                                                                                                | 43 |
| 5.3  | Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit M100). . . . .                                                                                             | 43 |
| 5.4  | Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem Licor). . . . .                                                                                        | 44 |
| 5.5  | Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest. Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden. . . . .                                                | 45 |
| 5.6  | Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/Licor auf dem Krähennest. Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden. . . . .                                               | 45 |

5.7 Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem M100). Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden. . . . . 46

5.8 Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem Licor). Gezeigt sind nur die Datensätze, welche weiter verwendet werden. . . . . 46

5.9 Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1980)(x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (in Verbindung mit dem M100), Regression:  $H_{diss} = 1,0642 * H_{bulk} - 0,9857 W/m^2$  . . . . . 48

5.10 Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Large und Pond (1982)(x-Achse), gemessen mit dem M100/Sonic-Messsystem, Regression:  $H_{diss} = 0,9236 * H_{bulk} - 9,0107 W/m^2$  . . . . . 49

5.11 Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988)(x-Achse), gemessen mit dem M100/Sonic-Messsystem auf dem Krähennest, Regression:  $H_{diss} = 0,9979 * H_{bulk} + 2,7500 W/m^2$  . . . . . 50

5.12 Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1980)(x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest, Regression:  $H_{diss} = 1,0805 * H_{bulk} - 1.0552 W/m^2$  . . . . . 52

5.13 Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988)(x-Achse), gemessen mit dem Licor/Sonic-Messsystem auf dem Krähennest, Regression:  $H_{diss} = 1,1149 * H_{bulk} - 14,7799 W/m^2$  . . . . . 52

5.14 Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest. . . . . 53

5.15 Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/Licor auf dem Peildeck. 54

5.16 Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Sonic USA-1 auf dem Krähennest (Daten in Verbindung mit dem M100). . . . . 55

5.17 Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit neuem Sonic auf dem Peildeck (Daten in Verbindung mit dem Licor). . . . . 55

|      |                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.18 | Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Sonic USA-1 auf dem Krähennest. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze. . . . .                                                                       | 56 |
| 5.19 | Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit Messsystem Sonic/M100 auf dem Krähennest. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze. . . . .                                                              | 56 |
| 5.20 | Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Large und Pond (1982)(x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1, Regression: $H_{diss} = 0,9234 * H_{bulk} - 0,4396 W/m^2$ . . . . .                               | 58 |
| 5.21 | Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988)(x-Achse), gemessen mit dem Sonic USA-1, Regression: $H_{diss} = 1,0998 * H_{bulk} + 0,5392 W/m^2$ . . .                                            | 58 |
| 5.22 | Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Smith (1988)(x-Achse), gemessen mit dem M100/Sonic-Messsystem auf dem Krähennest, Regression: $H_{diss} = 0,8758 * H_{bulk} + 4,4187 W/m^2$ . . . . .            | 59 |
| 5.23 | Fluss fühlbarer Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit neuem Sonic auf dem Peildeck. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze. . . . .                                                                         | 60 |
| 5.24 | Fluss latenter Wärme mit verschiedenen Parametrisierungen und nach der Dissipationsmethode mit System Licor/Sonic auf dem Peildeck. Gezeigt sind nur die verwendeten Datensätze. . . . .                                                                   | 61 |
| 5.25 | Fluss fühlbarer Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Liu et al. (1979)(x-Achse), gemessen mit dem neuen Sonic auf dem Peildeck, Regression: $H_{diss} = 1,6821 * H_{bulk} + 4,3271 W/m^2$ . . . . .                  | 62 |
| 5.26 | Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Liu et al. (1979)(x-Achse), gemessen mit dem Licor/Sonic-Messsystem auf dem Peildeck, Regression: $H_{diss} = 1,6183 * H_{bulk} - 72,8726 W/m^2$ . . . . .       | 63 |
| 5.27 | Fluss latenter Wärme mit Dissipationsmethode (y-Achse) und mit einer Parametrisierung von Large und Pond (1982)(x-Achse), gemessen mit dem Licor/Sonic-Messsystem auf dem Peildeck, Regression: $H_{diss} = 1,6368 * H_{bulk} - 50,7644 W/m^2$ . . . . .   | 63 |
| 5.28 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähennest (Datensätze mit Licor) . . . . . | 65 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.29 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest (Datensätze mit M100) . . . . .                                                                        | 65 |
| 5.30 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), gleitendes Mittel der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest (Datensätze mit Licor) . . . . . | 66 |
| 5.31 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), gleitendes Mittel der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest (Datensätze mit M100) . . . . .  | 66 |
| 5.32 | Impulsfluss vom Sonic USA-1 auf dem Krähenest und von einer Parametrisierung von Large und Pond (1981) . . . . .                                                                                                                                                                                                                | 67 |
| 5.33 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest. . . . .                                                                                               | 68 |
| 5.34 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), angepasste Regression der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem Sonic USA-1 auf dem Krähenest. . . . .                     | 69 |
| 5.35 | Impulsfluss vom Sonic USA-1 auf dem Krähenest und von einer Parametrisierung von Large und Pond (1981) . . . . .                                                                                                                                                                                                                | 70 |
| 5.36 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), Regression der Daten (rot) und zwei Parametrisierungen (Smith (1980) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem neuen Sonic auf dem Peildeck. . . . .                                                                                                | 71 |
| 5.37 | Dragkoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (blaue Kreise), gleitendes Mittel der Daten (rot) mit Standardabweichung (rot gestrichen) und drei Parametrisierungen (Smith (1980), Large und Pond (1981) und Smith et al. (1992)) gemessen mit dem neuen Sonic auf dem Peildeck. . . . .                          | 71 |
| 5.38 | Impulsfluss vom neuen Sonic auf dem Peildeck und von einer Parametrisierung von Smith et al. (1992) . . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 72 |
| 5.39 | Originaldaten der $CO_2$ -Konzentration gemessen mit dem Licor 2008                                                                                                                                                                                                                                                             | 74 |

- 5.40 Partialdruck des  $CO_2$  während ANT XXIV-4, bestimmt aus den Licor-Messungen von Temperatur, Druck und  $CO_2$ -Konzentration auf dem Krähennest (blau) und Messungen der Meereschemiker auf dem Peildeck (rot). . . . . 75
- 5.41 Partialdruck des  $CO_2$  während ANT XXIV-4 auf dem Krähennest (blau): Zeitschritte mit fehlerhaften Wasserdampferten wurden vernachlässigt. In rot erneut die Messungen der Meereschemiker. . . . . 76
- 5.42  $CO_2$ -Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind alle 840 ausgerechneten Datensätze gezeigt. . . . . 77
- 5.43  $CO_2$ -Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind nur die Datensätze gezeigt, welche nach den Vereinfachungen übrig geblieben sind. . . . . 78
- 5.44 Originaldaten der  $CO_2$ -Konzentration, gemessen mit dem Licor 2009 auf dem Peildeck. . . . . 79
- 5.45 Partialdruck des  $CO_2$  während ANT XXV-5, bestimmt aus den Licor-Messungen von Temperatur, Druck und  $CO_2$ -Konzentration auf dem Peildeck (blau). In rot sind die Messungen der Meereschemiker dargestellt. . . . . 79
- 5.46 Partialdruck des  $CO_2$  während ANT XXV-5, gemessen auf dem Peildeck (blau): Zeitschritte mit fehlerhaften Wasserdampferten wurden vernachlässigt. In rot sind die Messungen der Meereschemiker dargestellt. . . . . 80
- 5.47  $CO_2$ -Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind alle 518 ausgerechneten Datensätze gezeigt. . . . . 81
- 5.48  $CO_2$ -Flüsse mit Dissipationsmethode (schwarze Punkte) und mit Parametrisierungen von Wanninkhof (1992) (rot), Nightingale et al. (2000) (grün), Ho et al. (2006) (cyan) und Sweeney et al. (2007) (blau), basierend auf den Messungen der Meereschemie. Bei den Dissipationswerten sind nur die Datensätze gezeigt, welche nach den Vereinfachungen übrig geblieben sind. . . . . 81

# Tabellenverzeichnis

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Korrekturwerte der absoluten Feuchten verglichen mit den Borddaten                                                                                                                                                                                                                                      | 30 |
| 4.2 | Korrekturwerte der absoluten Feuchten verglichen mit den Borddaten                                                                                                                                                                                                                                      | 37 |
| 5.1 | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss fühlbarer Wärme vom Sonic USA-1 (in Verbindung mit dem M100), jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 8,1702 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . . .  | 47 |
| 5.2 | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem M100/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 127,8355 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . .                      | 48 |
| 5.3 | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss fühlbarer Wärme vom Sonic USA-1 (in Verbindung mit dem Licor), jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 8,2982 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . . . | 51 |
| 5.4 | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem Licor/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 125,0448 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . .                     | 51 |
| 5.5 | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabw. für den Fluss fühlbarer Wärme vom Sonic USA-1, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 16,0834 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . . .                                    | 57 |
| 5.6 | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem M100/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 155,7740 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . .                      | 57 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.7  | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss fühlbarer Wärme vom neuen Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 29,4268 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . . .            | 60 |
| 5.8  | Korrelationskoeffizient, Bias und Standardabweichung für den Fluss latenter Wärme vom Messsystem Licor/Sonic, jeweils eine Parametrisierung in Verbindung mit den Dissipationsmessungen ( $Mittelwert_{diss} = 145,8594 W/m^2$ ). Dazu der Mittelwert jeder Parametrisierung. . . . . | 61 |
| 5.9  | Statistische Parameter verschiedener Parametrisierungen von Dragkoeffizienten in Verbindung mit den berechneten Dragkoeffizienten des Sonic USA-1. . . . .                                                                                                                            | 67 |
| 5.10 | Statistische Parameter verschiedener Parametrisierungen des Impulsflusses in Verbindung mit dem berechneten Impulsfluss des Sonic USA-1 auf dem Krähennest. . . . .                                                                                                                   | 69 |
| 5.11 | Statistische Parameter verschiedener Parametrisierungen von Impulsflüssen in Verbindung mit den berechneten Impulsflüssen des neuen Sonic auf dem Peildeck. . . . .                                                                                                                   | 72 |

# Literaturverzeichnis

- Båth, M., 1974. *Spectral analysis in Geophysics*. Elsevier, Amsterdam.
- Bumke, K., U. Karger und K. Uhlig, 2002. Measurements of Turbulent Fluxes of Momentum and Sensible Heat over the Labrador Sea. *J. Phys. Ocean*, **32**, 401–410.
- Bunker, A. F., 1976. Computations of surface energy flux and annual air-sea interaction cycles of the North Atlantic Ocean. *Monthly Weather Revue*, **104**, 1122–1140.
- Charnock, H., 1955. Wind stress on a water surface. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **84**, 443–447.
- Dupuis, H., P. K. Taylor, A. Weill und K. B. Katsaros, 1997. Inertial dissipation method applied to derive turbulent fluxes over the ocean during the surface of the ocean. *J. Geophys. Res.*, **102**(9), 21115–21129.
- Dyer, A. J., 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary Layer Meteorol.*, **7**, 363–372.
- Edson, J. B., C. W. Fairall, P. G. Mestayer und S. E. Larsen, 1991. A study of the Inertial-Dissipation Method for Computing Air-Sea Fluxes. *J. Geophys. Res.*, **96**(6), 10,689–10,711.
- Fairall, C. W. und S. E. Larsen, 1986. Inertial dissipation methods and turbulent fluxes at the air ocean interface. *Boundary Layer Meteorol.*, **34**, 287–301.
- Gravech, A. A., C. W. Fairall und S. E. Larsen, 1998. On the determination on the neutral drag coefficient in the convective boundary layer. *Boundary Layer Meteorol.*, **86**, 257–278.
- Hinze, J. O., 1959. *Turbulence*. McGraw-Hill, New York.
- Ho, D. T., C. Law, M. J. Smith, P. Schlosser, P. Hill und M. Harvey, 2006. Measurements of air-sea gas exchange at high wind speeds in the Southern Ocean: Implications for global parameterizations. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L16611.

- Isemer, H.-J. und L. Hasse, 1987. The Bunker climate atlas of the North Atlantic Ocean. Vol. 2: Air-Sea Interaction. *Report No. 160 a of the Institut für Meereskunde, Christian-Albrechts Universität. Springer-Verlag*, S. 256.
- Kiehl, J. und K. Trenberth, 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**(2), 197–208.
- Large, W. G. und S. Pond, 1981. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds. *J. Phys. Ocean*, **11**, 324–336.
- Large, W. G. und S. Pond, 1982. Sensible and Latent Heat Flux Measurements over the Ocean. *J. Phys. Ocean*, **12**, 464–482.
- Liu, W. T., K. B. Katsaros und J. A. Businger, 1979. Bulk Parameterization of the Air-Sea Exchange of Heat and Water Vapor including the Molecular Constraints at the Interface. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1722–1735.
- Macke, A., 2009. The expedition of the research vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2008 (ANT-XXIV/4) / Ed. by Andreas Macke. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research*, **591**, 64 Seiten.
- Monin, A. S. und A. M. Obukhov, 1954. Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery (Basic Laws of Turbulent Mixing in the Atmosphere Near the Ground). *Trudy geofiz. inst. AN SSSR*, **24**(151), 163–187.
- Nightingale, P. D., P. S. Liss und P. Schlosser, 2000. Measurements of air-sea gas transfer during an open ocean algal bloom. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2117–2120.
- Panofsky, H. A. und J. A. Dutton, 1984. *Atmosphere Turbulence*. Wiley-Interscience, New York.
- Paulson, C. A., 1970. Representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 857–861.
- Smith, S. D., 1980. Wind Stress and Heat Flux over the Ocean in Gale Force Winds. *J. Phys. Ocean*, **10**(5), 709–726.
- Smith, S. D., 1988. Coefficients for Sea Surface Wind Stress, Heat Flux, and Wind Profiles as a Function of Wind Speed and Temperature. *J. Geophys. Res.*, **93**(12), 15467–15472.
- Smith, S. D., R. J. Anderson, W. A. Oost, C. Kraan, N. Maat, J. DeCosmo, K. B. Katsaros, K. L. Davidson, K. Bumke, L. Hasse und H. M. Chadwick, 1992. Sea surface wind stress and drag coefficients. *Boundary Layer Meteorol.*, **60**, 109–142.

- Sweeney, C., E. Gloor, A. R. Jacobson, R. M. Key, G. McKinley, J. L. Sarmiento und R. Wanninkhof, 2007. Constraining global air-sea gas exchange for CO<sub>2</sub> with recent bomb C-14 measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**(2).
- Wanninkhof, R., 1992. Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *J. Geophys. Res.*, **97**, 7373–7381.
- Wucknitz, J., 1978. The influence of anisotropy on stress estimation by the indirect dissipation method. *Boundary Layer Meteorol.*, **17**, 119–131.
- Yelland, M. J. und P. K. Taylor, 1996. Wind stress measurements from the open ocean. *J. Phys. Ocean*, **26**, 541–558.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich zum Abschluss die Gelegenheit nutzen mich bei all den Menschen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Diplomarbeit praktisch sowie moralisch unterstützt haben.

Zunächst danke ich Herrn Prof. Dr. Andreas Macke für die Vergabe des Themas, die Möglichkeit der Teilnahme an einer Forschungsfahrt auf der Polarstern und die Korrektur der Arbeit, sowie bei Herrn Prof. Dr. Dietmar Dommenges für die Zweitkorrektur.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr. Karl Bumke für die Betreuung, Hilfe und vor allem für die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ganz herzlich danken möchte ich der Abteilung Maritime Meteorologie und besonders den Diplomanden und Doktoranden. Des Weiteren bedanke ich mich bei Björn Fiedler und Tobias Steinhoff aus der FE Chemische Ozeanographie für die zur Verfügung gestellten  $CO_2$ -Daten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, vor allem bei meinen Eltern und meinen Geschwistern bedanken, die mich trotz weiter Entfernung während meines gesamten Studiums unterstützten und immer für mich da waren.

Diese Arbeit wurde mit der Textverarbeitung L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X angefertigt.



## **Erklärung**

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ich versichere, dass diese Arbeit noch nicht zur Erlangung eines Diplomgrades an anderer Stelle vorgelegen hat.

Kiel, Oktober 2009

(Michael Schlundt)