

Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

Wasserdampfkonzentrationsmessungen in großen Höhen und bei niedrigen Temperaturen

DANIELA PFAB

Masterarbeit in der Geoökologie
Betreuer Prof. Dr. Thomas Foken

März 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
Abstract	7
1. Einleitung	8
2. Theorie	10
2.1. Entwicklung der Luftfeuchtemesstechnik	10
2.2. Funktionsweise eines Open-Path-Absorptionshygrometers.....	11
2.3. Optische Eigenschaften von Wasserdampf.....	13
2.4. Maße der Luftfeuchte	15
2.5. Flussmessungen	16
2.6. Luftfeuchtemessung durch Absorption infraroter Strahlung.....	21
2.6.1. Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500.....	21
2.6.2. Kalibrierung des LI-7500	23
2.6.3. Luftfeuchtemessung mit LI-7500.....	25
2.7. Feuchtemessung durch Absorption von UV-Strahlung	27
2.7.1. Feuchtemessung mit dem Kryptonhygrometer	27
2.7.2. Kalibrierung des Kryptonhygrometers KH20 mit variabler Pfadlänge ..	29
2.7.3. Verwendung des Kryptonhygrometers	33
2.8. Verwendung von LI-7500 und KH20.....	34
3. Material und Methoden	36
3.1. Beschreibung der Lage und des Klimas des Versuchsortes	36
3.2. Durchführung des Experimentes im Februar 2010 am Nam Co.....	38
3.2.1. Aufbau des Eddy-Kovarianzmesssystems.....	38
3.2.2. KH20 Kalibrierung am Nam Co	40
3.3. Datenaufnahme und -verarbeitung.....	41
3.4. Sommerexperiment 2009 auf dem tibetischen Plateau.....	43
4. Ergebnisse und Diskussion	45
4.1. Kalibrierung des KH20 mit mobiler Kalibriereinheit am Nam Co	45
4.2. Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500.....	49
4.2.1. Messung der absoluten Luftfeuchte mit LI-7500 am Nam Co im Jahr 2009	49
4.2.2. Messung der relativen Luftfeuchte mit LI-7500 am Nam Co im Winterexperiment 2010	51
4.3. Vergleich von LI-7500 und KH20.....	55
4.3.1. Ergebnis der Powerspektren von LI-7500 und KH20.....	55

4.3.2. Vergleich der Standardabweichungen und des latenten Wärmestroms von LI-7500 und KH20 am Nam Co im Winterexperiment	56
5. Schlussfolgerungen und Ausblick	59
6. Literatur	62
7. Danksagung	66
Abbildungsverzeichnis	67
Tabellenverzeichnis	70
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	71
Eidesstattliche Erklärung	73

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Luftfeuchtemessung auf dem tibetischen Plateau im Winter. Das tibetische Plateau liegt im Himalayagebirge auf einer Höhe von 4700 m und zeichnet sich im Winter durch sehr kalte Witterungsverhältnisse und geringe feuchtegehalte der Luft aus. Diese Arbeit wurde im Rahmen eines Forschungsprogramms, gefördert durch die Europäische Union, angefertigt. Im Projekt wird sowohl mit Fernerkundungsdaten als auch Daten von Bodenstationen, darunter Eddy-Kovarianzmessungen, gearbeitet. Für Eddy-Kovarianzmessungen steht die Nam Co Comprehensive Research Station der Chinesischen Akademie der Wissenschaften auf dem tibetischen Plateau zur Verfügung. Zusätzlich zum CSAT-3 Anemometer der Firma Campbell Sci. sind ein Infrarot-Gasanalysator LI-7500 zur Messung von Luftfeuchte sowie Kohlenstoffdioxid und ein HMP (HMP45A Firma Vaisala Inc.) zur Referenzmessung von Luftfeuchte und Temperatur installiert. In früheren Untersuchungen wurde vor allem in den Wintermonaten eine Übersättigung der Luft mit Wasserdampf durch das LI-7500 gemessen. Dies war Grund zur Annahme, dass die Messung mit dem LI-7500 nicht korrekt ist. Daher wurde im Februar 2010 ein Experiment der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth im Rahmen des Projekts an der Nam Co Comprehensive Research Station gestartet. Hierbei wurde ein UV-Hygrometer (KH20, Firma Campbell) zur bereits vorhandenen Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500 hinzugefügt. Der Vorteil des KH20 ist eine mobile Kalibriereinheit, entwickelt von der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth in Kooperation mit der Gesellschaft für Akustik und Fahrzeugmesswesen mbH, Zwickau. Die Kalibriereinheit ermöglicht eine Kalibrierung vor Ort, durch die Änderung des Abstandes der Kryptonröhren des KH20 bei konstantem Wassergehalt der Luft. Durch diese Art der Kalibrierung vor Ort kann im Experiment im Februar 2010 eine gute Anpassung der Luftfeuchtwerte des KH20 im Vergleich mit den Referenzwerten des HMP erzielt werden. Im Gegensatz dazu zeigt die Analyse der Luftfeuchtwerte von LI-7500 zu hohe Werte der absoluten und relativen Luftfeuchte im Vergleich mit den Referenzwerten des HMP. Dieses Ergebnis spiegelt das Resultat der mit Wasserdampf übersättigten Luft früherer Studien am Nam Co wieder. Zieht man die Luftfeuchtemessungen des Jahres 2009 der Nam Co Comprehensive Research Station in die Betrachtung mit ein, so scheint eine Drift der Messwerte des LI-7500 mit einem plötzlichen Temperaturabfall im November 2009 zusammenzuhängen. Die weitere Analyse betrifft das Kalibrierungspolynom des LI-7500, in Bezug auf den Einsatz in einem Gebiet wie dem tibetischen Hochplateau mit geringer Luftfeuchte, niedrigen Temperaturen und niedrigem Luftdruck. Aus dieser Analyse ergibt sich, dass der Fehler durch geringe Verschiebung des Kalibrierungspolynoms im niedrigen Feuchtebereich 6 % und mehr betragen kann. In vorher-

gehenden Studien wurde davon ausgegangen, dass relative und absolute Luftfeuchte zwar falsch gemessen werden, dies aber keinen Einfluss auf den latenten Wärmestrom hat. Ein Vergleich des gemessenen latenten Wärmestroms mit LI-7500 und KH20 zeigt einen um 30 % höheren latenten Wärmestrom beim KH20. Aus diesem Ergebnis sowie aus dem Vergleich mit vorhergehenden Experimenten folgt, dass die Luftfeuchtemessung entweder mit einem anderen Messgerät durchgeführt werden muss oder das LI-7500 viel häufiger kalibriert werden sollte.

Abstract

The following text is about humidity measurement on the Tibetan Plateau in the winter. The Tibetan Plateau is located in the Himalaya Mountains, 4700 m a.s.l., with very cold climate and low humidity values in winter. The this thesis is embedded in a framework of a project which is sponsored by the European Union. In this project satellite and surface observations (e.g. Eddy-covariance measurements) are required. Eddy-covariance measurements were conducted on the Nam Co Comprehensive Research Station of the Chinese Academy of Sciences. In addition to the CSAT-3 anemometer of the company Campbell Sci., an infrared gas analyzer (LI-7500, company LiCor Inc.) for humidity and carbon dioxide measurements and a HMP for reference measurements of humidity and temperature were installed. Previous studies observed that a water vapor oversaturation occurred especially during the winter months. This led to the assumption that a measurement with LI 7500 might not be correct. That is why the Department of Micrometeorology of the University of Bayreuth started this new experiment in the framework of the project in February 2010. A UV-hygrometer (KH20, company Campbell Sci.) was added to the already available measurements of air humidity with the LI 7500. The advantage of the KH20 is the newly developed mobile calibration unit of the department of micrometeorology of the University of Bayreuth in cooperation with the Gesellschaft für Akustik und Fahrzeugmesswesen mbH, Zwickau. The calibration unit enables in situ calibration through alteration of the distance of the krypton tubes of the KH20 with constant water content of the air. Through this calibration a good adjustment of the humidity values to the reference values of the HMP can be achieved. In contrast to that the analysis of the humidity values of the LI 7500 shows too high results of absolute and relative humidity in comparison to the reference values of the HMP. This result reflects the oversaturated humidity found in previous studies on the Nam Co station. A shift of the measured values of the LI 7500 seems to be caused by a sudden decrease of temperature in November 2009. Further analysis concerning the calibration polynomial was conducted, as is conventional practice in an area such as the Tibetan Plateau with low humidity, temperature and pressure. This analysis shows that the error can be 6 % and more in the low humidity sector of the calibration polynomial. Previous studies are based on the assumption that only the measurements of absolute and relative humidity are incorrect and the measurement of the latent heat flux is affected. But a comparison of the measured latent heat flux with the LI 7500 and the KH20 reveals a 30 % higher latent heat flux of the KH20. The conclusion of this study and previous experiments is that either the humidity measurement has to be done with another humidity analyzer or the calibration frequency of the LI-7500 should be increased.

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Luftfeuchtemessung auf dem tibetischen Plateau im Winter. Das tibetische Plateau liegt im Himalaya Gebirge auf einer Höhe von 4700 m und zeichnet sich im Winter durch sehr kalte Witterungsverhältnisse und geringe feuchtegehalte der Luft aus. Die Luftfeuchtemessung stellt durch diese Bedingungen eine Herausforderung dar. In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob und auf welche Art und Weise die Luftfeuchtemessung auf dem tibetischen Plateau verbessert werden kann.

Die Arbeit wurde im Rahmen des CEOP-AEGIS-Projekts angefertigt, dessen Ziel es ist Informationen und Daten über das tibetische Plateau zu sammeln und auf diesen Daten basierend ein Wasserressourcenmanagement zu entwickeln um dadurch dauerhaft für dessen Optimierung zu sorgen. Der Name CEOP-AEGIS ist eine Abkürzung für "Coordinated Asia-European long-term Observing system of Qinghai-Tibet Plateau hydro-meteorological processes and the Asian-monsoon system with Ground satellite Image data and numerical Simulations" und ist ein Projekt im FP7 der Europäischen Union. Im Projekt wird sowohl mit Fernerkundungsdaten als auch Daten von Bodenstationen gearbeitet.

Messungen der Stoff- und Energieflüsse in der atmosphärischen Grenzschicht werden üblicherweise mit einem Eddy-Kovarianz-Messsystem durchgeführt, da dieses die Möglichkeit der direkten Flussmessung bietet (Foken, 2006). In den letzten Jahren wurden vermehrt Eddy-Kovarianzmessungen und Untersuchungen im Zusammenhang mit den Projekten auf dem tibetischen Plateau oder dem ChinaFLUX-Netzwerk unternommen (z.B. Fu et al., 2006; Haginoya et al., 2009; Ma et al., 2009; Genxu et al., 2009; Guo et al., 2011). Bei der Eddy-Kovarianzmessung auf dem tibetischen Plateau werden die Luftfeuchtemessungen nahezu ausschließlich mit dem LI-7500 der Firma LiCor durchgeführt. Das LI-7500 ist ein Gerät zur Bestimmung des Wasser- und CO₂-Gehalts mit offenem Messpfad (open path), welches die Absorption eines infraroten Strahls durch die Gaskomponente hochfrequent misst. Allerdings wurde mit diesem Messgerät während der Diplomarbeit von Metzger (2007) vor allem in den Wintermonaten eine deutlich zu hohe relative Luftfeuchte gemessen.

Bekannte Probleme, die bei der Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500 auftreten können sind zum einen die Strahlungs- und Wärmeempfindlichkeit gegenüber der Umgebung (Burba, 2008) und zum anderen Ungenauigkeiten, welche aus dem Kalibrierungspolynom sowie der Kalibrierung resultieren (Ocheltree und Loescher, 2006). Außerdem wurde von Weisensee et al. (2003) die Abweichung der absoluten Feuchte im Bereich unter 3 g m³ mit zu- oder abnehmender Temperatur festgestellt.

Aufgrund der bekannten Probleme bei der Luftfeuchtemessung wurde das Winterexperiment im Februar 2010 der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth innerhalb des CEOP-AGIS-Projekt gestartet. Dabei sollte eine Vergleichsmessung zum LI-7500 mit einem Kryptonhygrometer (KH20) mit mobiler Kalibriereinheit an der Nam Co Comprehensive Research Station Tibet, China durchgeführt werden.

Das KH20 ist ein Gerät für die Luftfeuchtemessung der Firma Campbell Sci., welches die Absorption eines ultravioletten Strahls durch die Luftfeuchte in einem offenen Messpfad hochfrequent misst (Campbell und Tanner, 1985). Das Messgerät wird bereits seit über 25 Jahren erfolgreich für Eddy-Kovarianzmessungen überall auf der Welt eingesetzt z.B. auch für Messungen in den Rocky Mountains bei mehr als 3000 m ü.NN (Turnipseed et al., 2003). Einen großen Vorteil gegenüber anderen Hygrometern scheint das KH20 durch seine mobile Kalibriereinheit zu erlangen. Die Kalibriereinheit wurde von der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth in Kooperation mit der Gesellschaft für Akustik und Fahrzeugmesswesen mbH, Zwickau entwickelt (Foken und Falke 2010). Diese mobile Kalibriereinheit bietet die Möglichkeit, das Hygrometer an die Bedingungen vor Ort anzupassen, was bei einem Standort mit extremen Witterungsverhältnissen wie dem tibetischen Plateau erforderlich ist.

Im Fokus des Experiments steht der Test der mobilen Kalibriereinheit des KH20, wodurch gezeigt werden soll wie stabil die Kalibrierung des KH20 auf dem tibetischen Plateau ist und außerdem ein Vergleich der gemessenen Feuchtwerte von LI-7500 und KH20 mit der Referenzmessung und des latenten Wärmestroms. Ziel des Experiments ist es eine Aussage über die Qualität der Messung der Luftfeuchte sowie des latenten Wärmestroms mit dem LI-7500 am Nam Co auf dem tibetischen Plateau zu geben und Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

2. Theorie

Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über die Feuchtemesstechnik und den zugrunde liegenden Prinzipien gegeben werden. Bei meteorologischen Messungen werden vorwiegend Absorptionshygrometer eingesetzt. Die Funktionsprinzipien für die gebräuchlichsten Absorptionshygrometer im infraroten und ultravioletten Bereich sollen im folgenden Abschnitt vorgestellt und Unterschiede in der Messung veranschaulicht werden.

2.1. Entwicklung der Luftfeuchtemesstechnik

Erste zuverlässige Luftfeuchtemessungen wurden in der Meteorologie durch das Haarhygrometer (1783 von Horace-Bénédict de Saussure) und später durch das Assmann-Psychrometer (1887 von Richard Aßmann) erreicht. Beide Messgeräte werden bis heute zur Luftfeuchtemessung eingesetzt, wobei aber vor allem im meteorologischen Bereich zunehmend elektrische Hygrometer verwendet werden. Heutzutage existiert eine Vielzahl an Hygrometern und bei der Auswahl kommt es in erster Linie darauf an, welches Feuchtemaß bestimmt werden soll. Um die relative Feuchte zu messen, verwendet man in der Meteorologie hauptsächlich kapazitive Hygrometer, welche die Feuchte durch wasseranziehende keramische Materialien absorbieren. Zur Messung der Taupunkttemperatur dient die Kondensation an gekühlten Spiegeln und für die absolute Feuchtemessung werden optische Verfahren eingesetzt. Optische Verfahren nutzen die Eigenschaft von Wasserdampf, Strahlung einer bestimmten Wellenlänge zu absorbieren. Neben dem Feuchtemaß sind außerdem die zeitliche Auflösung der Messung, die Kosten des Gerätes und die Wartungsintensität von Bedeutung. Optische Messungen der Luftfeuchte wurden als erstes im nahen Infrarotbereich durchgeführt (Elagina, 1962). Messgeräte zur Luftfeuchtemessung im ultravioletten Bereich wurden von Kretschmer und Karpovitsch (1973), Martini et al. (1973), Buck (1973) erstmals verwendet. Es folgte eine Reihe an Weiterentwicklungen und Produktionen durch verschiedene Firmen, welche in Tabelle 2.1 dargestellt sind. Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Messgeräten im ultravioletten und infraroten Bereich, welche eine offene Messstrecke (open-path) besitzen, werden Messgeräte mit geschlossenem System (closed-path) verwendet. Bei diesen wird die Luft eingesaugt und zur Analyse in eine einige Meter entfernt stehende Infrarot-Messzelle geleitet (Leuning und Judd, 1996; Moncrieff et al., 1997). Der Vorteil dieser Messgeräte ist, dass durch die beheizten Schläuche, welche die Luft zur Messzelle leiten, keine temperaturbedingten Dichtefluktuationen auftreten. Die bei den Open-Path-Messgeräten benötigte Dichtekorrektur kann somit entfallen. Nachteilig sind bei diesen Geräten jedoch der Tiefpasscharakter und die Zeitverschiebung zwischen der Wind- und der Feuchtemessung, die bei der Auswertung zu berücksichtigen ist.

Tabelle 2.1: Vorwiegend eingesetzte kommerzielle UV- und IR-Hygrometer (Foken 2006, bearbeitet)

Spektraler Messbereich	Gerätebezeichnung	Hersteller	Gemessene Gase
UV	KH20-Krypton-Hygrometer	Campbell Sci. (USA)	H ₂ O
IR	EC150	Campbell Sci. (USA)	H ₂ O, CO ₂
IR	EC155 (closed path)	Campbell Sci. (USA)	H ₂ O, CO ₂
IR	LI-7000 (closed path)	LI-COR Inc. (USA)	H ₂ O, CO ₂
IR	LI-7500A	LI-COR Inc. (USA)	H ₂ O, CO ₂
IR	OP-2 (open-path 50cm)	ATC Bioscientific Ltd.	H ₂ O, CO ₂

2.2. Funktionsweise eines Open-Path-Absorptionshygrometers

Um das Funktionsprinzip der Absorptionshygrometer zu verstehen, soll im Folgenden das Lambert-Beer'sche Gesetz vorgestellt werden. Das Lambert-Beer'sche Gesetz ist das grundlegende Gesetz für die Absorptionsmessung von Gasen in der Atmosphäre.

Wasserdampf hat die Eigenschaft, Strahlung bei bestimmten Wellenlängen zu absorbieren, dies wird im Allgemeinen als Absorptionsbande definiert. Die Eigenschaft der Absorption nutzt man bei der optischen Luftfeuchtemessung. Für die Luftfeuchtemessung geeignete Banden müssen über eine ausreichend hohe Absorption von Wasserdampf verfügen und weitere Komponenten der Luft von der Absorption ausschließen. Beim optischen Verfahren wird der absolute Anteil an Wasser in der Atmosphäre gemessen. Die Absorption kann in der folgenden Form durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden und zeigt somit den Bezug der Intensitätsänderung der Strahlung zum Wasserdampfanteil in der Luft (Wernecke, 2003).

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot d \cdot \frac{c}{c_0}} \quad (2.1)$$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -k \cdot d \cdot \frac{c}{c_0} \quad (2.2)$$

Wobei I_0 die Intensität des Lichtes bei der Absorberkonzentration c_0 , k den Absorptionskoeffizient und d die Messstreckenlänge bezeichnen. Die Absorption von Wasserdampf kann in verschiedenen Wellenlängenbereichen gemessen werden. Absorptionshygrometer, welche in der Meteorologie eingesetzt werden, absorbieren Strahlung entweder im ultravioletten oder im

infraroten Bereich Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau eines Absorptionshygrometers. Das Funktionsprinzip lässt sich folgendermaßen darstellen. Strahlung wird an der Strahlungsquelle erzeugt und über die offene Messstrecke (open path) an den Empfänger ausgesandt. Dort wird die empfangene Strahlung an den Verstärker weiter gegeben und als Signal ausgegeben. Je höher die Konzentration von Wasserdampf in der Messstrecke, umso mehr Strahlung wird absorbiert. Daher kommt nur ein verringerter Teil der ausgesandten Strahlung am Detektor an. Durch Kenntnis der Intensität des Strahls, wenn keine Absorption (I_0) stattfindet, lässt sich mit Formel (2.1) die Konzentration des Wasserdampfes (c) in der Messstrecke (d) berechnen. Beim Closed-Path-Hygrometer ist das Funktionsprinzip dasselbe, nur dass hier die Luft in eine geschlossene Kammer eingesaugt wird und die Analyse dort stattfindet.

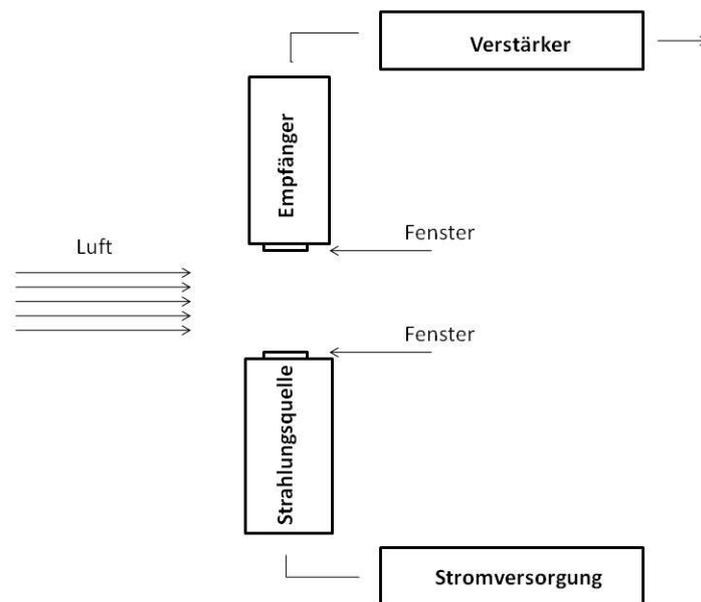


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Absorptionshygrometers mit offenem Messpfad

2.3. Optische Eigenschaften von Wasserdampf

Absorptionsmessungen durch Wasserdampf werden vor allem im ultravioletten und infraroten Bereich durchgeführt, da hier die stärksten Absorptionsbanden liegen. Zusätzlich sind in diesen Bereichen die Querempfindlichkeiten zu anderen Komponenten der Luft minimal, so dass der Wasserdampfgehalt der Luft präzise gemessen werden kann. Die Einteilung der optischen Strahlung in die, zur Zeit üblichen, Spektralbereiche kann aus Tabelle 2.2 entnommen werden.

Tabelle 2.2: Einteilung der optischen Strahlung in die z.Z. üblichen Spektralbereiche. Nach DIN 5031(7)

Benennung der Strahlung	Kurzzeichen		Wellenlänge [nm]	
Ultravioletstrahlung	Vakuum-UV	UV	UV-C (VUV)	100 – 200
	Fernes UV		UV-C (FUV)	200 – 280
	Mittleres UV		UV-B	280 – 315
	Nahes UV		UV-A	315 – 380
Sichtbare Strahlung, Licht		VIS		380 – 780
Infrarotstrahlung	Nahes IR	IR	NIR (IR-A)	780 – 1400
			NIR (IR-B)	1400 – 3000
	Mittleres IR		IR-C (MIR)	3000 - 50000
	Fernes IR		IR-C (FIR)	50000 – 10 ⁶

Nach Woźniak und Dera (2007) sind die Energiezustände von kleinen Molekülen, wie zum Beispiel Wasser, durch die Rotations-, die Schwingungs- und die Elektronenenergie definiert. Änderungen dieser Energiezustände können durch Aufnahme oder Abgabe von Energie herbeigeführt werden. Anregungszustände durch Licht werden durch Absorption von Photonen erreicht. Die Absorption eines Photons beinhaltet immer den Übergang von einem Quantenzustand in einen anderen Quantenzustand in Übereinstimmung mit den quantenmechanischen Auswahlregeln. Zum Beispiel bringt der Übergang in einem Molekül von einem elektronischen Zustand zu einem anderen, in der Regel auch Änderungen im Schwingungs- und Rotationszustand des Moleküls mit sich. So ergibt sich aus den vielen Möglichkeiten von Energieübergängen in einem Molekül ein sehr komplexes Lichtabsorptionsspektrum mit vielen verschiedenen Absorptionsbändern, die in ihren Intensitäten und Breiten variieren (Woźniak und Dera, 2007). Je nach Wellenlänge der Strahlung werden im Molekül bestimmte Energiezustände bevorzugt erreicht. Im ultravioletten Bereich sind die Absorptionseigenschaften mehr durch die physikali-

schen Eigenschaften der Atome als durch die Moleküle bestimmt. Daher findet im ultravioletten Bereich vor allem die Energieanregung der Elektronen statt. Laut Schmidt (1994) schließen sich an die Energieabsorption durch Elektronen Energieübergänge durch Schwingungsanregung im sichtbaren und infraroten Bereich an. Energieübergänge durch Änderung der Rotationschwingung dominieren im fernen Infrarot-, Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Absorptionsbanden eines Gasanalysegerätes (LI-7500) für den infraroten Bereich sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Für den ultravioletten Bereich sind die Absorptionsbanden des KH₂O in Abbildung 2.3 abgebildet. Wichtig bei der Auswahl der Absorptionsbande ist es einen Bereich mit maximaler Absorption, in der es zu keiner Querempfindlichkeit mit anderen Gasen in der Atmosphäre kommt zu finden.

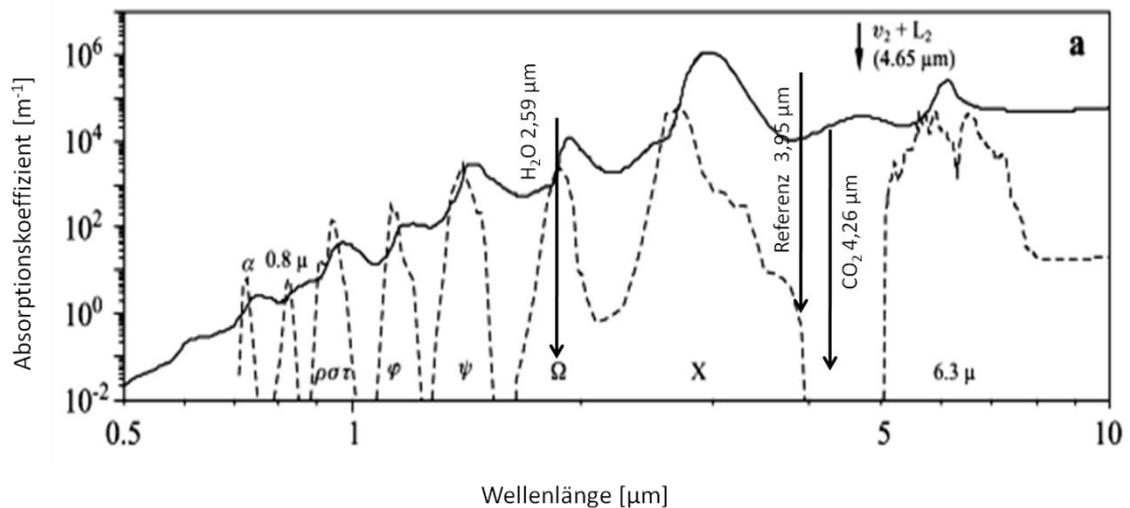


Abbildung 2.2: Absorptionskoeffizienten [m^{-1}] für Wasser in flüssiger Form (durchgezogene Linie) und Wasserdampf (gestrichelte Linie) im langwelligen Bereich. (Aus Woźniak und Dera, 2007, verändert). Eingetragen sind die IR-Absorptionslinien des LI-7500 für H₂O, CO₂ und der Referenzmessung bei der keine Absorption stattfindet.

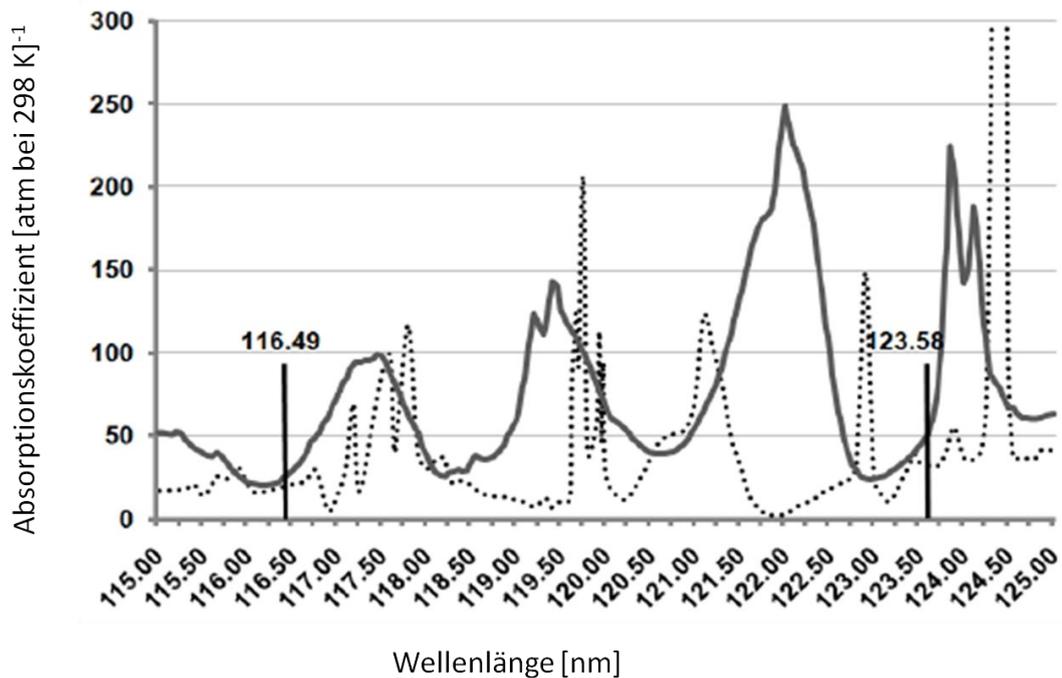


Abbildung 2.3: Absorptionskoeffizienten für Wasserdampf bei bestimmten Spektrallinien im UV-Bereich (Mota et al., 2005) und von Sauerstoff (gepunktet) (Ogawa und Ogawa, 1975), transformiert von Basis e zu Basis 10 durch Finlayson-Pitts und Pitts (2000)). Absorptionslinien sind relevant für das KH₂O, welches im UV-Bereich misst. Aus Foken und Falke (2011).

2.4. Maße der Luftfeuchte

Es gibt eine Reihe von Feuchtemaßen, diese und ihre die Umrechnungsformen sollen im Folgenden kurz genannt und dargestellt werden. Die Luftfeuchte wird von Größen wie Temperatur und Druck beeinflusst. Daher sind wichtige Größen in der Luftfeuchtemessung der Dampfdruck e , welcher den Partialdruck des Wasserdampfes in hPa angibt und der Taupunkt τ , welcher die Temperatur an gibt, bei welcher der Sättigungsdampfdruck in °C erreicht wird. Dabei wird der Sättigungsdampfdruck in hPa über die Magnus'sche Formel (-45-60 °C über Wasser) nach Sonntag (1990) folgendermaßen berechnet:

$$E = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t}} \quad (2.3)$$

Und für -65 - 0,01 °C über Eis nach Sonntag (1990):

$$E = 6,112 \cdot e^{\frac{22,46 \cdot t}{272,62 + t}} \quad (2.4)$$

Die absolute Feuchte a gibt die Masse Wasserdampf pro Volumen feuchter Luft in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ an. Gebräuchlich ist auch die Angabe in g m^{-3} und lässt sich wie folgt über den Dampfdruck e und die Temperatur berechnen:

$$a = \frac{0,21667 \cdot e}{T} \quad (2.5)$$

Die spezifische Feuchte q gibt die Masse Wasserdampf pro Masse feuchter Luft in $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ an, sie lässt sich folgendermaßen über den Druck p und den Dampfdruck e berechnen:

$$q = 0,622 \frac{e}{p - 0,378 \cdot e} \quad (2.6)$$

Die relative Luftfeuchte R stellt das Verhältnis aus Dampfdruck e und Sättigungsdampfdruck E in % dar. Die maximale Sättigung der Luft mit Wasserdampf ist 100 %, wird dieser Wert überschritten so kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf.

$$R = \frac{e}{E} \cdot 100 \quad (2.7)$$

2.5. Flussmessungen

Die Eddy-Kovarianz-Methode liefert die direkten Messungen der vertikalen turbulenten Flüsse, wie den latenten und fühlbaren Wärmestrom, den CO_2 Fluss und den Impulsfluss. Dabei werden die horizontalen und vertikalen Windkomponenten beispielsweise mit einem Ultraschallanemometer gemessen. Zusätzlich können mit dem Ultraschallanemometer in der Regel gleichzeitig auch Temperaturmessungen durchgeführt werden. Die Feuchtefluktuationen werden mithilfe von optischen Hygrometern wie LI-7500 oder KH20 gemessen. Der atmosphärische Austausch findet durch turbulente Wirbel (Eddies) verschiedener Größe statt. Diese werden durch die Änderung eines Messsignals repräsentiert. Die Differenz der zwischen den sich aufwärts und abwärts bewegenden Eddies und den enthaltenen Komponenten wird als netto Fluss der skalaren Größen bezeichnet. Die Eddy-Kovarianz-Methode basiert auf Formel (2.8).

Diese spaltet die gemessenen Werte in einen mittleren und einen fluktuierenden Teil, wie Abbildung 2.4 veranschaulicht.

$$x = \bar{x} + x' \quad (2.8)$$

Symbole mit Querstrich repräsentieren Mittelwerte und mit Apostroph fluktuierende Werte. Die Kovarianz k definiert sich aus der vertikalen Windkomponente w und einer skalaren Größe x

$$\begin{aligned} \overline{w'x'} &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(\overline{w_k} - w'_k)(\bar{x}_k - x'_k)] \quad (2.9) \\ &= \frac{1}{N-1} \left[\sum_{k=0}^{N-1} w_k \cdot x_k - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} w_k \sum_{k=0}^{N-1} x_k \right) \right] \end{aligned}$$

Bei verschwindendem Mittelwert des Vertikalwindes stellt der totale Fluss die Kovarianz da. Die Eddy-Kovarianz-Methode basiert auf Formel (2.9), womit die turbulenten Flüsse direkt bestimmt werden können. Für den latenten Wärmestrom Q_E ergibt sich somit

$$Q_E = \rho \cdot \lambda \cdot \overline{w'q'} = \lambda \cdot \overline{w'a'} \quad (2.10)$$

wobei ρ die Dichte von Luft, λ die Verdampfungswärme von Wasser, q die spezifische Feuchte von Wasser und a die absolute Feuchte bezeichnen. Der latente Wärmestrom stellt den Wasserdampftransport und die durch den Verdunstungsprozess „latent“ gespeicherte Wärme dar, die bei der Verdunstung am Boden verbraucht wird und bei der Kondensation, z.B. in den Wolken, wieder an die Atmosphäre abgegeben wird.

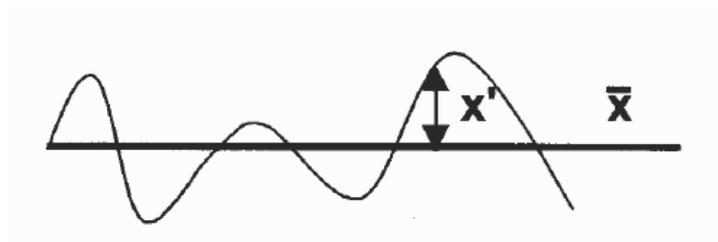


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der mittleren und fluktuierenden Komponente x aus Foken (2006).

Für die mathematischen Grundlagen der Eddy-Kovarianz-Methode sind verschiedene Vereinfachungen notwendig. Daher kann die Methode nur bei Erfüllung der folgenden Annahmen richtige Ergebnisse liefern. Wichtige Annahmen sind eine homogene Unterlage, stationäre Bedingungen und das Verschwinden des mittleren vertikalen Windes. Für die Auswahl des Standortes sind also die einheitliche Unterlage in Zusammenhang mit der Ungestörtheit des Reliefs in der Anströmrichtung, sowie der Ausschluss interner Grenzschichten und Hinderniseinflüsse von größter Bedeutung. Eine Liste weiterer wichtiger Annahmen, die bei Anwendung der Eddy-Kovarianz-Methode zu berücksichtigen sind findet sich in Foken und Wichura (1996). Abweichungen von diesen Annahmen müssen beachtet werden. Es gibt eine Anzahl von Korrekturen und Transformationen, welche auf die Messungen angewendet werden müssen, auch die Qualität der Daten muss überprüft und gewährleistet werden. Im folgenden Teil wird dies genauer erläutert.

Stull (2009) beschreibt die Turbulenz als eine Zusammensetzung von sich überlagernden Eddies verschiedener Größe. Das Turbulenzspektrum ist demnach durch die relative Stärke von Eddies in verschiedenen Skalen definiert. Für die Messung der Windvektoren und der skalaren Größen, wie zum Beispiel Luftfeuchte, sind Messgeräte mit einer hohen zeitlichen Auflösung notwendig, da zur Erfassung des Turbulenzspektrums mit einer hohen Abtastfrequenz gearbeitet werden muss. Turbulenzspektren können über Energiedichtespektren oder auch Powerspektren dargestellt werden. Dabei wird die logarithmierte spektrale Dichte gegen die logarithmierte Frequenz aufgetragen. Des Weiteren findet nach Foken (2006) im Trägheitsbereich, in dem die Bewegungen der Turbulenzelemente keine bevorzugte Richtung haben, bei zunehmender Frequenz eine definierte Energiedichteabnahme für Zustandsgrößen (wie Luftfeuchte) von $-5/3$ statt. Die Darstellung von Energiedichtespektren gibt demnach Auskunft über die Verteilung der gemessenen Frequenzen. Ist die $-5/3$ Steigung vorhanden so deutet dies darauf hin dass die Messgeräte an Messbedingungen angepasst sind.

Nach Foken (2006) sollte die Abtastfrequenz für das Turbulenzspektrums in einem Bereich von 10 bis 20 Hz liegen. Für den Messzeitraum sollte eine Mittelung der gemessenen Größen über 30 Minuten durchgeführt werden. Da der Zeitraum der Messung vor allem von der atmosphärischen Stabilität, der Messhöhe und der Windgeschwindigkeit abhängt beträgt die Messzeit bei labiler Schichtung etwa 10 bis 20 Minuten, bei stabiler Schichtung etwa 30 bis 60 Minuten. Eine Mittelung über 30 Minuten schließt also das gesamte Turbulenzspektrum ein.

Zur Festlegung der Messhöhe spielt nach Foken (2006) die Auswahl der Messgeräte eine entscheidende Rolle. So sollten Messgeräte bei einer Messstreckenlänge von über 20 cm nicht unter 4m Höhe und mit einer Messstreckenlänge von 12 cm nicht unter 2 m eingesetzt werden. Wobei die Auswahl der Messgeräte aber auch von der Größe der turbulenten Wirbel ab-

hängt. Der Abstand und die Orientierung von Ultraschallanemometer und Zusatzgerät (z.B. Hygrometer) hängen vom Windfeld ab. Bei Ultraschallanemometer und Temperatursensoren sollte ein Abstand von 5 cm gewählt werden. Bei Hygrometern als Zusatzgerät 20-30 cm. Nach Kristensen et al. (1997) sollten die Zusatzmessgeräte im Windschatten des Ultraschallanemometers leicht nach unten versetzt angebracht werden. Die Anströmung sollte möglichst ungehindert zum Ultraschallanemometer erfolgen. Die Messstrecke und die Sensorseparation beeinflussen zusammen mit der Zeitkonstante die spektrale Auflösung des Messsystems. Moore (1986) gibt eine Methode für die spektrale Korrektur für Messungen mit Eddy-Kovarianz-Systemen an, die bei Flussberechnungen berücksichtigt werden sollte.

Um der oben genannten Annahme gerecht zu werden, dass die mittlere vertikale Windkomponente verschwindet, ist es notwendig eine Rotation des Koordinatensystems durchzuführen. Eine auf das mittlere Stromlinienfeld ausgerichtete Koordinatenrotation ist die „Planar-fit“ Methode (Wilczak et al., 2001). Das mittlere Stromlinienfeld wird über Tage oder Wochen bestimmt und die Abweichung des Messgeräts verglichen. Aus der Abweichung ergibt sich die Koordinatenrotation. Eine zusätzliche Korrektur, die durchgeführt werden sollte ist die Dichtekorrektur nach Webb et al. (1980), auf Grund des Transportes von Wasser und Wärme. Die Dichtekorrektur, auch Webb-Pearman-Leuning-Korrektur (WPL-Korrektur) genannt, wird angewendet um den Feuchtefluss in Bodennähe, welcher durch die Dichtefluktuationen verursacht wird, zu korrigieren. Die WPL-Korrektur überträgt die volumenbezogenen Konzentrationen in massenbezogene. Sind die turbulenten Fluktuationen im Gegensatz zu den mittleren Konzentrationen klein, so hat diese Korrektur signifikante Auswirkungen. Dies gilt beispielsweise für den Kohlendioxidfluss, bei welchem die WPL-Korrektur einen Unterschied von 50 % betragen kann. Bei der Anwendung am Wasserdampffluss hat sie geringe Auswirkungen. Nach Liebenthal und Foken (2003; 2004) beträgt der Einfluss auf den latenten Wärmestrom 2 bis 3 %. Der Aufbau eines Eddy-Kovarianzmesssystems ist in Abbildung 2.5 dargestellt.



Abbildung 2.5 Eddy-Kovarianz-Messkomplex der Nam Co Station in Tibet mit Anemometer (C-SAT) und Feuchtesensoren (KH20, LI-7500). (Foto: Tobias Biermann)

2.6. Luftfeuchtemessung durch Absorption infraroter Strahlung

Im folgenden Abschnitt soll nun das Prinzip der Feuchtemessung mit dem LI-7500, als Beispiel für ein Open-Path-Hygrometer im infraroten Bereich, beschrieben werden. Dabei wird außer dem Funktionsprinzip, die Kalibrierung des Gerätes und bekannte Probleme bei der Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500 beschrieben.

2.6.1. Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500

Ein häufig verwendetes Messgerät für die Bestimmung der Luftfeuchte durch Absorption infraroter Strahlung, ist das LI-7500 der Firma LI-COR. Auch für die Messungen auf dem tibetischen Plateau wird das Messgerät verwendet. Im Folgenden soll das Messprinzip und der Aufbau des LI-7500 dargestellt werden.

Das Gasanalysegerät LI-7500 hat eine feste Pfadlänge von 125 mm. In dieser Pfadlänge wird ein infraroter Strahl ausgesandt, dessen verringerte Intensität durch die Absorption von Wasser und CO₂ dann durch den Detektor gemessen wird. Das Funktionsprinzip des Gerätes beruht auf der Erzeugung zweier Teilstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen. Dabei liegt eine Wellenlänge in der Absorptionsbande von Wasser beziehungsweise CO₂. Die zweite Wellenlänge liegt in einem nahen Bereich dieser Bande, in dem aber keine Absorption stattfindet. Es handelt sich daher um Absorptions- und Referenzwellenlängen. Mit einem „Chopper“ (Zerhacker) wird das Signal moduliert. Durch Einblenden verschiedener Filter werden die notwendigen Wellenlängen erzeugt. Infrarotes Licht von nicht absorbierender Wellenlängen von 3,95 µm für Wasser und 2,40 µm für CO₂ wird als Referenz für Abschwächungskorrekturen verwendet, während die Absorption von CO₂ und Wasser bei Wellenlängen von 4,26 und 2,59 µm gemessen wird. Die interne digitale Signalumwandlung benötigt eine Antialiasing-Filterung, um eine Signalverfälschung zu vermeiden. Abbildung 2.6 zeigt den schematischen Aufbau des LI-7500. Der Messpfad zwischen den beiden Fenstern ist offen (open path), so dass Luft ungehindert passieren kann.

Da die Infrarotabsorption druckabhängig ist lässt sich folgende Gleichung für die Absorption formulieren (LI COR Instruction Manual, 2004)

$$\frac{\alpha_i}{P_{ei}} = h_i \left(\frac{u_i}{P_{ei}} \right) \quad (2.11)$$

Wobei α die Absorption, P_{ei} den Druck für das spezielle Gas, h eine Funktion und u die Menge eines absorbierenden Gases (mol m^{-2}) bezeichnen. Der Index i steht für das jeweilige Gas (Wasser oder CO₂). Durch Umschreiben der Gleichung in volumenbezogene Teilchendichte (mol m^{-3}) durch Einfügen einer Pfadlänge d und unter Berücksichtigung von $u_i = \rho_i d$ ergibt sich:

$$\rho_i = \frac{P_{ei}}{d} h_i^{-1} \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}} \right) \quad (2.12)$$

Durch Kombination der inversen Funktion $h()$ mit der Pfadlänge d kann eine neue Funktion $f_i()$ eingeführt werden. Die Funktion $f_i()$ bildet ein Polynom 3. Grades und legt den Verlauf von ρ_i/P_{ei} gegen α_i/P_e fest wie aus folgender Gleichung zu erkennen ist.

$$\rho_i = P_{ei} f_i \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}} \right) \quad (2.13)$$

Die Kalibrierungsfunktion $f_i()$ kann durch das Messen von Gas unterschiedlicher Dichte ρ_i und dem Auftragen von ρ_i/P_{ei} gegen α_i/P_e dargestellt werden. Die Dichte kann mithilfe der Gleichung für ideale Gase in bekannte Konzentrationen umgerechnet werden. Das LI-7500 schätzt die Absorption über folgende Formel ab (LI COR Instruction Manual, 2004):

$$\alpha_i = \left(1 - \frac{A_i}{A_{i0}} \right) \quad (2.14)$$

Wobei A_i die gemessene Spannung am Detektor von der Quelle bei einer absorbierenden Wellenlänge für das Gas i darstellt und A_{i0} die Spannung in einer Referenzwellenlänge, bei der keine Absorption stattfindet, darstellt. Das LI-7500 misst A_i und A_{i0} abwechselnd 152-mal pro Sekunde. Wobei zusätzlich „Zero“ z_i und „Span“ S_i im Absorptionsterm eingefügt werden (vgl. Abschnitt 2.6.2). Obwohl die Temperatur des Detektor und der Filter kontrolliert wird, kann es im Detektor zu einer leichten Temperaturdrift kommen, wenn sich die Außentemperatur ändert. Dieser Fehler steht im direkten Zusammenhang mit der Kühlerkontrollspannung des Detektors, welche gemessen wird und muss daher zusätzlich in die Gleichung aufgenommen werden. Im Absorptionsterm muss zusätzlich die Querempfindlichkeit zu anderen Gasen berücksichtigt werden.

Fasst man Gleichung (2.13) und (2.14) zusammen, lässt sich die gesamte Gleichung zur Berechnung der molaren Dichte [mmol m^{-3}] aus der Absorption für Wasser wie folgt schreiben

$$\rho_w = P f_w \left(\frac{\alpha_w S_w}{P} \right) \quad (2.15)$$

P bezeichnet hierbei den Luftdruck, der Index w steht für Wasserdampf und f_w stellt das Polynom dritten Grades da, welches sich aus der Kalibrierung bei unterschiedlichen Feuchtwerten ergibt (LI COR Instruction Manual, 2004).

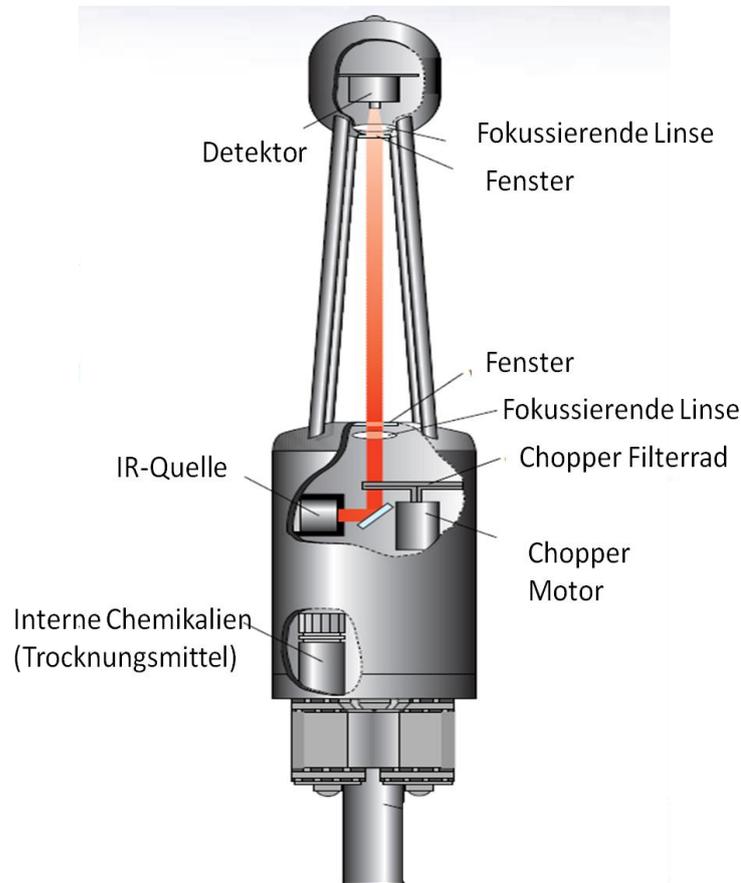


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau des LI-7500. (Broschüre LI-COR, verändert)

2.6.2. Kalibrierung des LI-7500

Bei der Kalibrierung des LI-7500 wird zwischen der Kalibrierung durch den Hersteller und den Anwender unterschieden. Bei der Kalibrierung durch den Vertreiber werden verschiedene Feuchtekonzentrationen bei den Temperaturen 17 °C, 32 °C und 45 °C durch den Analysepfad des LI-7500 geleitet. Dabei werden der Druck und die Außentemperatur konstant gehalten. Die erhaltenen Absorptionswerte werden gegen die bekannte Feuchte aufgetragen, um dann ein Polynom dritten Grades durch die Punkte zu legen. Dieses Kalibrierungspolynom ist für jedes Messgerät speziell und wird vom Hersteller beim Erwerb eines LI-7500 mitgeliefert (Abbildung 2.7). Zusätzlich werden „Span“ und „Zero“, die Querempfindlichkeit zu CO₂ und die Nulldrift des Gerätes bestimmt.

Bei der Kalibrierung durch den Anwender werden nur „Zero“ und „Span“ neu gesetzt, um das

Polynom zu berichtigen. Dabei wird für das Setzen von „Zero“ Gas ohne Wassergehalt durch den Absorptionspfad geleitet, um dann die Absorption auf null festzusetzen. Für das Setzen von „Span“ wird Gas einer bestimmten Konzentration durch den Analysepfad geleitet, um damit das Kalibrierungspolynom zu berichtigen. Laut dem Vertreiber sollte die Kalibrierung durch den Anwender je nach Einsatzgebiet monatlich bis vierteljährlich durchgeführt werden. Weisensee et al. (2003) beschreiben die Kalibrierungsfunktion als sehr stabil. Bei einem Versuch in dem die Langzeitstabilität der Kalibrierung des LI-7500 alle sechs Monate getestet wurde, konnten nur sehr geringe Differenzen von der Referenzmessung festgestellt werden.

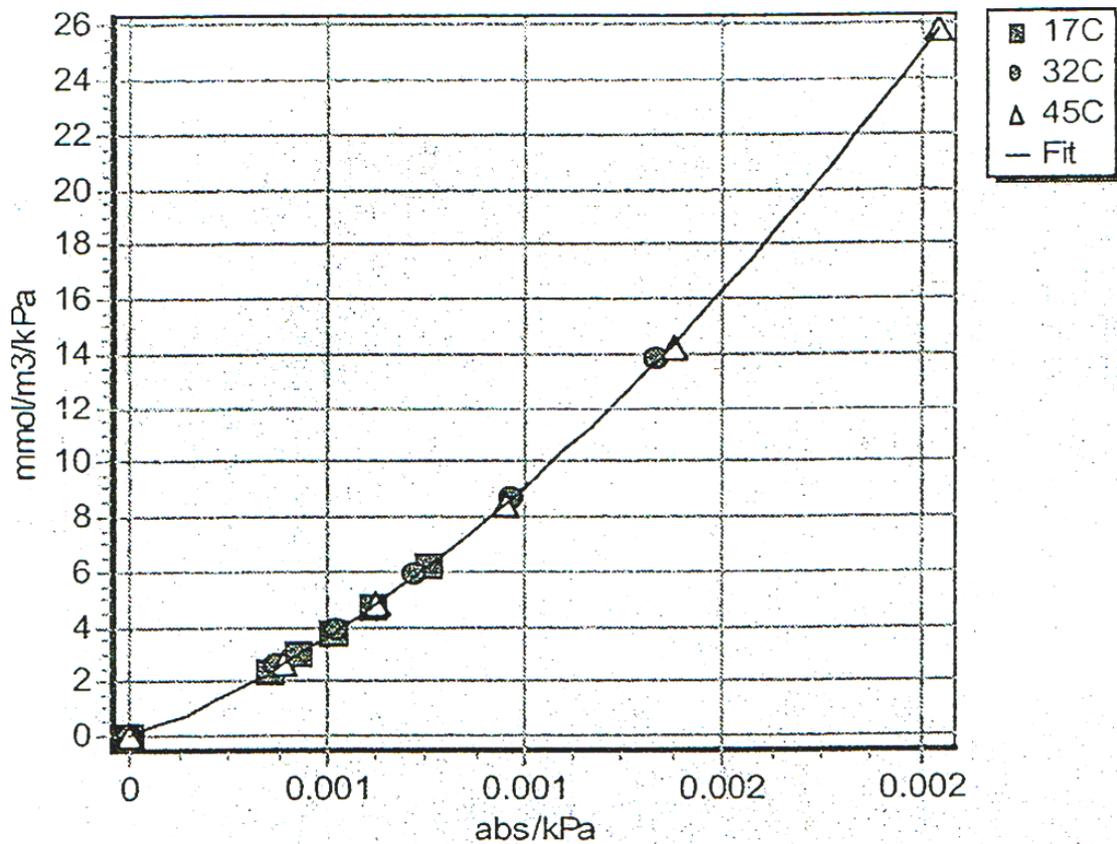


Abbildung 2.7: Kalibrierungspolynom eines LI-7500 (SN 1636) des Herstellers. Aufgetragen ist die Luftfeuchte in $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{kPa}^{-1}$ gegen die Absorption in kPa^{-1} bei drei verschiedenen Temperaturen (17°C, 32°C, 45°C). Der Luftdruck für die Kalibrierung lag bei 97 kPa.

2.6.3. Luftfeuchtemessung mit LI-7500

Bei der Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500 sind folgende Dinge zu berücksichtigen. In Bezug auf die Kalibrierungshäufigkeit wird vom Hersteller eine Kalibrierung des Gerätes durch den Anwender monatlich bis vierteljährlich empfohlen, um die notwendige Genauigkeit der Messungen zu gewährleisten (LI COR Instruction Manual, 2004).

Das LI-7500 stellt zusätzlich Diagnoseinformationen bereit. Mithilfe der Diagnoseinformationen können Daten zur Chopper-Temperaturregelung, dem Status des Choppermotors, des Detektorkühlers sowie die Synchronisation zwischen der Software, dem digitalen Signalprozessor und dem Choppermotor ausgelesen werden. Eine zusätzliche und hilfreiche Information stellt auch der AGC-Wert dar. Dieser beschreibt die Durchlässigkeit der Fenster. Vom Hersteller sind AGC-Werte von 55-60% für saubere Fenster angegeben. Ändert sich der AGC-Wert, so können die Fenster beispielsweise verschmutzt oder vereist sein. Dies kann bei der Analyse der Daten hilfreich sein (LI COR Instruction Manual, 2004).

Ein Problem das in den letzten Jahren immer deutlicher wurde, ist die Empfindlichkeit des Gerätes zur Sonnenstrahlung in Bezug auf CO₂ Messungen. Die Firma LiCor konnte das Problem lösen, jedoch änderte dies die Präzisierung der Luftfeuchtemessung. Nach Weisensee et al. (2003) änderte sich damit die Genauigkeit bei der Messung der absoluten Feuchte. Sie stellten eine maximale Abweichung von $\pm 0,75 \text{ g m}^{-3}$ auf $\pm 3 \text{ g m}^{-3}$ bei der Wasserdampfmessung in einem Temperaturbereich von -25 bis 50 °C fest.

Im Zusammenhang mit diesem Problem nahm auch die Nulldrift mit steigender Temperatur zu. Das Gerät wurde also temperaturempfindlicher mit maximal $\pm 0,4 \text{ g m}^{-3}$ pro 1 °C. Im Versuch zeigte sich, wie sich das Gerät vor und nach der erneuten Kalibrierung durch den Hersteller mit steigender Temperatur verhält (Abbildung 2.8).

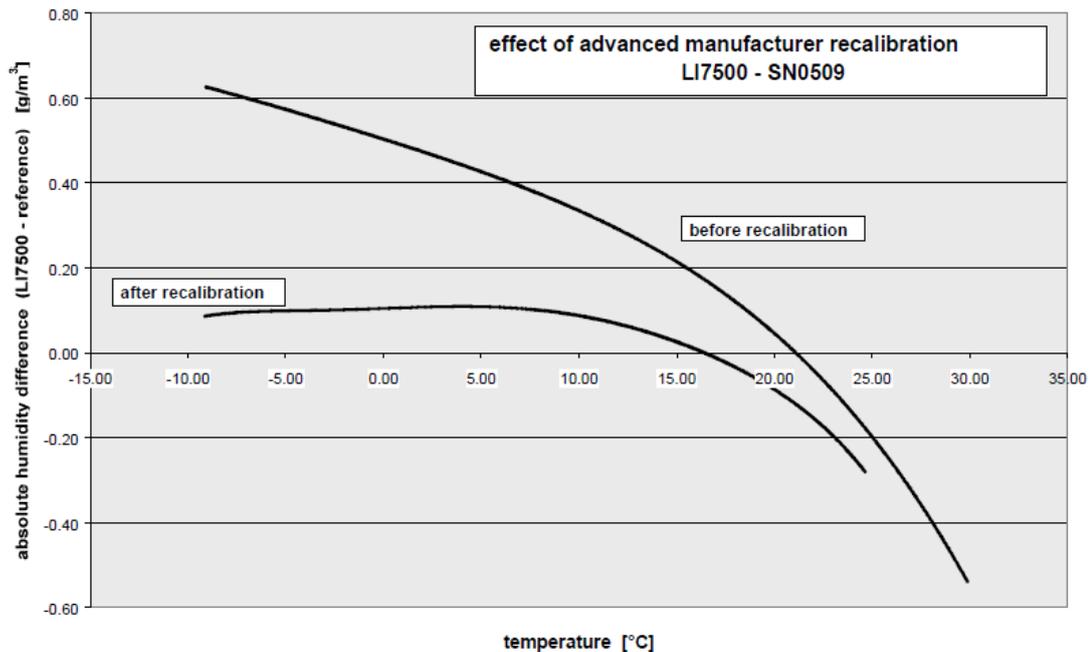


Abbildung 2.8: Effekt einer erweiterten Rekalibrierung durch den Hersteller über einen Temperaturbereich von -10 bis 30 °C und einem Feuchtebereich von 1 bis 3 g m⁻³. „before recalibration“ bezeichnet die Kurve vor der Kalibrierung durch den Hersteller und „after recalibration“ danach. Aus Weisensee et al. (2003)

Nach Burba et al. (2008) entsteht ein fühlbarer Wärmestrom innerhalb des Messpfades, der nicht zum Wärmestrom der Umgebungsluft gehört. Dies ist der Fall wenn die Oberflächentemperatur des Gerätes von der Außentemperatur deutlich abweicht. Dadurch wird die Dichte des gemessenen Gases im Messpfad beeinflusst. Der Aufbau des Gerätes führt zu Wärmequellen und -senken, welche die Luft im Messpfad durch Austauschprozesse und Strahlung beeinflussen. Burba et al. (2008) veröffentlichten eine Reihe von Problemlösungsansätzen für diesen Fall. Beispielsweise durch hochfrequente Temperaturmessungen innerhalb des Pfades. Bei bereits vorhandenen Daten könnte nachträglich ein weiterer Term für den entstandenen sensiblen Wärmestrom an die Dichtekorrektur (vgl. Abschnitt 2.5) von Webb et al. (1980) für CO₂ und H₂O eingeführt werden. Diese Korrektur hat für CO₂-Werte in kalten Regionen den höchsten Einfluss. Reverter et al. (2010) beschreibt bei einer Analyse von NEE (Netto Austausch des Ökosystems von CO₂) und der Evapotranspiration den Effekt der Burba-Korrektur für vernachlässigbar bei Tageswerten. Bei Langzeitbeobachtungen auf Jahresbasis hat die Korrektur aber einen größeren Einfluss. Vor allem bei CO₂-Messungen, da hier das CO₂-Jahres-Budget durch die Korrektur von einer Senke zu einer Quelle werden kann.

2.7. Feuchtemessung durch Absorption von UV-Strahlung

Bisher wurde die Feuchtemessung durch die Absorption infraroter Strahlung beschrieben. Im folgenden Teil soll nun die Feuchtemessung durch Absorption von UV-Strahlung vorgestellt werden und insbesondere auf die Feuchtemessung mit dem Kryptonhygrometer (KH20) eingegangen werden. Des Weiteren soll die Kalibrierung, welche sich vor Ort durchführen lässt vorgestellt werden.

2.7.1. Feuchtemessung mit dem Kryptonhygrometer

Beim Kryptonhygrometer wird die ultraviolette Strahlung durch Kryptongas erzeugt. Die Strahlung wird in zwei Wellenlängen emittiert, einer Hauptbande bei 123,58 nm (Bande 2) und einer kleineren Bande bei 116,49 nm (Bande 1), wobei die Absorption von Wasserdampf hauptsächlich bei 123,58 nm stattfindet und für andere Gase in der Atmosphäre relativ gering ist (Abbildung 2.9). Bei 116,49 nm werden Wasser und Sauerstoff absorbiert, allerdings wird die Intensität dieses Strahls durch die Magnesiumfluoridfenster von Quelle und Detektor wesentlich verringert (Campbell und Tanner 1985).

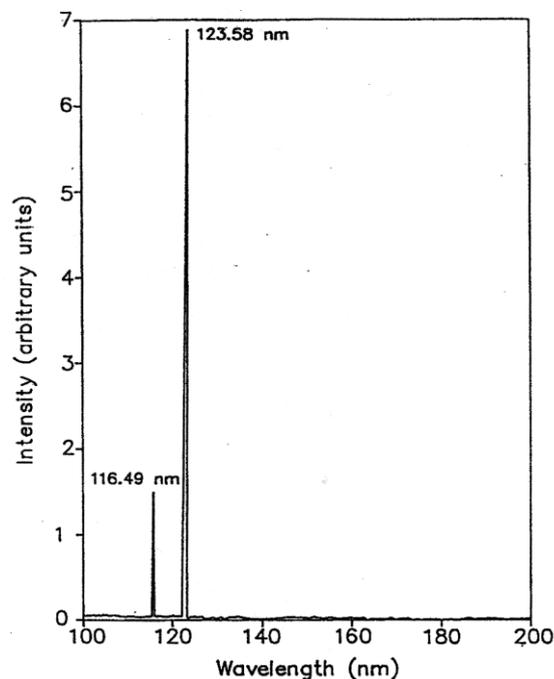


Abbildung 2.9: Emissionsspektrum der Kryptonlampe (Campbell und Tanner 1985)

Auch für das Kryptonhygrometer gilt das Lambert-Beer'sche Gesetz (Formel (2.1)), wobei die Kryptonlampe eine Lebenszeit bis zu 1000 Stunden hat und somit die Intensität der Strahlung I_0 mit der Zeit abnimmt. Die Flussmessungen werden dadurch aber nicht beeinflusst, da hierfür nur die Fluktuationen der Feuchte eine Rolle spielen.

Da beim Kryptonhygrometer die Absorption eines UV-Strahls durch Wasser und Sauerstoff in zwei Absorptionsbanden gemessen wird, muss das Lambert-Beer'sche Gesetz auf die Absorptionsbedingungen des Kryptonhygrometers in folgender Form angepasst werden (Campbell und Tanner, 1985; Buck, 1976):

$$I = I_{0_1} \exp[-d(k_{w_1}\rho_{w_1} + k_{o_1}\rho_{o_1})] + I_{0_2} \exp[-d(k_{w_2}\rho_{w_2} + k_{o_2}\rho_{o_2})] \quad (2.16)$$

Wobei der Index 1 und 2 die spektralen Banden bei 116,49 nm und bei 123,58 nm bezeichnen und der Index o für Sauerstoff und w für Wasser stehen. Obwohl die Absorption aus zwei Banden besteht, wird sie trotzdem als ein Strahl gemessen. Dadurch können zusätzliche Vereinfachungen gemacht werden. Vereinfachend wirkt sich die Tatsache aus, dass die Absorption bei 123,58 nm im Vergleich zur Absorption bei 116,49 nm das Doppelte beträgt (Tillman 1965). Für die Sauerstoffabsorption wird Absorptionsbande 1 als f und Bande 2 als $(1-f)$ dargestellt. Aus diesen Annahmen ergibt sich die folgende vereinfachte Gleichung:

$$I = I_{0_1} \exp(-dk_w\rho_w) [f \exp(-xk_{o_1}\rho_{o_1}) + (1-f) \exp(-dk_{o_2}\rho_{o_2})] \quad (2.17)$$

Für die meisten Anwendungen kann die zusätzliche Sauerstoffabsorption vernachlässigt werden. Daher ergibt sich für die Kalibrierung des Kryptonhygrometers der Firma Campbell Sci. folgende Grundgleichung:

$$\ln(V) = \ln(V_0) - a \cdot d \cdot k_w \quad (2.18)$$

Nach Foken und Falke (2010) liegt die Konstante V_0 zwischen 8 und 10 ln(mV), der Kalibrierungskoeffizient für Wasser K_w hat die Einheit ln(mV) $\text{m}^3 \text{g}^{-1} \text{cm}^{-1}$, die Pfadlänge d in cm und die absolute Luftfeuchte a wird in g m^{-3} angegeben. Diese Vereinfachung kann gemacht werden, wenn nur die Fluktuationen von Interesse sind. Diese Kalibrierung kann nur angewendet werden, wenn die Sauerstoffkonzentration konstant bleibt. Für Flugzeugmessungen ist dies, beispielsweise nicht geeignet, da sich dann die Sauerstoffkonzentration abhängig von der Höhe ändert.

2.7.2. Kalibrierung des Kryptonhygrometers KH20 mit variabler Pfadlänge

Dieser Abschnitt soll über die Kalibrierung des Kryptonhygrometers einen Überblick geben. Insbesondere soll die Kalibrierung des Kryptonhygrometers mit variabler Pfadlänge vorgestellt werden.

Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz (Formel (2.1)) kann die Kalibrierung über eine konstante Pfadlänge und eine sich ändernde Feuchte vorgenommen werden. Eine andere Möglichkeit für eine Kalibrierung besteht über eine variable Pfadlänge bei konstanter Feuchte und konstantem Sauerstoffgehalt, wie dies beim Lyman-alpha Hygrometer erstmals durch Buck (1976) realisiert und später durch eine neuere Version von Foken (1998) ersetzt wurde.

Beim Lyman-alpha Hygrometer ist das Verhältnis der Absorptionskoeffizienten ungefähr $2 \cdot 10^3$ (Tillmann 1965), während das Verhältnis der Dichten bei $2 \cdot 10^{-1}$ liegt. Daher ist der Einfluss von Wasser bei der Kalibrierung 100-mal höher ist als der Einfluss von Sauerstoff. Beim Kryptonhygrometer ist das jedoch nicht der Fall. Hier sind die Absorptionskoeffizienten von Wasserdampf und Sauerstoff in derselben Ordnung bei einer fast 20-mal höheren partialen Sauerstoffdichte. In bisherigen Veröffentlichungen zum Kryptonhygrometer wurden die Absorptionskoeffizienten k_{w1} und k_{w2} nach Watanabe und Zelikoff (1953) sowie Johns (1965) verwendet. Aktuellere Daten mit einer spektralen Auflösung von 0,05 nm finden sich in der Veröffentlichung von Mota et al. (2005). Durch Transformation von der Basis e zur Basis 10 (Finlayson-Pitts und Pitts, 2000) erhält man für Bande 1 den Absorptionskoeffizienten k_{w1} von $28,5 \text{ (atm bei } 298 \text{ K)}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ und für Bande 2 den Absorptionskoeffizienten k_{w2} von $49,5 \text{ (atm bei } 298 \text{ K)}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Die Absorptionskoeffizienten für Sauerstoff finden sich in einer Studie von Ogawa und Ogawa (1975) mit einer spektralen Auflösung von 0,1 nm. Demnach wird der Absorptionskoeffizient von Bande 1 für Sauerstoff k_{o1} von 19,9 für die Basis 10 angegeben, welcher vergleichbar mit dem Absorptionskoeffizienten für Wasser ist. Für Bande 2 ist der Sauerstoffabsorptionskoeffizient 32,5 für die Basis 10 und beträgt damit weniger als ein 10tel des Wasserabsorptionskoeffizienten. Darüber hinaus ist das Signal von Bande 1 um 20 % geringer als das Signal von Bande 2. Der Grund dafür liegt in der geringeren Intensität und Breite der Bande, was auch in Abbildung 2.9 deutlich wird.

Die Kalibrierung des Kryptonhygrometers mit variabler Pfadlänge folgt den von der Herstellerfirma Campbell Sci. angegebenen Prinzipien und Formeln. Die erste Software der Kalibriereinheit von Foken und Falke (2010) erreichte eine Kalibrierung über eine effektive Pfadlänge. Dieses kompliziertere System konnte aber ab August 2010 durch das folgende einfachere Kalibrierungsprinzip ersetzt werden. Abbildung 2.10 zeigt den Aufbau der Kalibriereinheit mit variabler Pfadlänge. Für die Kalibrierung mit variabler Pfadlänge kann die vereinfachte Gleichung (2.17) nicht verwendet werden um einen effektiven Absorptionskoeffizienten zu ermitteln. Da beim

Ausgabesignal aber beide Spektrallinien zusammengefasst sind, führt dies zu folgender Vereinfachung:

$$I = I_0 \exp \left\{ -d \left[\frac{f}{f-1} (k_{w_1} \rho_{w_1} + k_{o_1} \rho_{o_1}) + k_{w_2} \rho_{w_2} + k_{o_2} \rho_{o_2} \right] \right\} \quad (2.19)$$

Der Absorptionskoeffizient von Wasser ist in beiden Bändern ungefähr doppelt so hoch wie der Absorptionskoeffizient von Sauerstoff. Allerdings ist die Dichte von Wasser mindestens 20-mal kleiner als die Dichte von Sauerstoff und der Einfluss von Bande 1 ist sehr viel kleiner als der Effekt von Bande 2. Die Absorption ist in Bande 2 aufgrund der Sauerstoffabsorption am signifikantesten. Gleichung (2.19) kann dadurch in folgender Weise umgeschrieben werden.

$$I = I_0 \exp(-x k_o \rho_o) \quad 2.20$$

Insgesamt basiert die Kalibrierung des Kryptonhygrometers auf der Annahme, dass der Kalibrierungskoeffizient über Variierung der Pfadlänge bei konstanten Gaskonzentrationen erschlossen werden kann. Weiterhin, dass die Intensität der Kryptonlampe die gleichen Auswirkungen auf die Wasserdampf- und Sauerstoffabsorption hat. Somit kann Sauerstoff für die Ermittlung der Lampenkalibrierung für den Fall verwendet werden, dass aufgrund der höheren Dichte von Sauerstoff die Sauerstoffabsorption höher ist als die Wasserdampfabsorption. Wenn gleichzeitig eine Wasserdampfkalibrierung des Kryptonhygrometers (z.B. vom Hersteller) und eine Sauerstoffkalibrierung (durch Kalibrierung mit Kalibriereinheit mit variabler Pfadlänge) vorhanden ist, kann die Veränderung der Kalibrierungskoeffizienten über die Lebenszeit des Kryptonhygrometers nun durch die Sauerstoffkalibrierung kontrolliert werden.

Der Kalibrierungskoeffizient für Wasserdampf wird vom Hersteller im Kalibrierschein mitgeliefert. Der Extinktionskoeffizient für Sauerstoff K_o kann experimentell bestimmt werden, dies sollte gleich bei der allerersten Kalibrierung des Gerätes geschehen.

Der Kalibrierungskoeffizient von Wasserdampf für das Gerät und die Umgebung kann durch den Vergleich der Sauerstoffkalibrierung und dem daraus resultierenden Kalibrierungskoeffizienten mit dem ersten Kalibrierungskoeffizienten für Sauerstoff (für den auch eine Wasserdampfkalibrierung vorhanden sein muss) korrigiert werden. Die Resultierende Formel daraus ist:

$$\ln(V) = \ln(V_0) - \rho_o \cdot d \cdot K_o \quad (2.21)$$

wobei K_O den aktuellen Kalibrierungskoeffizient darstellt. Durch die Querempfindlichkeit von Wasserdampf zu Sauerstoff beträgt der Kalibrierungsfehler weniger als 10 %, was einen viel geringeren Fehler darstellt, als die Änderung der Intensität der Kryptonlampe innerhalb eines Jahres. Daher kann mit dem Kalibrierungskoeffizienten für Sauerstoff K_O und dessen Änderung über die Zeit auch der Kalibrierungskoeffizient für Wasserdampf K_W errechnet werden. Von einem neuen Gerät wird demzufolge die Wasserdampfkalibrierung der Firma Campbell Sci. und eine Sauerstoffkalibrierung der Kalibriereinheit benötigt. Liegt keine Wasserdampfkalibrierung vor, so muss eine Wasserdampfkalibrierung bei konstanter Sauerstoffkonzentration wiederholt werden.

Die Formel für den aktuellen Kalibrierungskoeffizienten k_w lautet demensprechend:

$$K_W \text{ Aktuell} = \frac{K_W \text{ Beginn} \cdot K_O \text{ Aktuell}}{K_O \text{ Beginn}} \quad (2.22)$$

Bei der Kalibrierung selbst wird die Pfadlänge verändert, während die Feuchte der Umgebung als konstant angesehen wird. Die Feuchte der Umgebung wird durch ein Referenzmessgerät (HMP45A) bestimmt. Dafür wird die Pfadlänge in 15 bis 20 Schritten verändert und das Signal gemessen. Aus der resultierenden Regressionsgerade $[\ln V, d \cdot p_0]$ wird ein linearer Abschnitt von mindestens fünf Punkten verwendet, um eine Kalibrierung durchzuführen. Die Rahmenbedingungen für eine Kalibrierung im Labor sind für den niedrigsten Korrelationskoeffizient und die maximale Abweichung, die von der Regressionslinie erreicht werden darf, festgelegt. Der niedrigste Korrelationskoeffizient für die Kalibrierung liegt bei 0,995, wobei die maximale Abweichung der Daten von der Regressionslinie 0,1 ln(mV) nicht überschreiten und die Abweichung des Kalibrierungskoeffizienten von der vorherigen Kalibrierung nicht mehr als 0,05%/100 sein darf. Die Rahmenbedingungen um eine Kalibrierung im freien Feld zu erreichen sind nicht so streng wie die Bedingungen für eine Kalibrierung im Labor. Es empfiehlt sich möglichst geringe turbulente Bedingungen für die Kalibrierung zu wählen, dazu sind vor allem Vorbeziehungsweise Nachmittag geeignet. Mithilfe der Wasserdampf- und der Sauerstoffkalibrierung für das neue Gerät lässt sich die erhaltene Sauerstoffkalibrierung in die Wasserdampfkalibrierung zurückrechnen. Als Ergebnis der Kalibrierung erhält man die Konstanten V_0 [ln(mV)] und K_W [ln(mV)m³g⁻¹cm⁻¹], für eine gegebene Pfadlänge d [cm] wird außerdem der Koeffizient dK_W in [ln(mV)m³g⁻¹] angegeben. Die Kalibriereinheit setzt sich aus einem Schrittmotor, einem PC und einem Feuchtesensor zusammen. Der genaue Aufbau ist in Abbildung 2.10 zu sehen. Für die Kalibrierung wird das KH20 auf die vorgesehene Vorrichtung geschraubt. Diese Vorrichtung ist beweglich und ändert den Abstand zwischen den beiden Kryptonröhren mithilfe des

Schrittmotors. Der Abstand der Kryptonröhren muss je nach Luftfeuchtebedingungen gewählt werden (2, 4 oder 10mm). In diesem Abstand werden die Kryptonröhren aufgeschraubt. Der sich mit dem Abstand verändernde Output InV wird gemessen und wie oben beschrieben wird die resultierende Regression von der Software berechnet. Nach der Kalibrierung werden die Kalibrierungsdaten zusammen mit der vorherigen Kalibrierung dargestellt. Außerdem wird zusätzlich ein Kalibrierungsprotokoll als Datei erstellt und gespeichert.

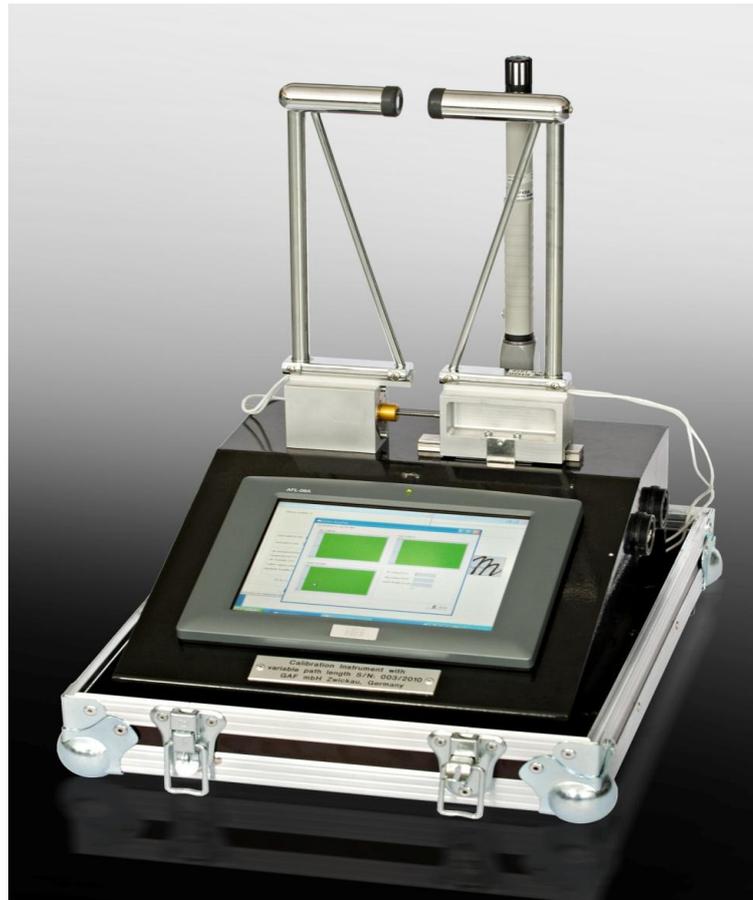


Abbildung 2.10: Kalibriereinheit mit Kryptonhygrometer und HMP45A (Foken und Falke, 2011)

2.7.3. Verwendung des Kryptonhygrometers

Durch die starke Absorption von Wasserdampf, ist das Gerät sehr sensitiv und eignet sich gut für den Einsatz in Gebieten mit geringer Luftfeuchte oder bei niedrigen Temperaturen. Laut dem Hersteller gibt es allerdings für den Einsatz eines Hygrometers Einschränkungen, die beachtet werden müssen.

Im Vergleich zu Wasserdampffluktuationen ist der Effekt von Sauerstofffluktuationen aufgrund von Druckschwankungen nach Tanner et al. (1993) verschwindend gering. Daher ist die Quersensitivität für Flussmessungen nicht relevant. Trotzdem wird weiterhin eine Sauerstoffkorrektur benötigt (Tanner et al., 1993; van Dijk et al., 2003)

Das Kalibrierungsprotokoll der Herstellerfirma Campbell Sci. schließt Kalibrierungen für saubere und verunreinigte Fenster ein, sowie verschiedene Feuchtebereiche. Durch die Kalibrierung in 1000 m Höhe werden die Geräte von Campbell Sci. bei geringeren Sauerstoffkonzentrationen, als wie in den meisten Regionen der Erde vorherrschend, kalibriert. Daher ist eine Kontrolle der Sauerstoffkonzentration und der Fensterverunreinigung notwendig. Die Kalibriereinheit mit variabler Pfadlänge könnte zur Verringerung des Problems beitragen. Jedoch kann die Kalibrierung nur für den Ort der Kalibrierung verwendet werden und muss wiederholt werden, sobald das Gerät unter veränderten Bedingungen verwendet wird oder eine Verunreinigung der Fenster stattfindet. Zusätzlich sollte das Gerät nur für kurze und betreute Studien herangezogen werden, da einige Komponenten des Messsystems vor Regen und der Kondensation von Wasserdampf geschützt werden müssen (Campbell und Tanner, 1985). Eine Verunreinigung der Fenster sollte aber nur einen Offset des Feuchtesignals zur Folge haben. Damit ist der Einfluss auf die Ergebnisse für die Varianzen und Kovarianzen über ein 30-Minuten-Intervall vernachlässigbar.

2.8. Verwendung von LI-7500 und KH20

Die Unterschiede der Messgeräte sind bereits in Weisensee et al. (2003) dargestellt. In Tabelle 2.3 sind die wichtigsten Merkmale der beiden Messgeräte gegenübergestellt. Wichtig für meteorologische Messungen und die Auswahl des Gerätes sind folgende Aspekte: die Datenanalyse, technischen Daten der Geräte, Probleme, die bei Messungen beachtet werden müssen und Korrekturen, die für die Datenauswertung erforderlich sind.

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung der Feuchtemessgeräte LI-7500 und KH20

	KH20	LI-7500	Anmerkungen
Datenanalyse			
Absolute oder relative Feuchtemessung	Relative Feuchte	Absolute Feuchte	
Störung des Windfeldes	Gering	Gering	
Referenzmessung notwendig	Ja	Ja	
Pfadlänge anpassbar	Ja	Nein	Pfadlänge LI-7500: 12,5 cm
Messung anderer Gase	Nein	Ja	LI-7500 misst zusätzlich CO ₂
Technische Daten			
Betreuungsaufwand	Hoch	Niedrig	
Benötigte Energie	Gering	Gering	
Lebenszeit der Lampe	1000 h	> 1000 h	
Probleme			
Empfindlich bei Sonneneinstrahlung	Nein	Ja	
Empfindlich für Regen, Schnee, Insekten	Ja	Ja	LI-7500 ist dabei aber unempfindlicher als KH20 (Weisensee et al. 2003)
Korrekturen			
Notwendige Korrekturen von	Tanner Moore Webb	Webb Moore	Webb et al. (1985), Tanner et al. (1993), Moore (1986)
Zusätzliche Korrekturen von		Burba	Burba et al. (2008)

Die Empfindlichkeit des LI-7500 in Bezug auf Umwelteinflüsse wie Regen, Schnee oder Insekten im Messpfad ist geringer als, die des KH20. So zeigt eine Gegenüberstellung von Weisensee et al. (2003) das Verhalten von Psychrometer, LI-7500 und KH20. Während beim KH20 Regen oder Tau schnell zu einem Ausfall der Datenmessung führt, so tritt dies beim LI-7500 seltener ein. In diesem Zusammenhang wird von Weisensee et al. (2003) auch die gute Übereinstimmung der Werte der absoluten Feuchte von LI-7500 und dem Psychrometer, das als Referenzmessgerät dient, erwähnt. Während die Werte der absoluten Feuchte bis auf den Zeitpunkt des Regenereignisses in etwa die gleichen Werte, wie das Psychrometer zeigen, so sind die Werte der absoluten Feuchte beim KH20 leicht erhöht.

Ein Vergleich der Standardabweichungen von LI-7500 und KH20 von Weisensee et al. (2003) zeigte, dass die gemessenen Fluktuationen des KH20 um ca. 12 % größer waren als die des LI-7500. Ein Grund für diese Abweichung konnte bisher nicht gefunden werden. Bei der Analyse solcher Abweichungen stellen vor allem die Übertragungsfunktion und die Ausgabewerte beim LI-7500 eine große Hürde dar. Im Gegensatz zum KH20, bei welchem die gemessene Absorption direkt als Spannungswerte ausgegeben wird, liegt dem LI-7500 ein viel komplizierteres Messsystem zu Grunde. Beim LI-7500 werden die Absorptionswerte direkt in der PC-Software des Herstellers berechnet. Die genaue Berechnung wird dabei aber vom Hersteller nicht angegeben, ebenso wie die gemessenen Spannungswerte der Absorption nicht ausgelesen werden können. Das Messsystem von LI-7500 ist daher vom Anwender weniger kontrollierbar und macht eine Fehleranalyse durch den Anwender schwierig bis unmöglich.

3. Material und Methoden

Das Experiment wurde in Tibet, China, an der Nam Co Comprehensive Research Station durchgeführt. Diese Station liegt südöstlich des Nam Co Sees, welcher sich 150 km nördlich von Lhasa, der Hauptstadt Tibets befindet. Das Experiment fand im Winter 2010 statt, dabei wurden Messdaten vom 13.02. bis 25.02.2010 aufgenommen. Im Folgenden Abschnitt sollen die Lage und das Klima des Versuchsortes genauer beschrieben werden. Außerdem soll die Durchführung des Experimentes und die Datenauswertung dokumentiert werden. Zusätzlich zum Winterexperiment wurden Daten aus einem Experiment im Sommer 2009 am Nam Co herangezogen. Daher soll das Experiment im Sommer 2009 zum Schluss kurz beschrieben werden.

3.1. Beschreibung der Lage und des Klimas des Versuchsortes

Die Nam Co Comprehensive Research Station, des „Institute of Tibetan Plateau Research“ der Chinesischen Akademie der Wissenschaften liegt in Tibet auf einem Plateau von 4700 m Höhe, N 30 46,360 und E 90 57,722 und ist von Osten bis Westen von Bergen eingeschlossen. Der Gebirgszug erreicht 5700 m ü.NN und liegt in einer Distanz von 15 km. Im Nordwesten der Station befindet sich in 1 km Entfernung der Nam Co See. Die Station auf deren Gelände das Experiment durchgeführt wurde liegt auf einer ebenen Fläche. Der Bestand auf dem die Eddy-Kovarianzmessungen durchgeführt werden ist Wiese, wie auf Abbildung 3.2 zu erkennen ist. Im Winterexperiment befand sich auf der Vegetation eine ca. 10 cm dicke Schneeschicht.

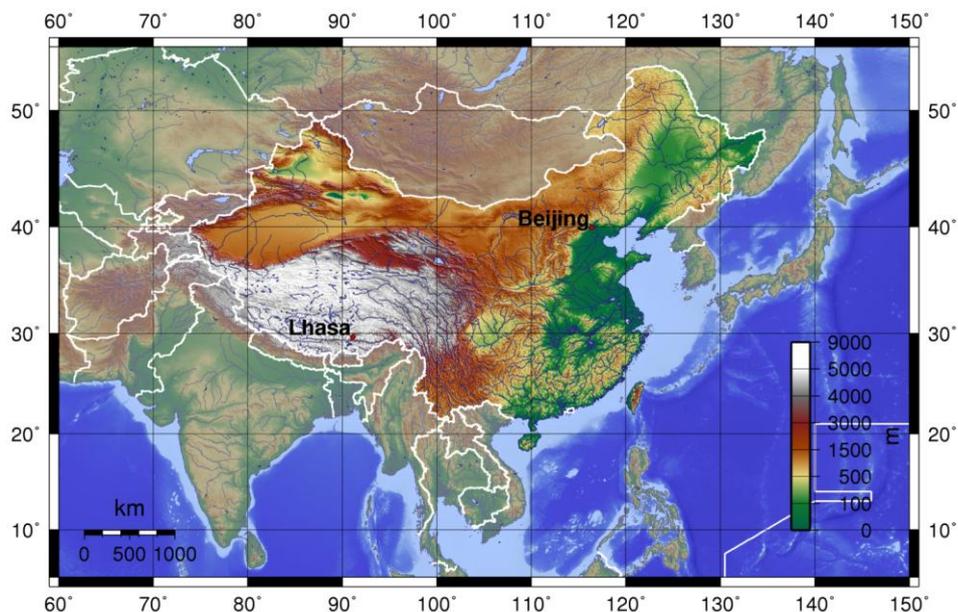


Abbildung 3.1: Lage des tibetischen Hochplateaus mit der Hauptstadt Lhasa.

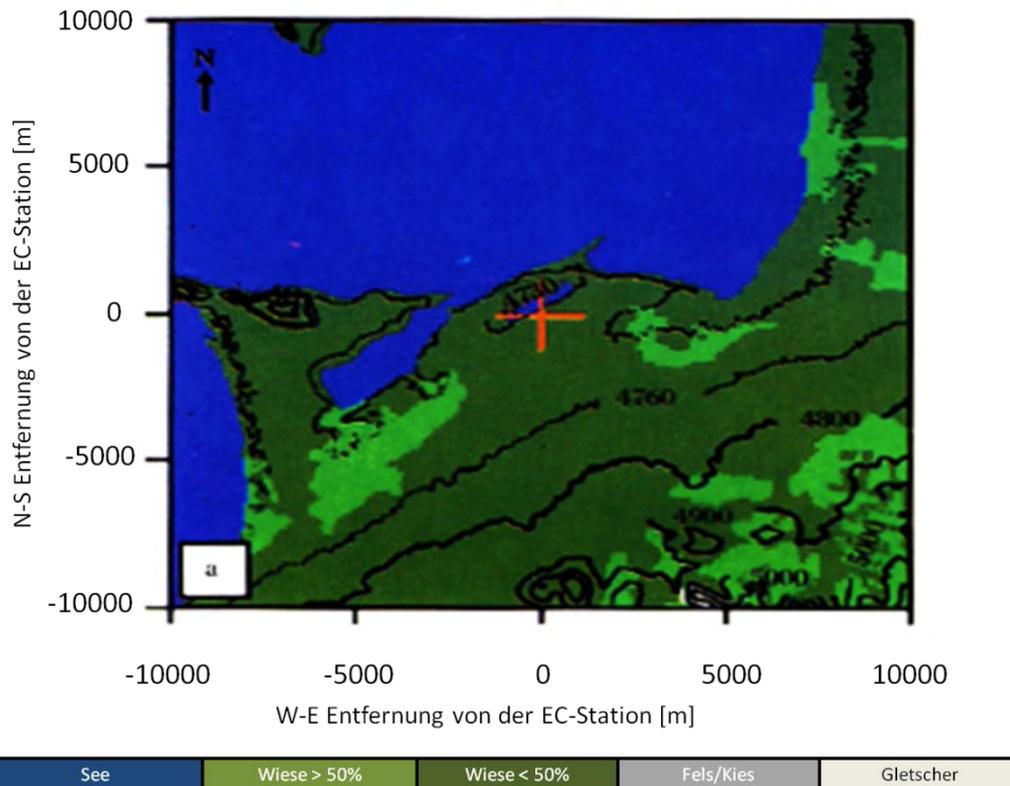


Abbildung 3.2: Umgebungskarte für den Versuchsort Nam Co. Die EC-Station ist mit einem roten Kreuz gekennzeichnet, die schwarzen Linien bezeichnen die Höhe ü.NN [m], die Landnutzung wird durch den Farbbalken gekennzeichnet. Metzger et al. (2006), verändert.

Das Klima des tibetischen Plateaus wird vor allem durch die Westwinde bestimmt, wobei im Sommer der Einfluss Monsuns das Klima prägt. Wandert der Zenit der Sonne nordwärts wird dies von einer Verlagerung des Jetstream und des Monsuns begleitet. Im Sommer erhalten nur einige Gebiete Niederschlag, da der Großteil des Plateaus vom Himalayagebirge umgeben ist. Das Himalayagebirge bildet eine Barriere, welche durch die Luftmassen erst überwunden werden muss. Insgesamt müssen die Luftmassen über 4500 Höhenmeter passieren. Beim Aufstieg kondensieren die feuchten Luftmassen und regnen sich noch vor dem Himalayagebirge ab. Daher enthalten die Luftmassen nur geringe Feuchtigkeit, wenn sie das Plateau erreichen. Auf dem tibetischen Plateau wird Niederschlag hauptsächlich durch Konvektion gebildet.

Das Klima auf dem Plateau kann über das Jahr hinweg folgendermaßen beschrieben werden. Im Herbst und Winter bildet sich eine mongolisch asiatische Antizyklone mit ungefähr 1020 bis 1040 hPa aus, deren Ausläufer das tibetische Plateau erreichen. Sie befördern trockene und kalte Luftmassen zum tibetischen Plateau und Temperaturminima von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ verantwortlich sind. Die Antizyklone bleibt bis in den Frühling stabil. Eine Änderung der Witterungsverhältnisse geschieht erst ab Mai, wenn der Monsun einsetzt (Domrös und Peng, 1988; Du Zheng et al., 2000).

3.2. Durchführung des Experimentes im Februar 2010 am Nam Co

Im Folgenden soll die Durchführung des Winterexperiments vom Februar 2010 gegeben werden. Dabei soll die Versuchsfläche mit den Messgeräten und der Aufbau der Messgeräte beschrieben werden, sowie die Kalibrierung des KH20 mit der mobilen Kalibriereinheit und die Verarbeitung der Messdaten.

3.2.1. Aufbau des Eddy-Kovarianzmesssystems

Umgeben wird der Messkomplex von zwei Gebäuden, welche sich nordwestlich (Haupthaus) und nördlich (Nebengebäude) im Abstand von etwa 55 und 80 m befinden. Die Anordnung der Mikrometeorologischen Messsysteme, welche den Eddy-Kovarianz Messkomplex umgeben ist aus Abbildung 3.3 zu entnehmen. Die Geräte zur Turbulenzmessung am Eddy-Kovarianz-Messkomplex sind in Tabelle 3.1 aufgelistet und zusätzlich zeigt Abbildung 3.3 die genaue Anordnung der Messgeräte, deren Orientierung zueinander und deren Winkel gegen Norden.

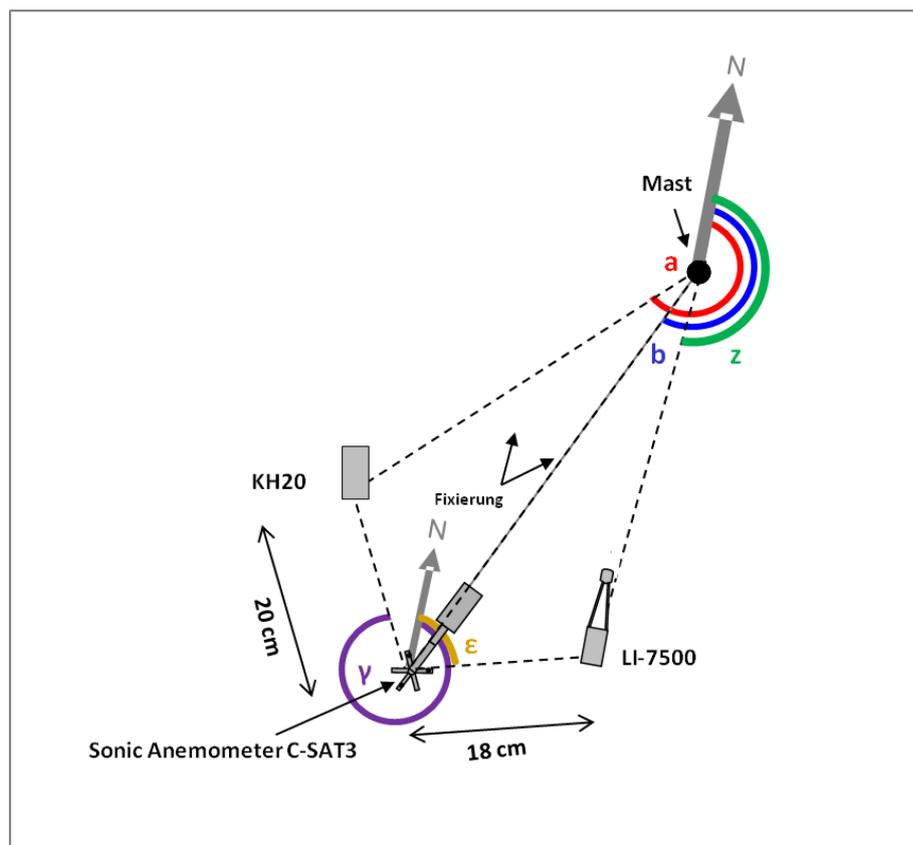


Abbildung 3.3: Schema des Eddy-Kovarianz-Messkomplexes, die Geräte und deren Winkel zueinander sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Geräte des Eddy-Kovarianz-Komplexes im Winterexperiment an der Nam Co Comprehensive Research Station

Parameter	Gerät	Seriennr.	Höhe (cm)	Winkel gegen Norden	Winkel für TK2	Logger
Feuchte	KH20	1649	306	210° = a	340° = γ	SE 1
Windvektor und Sonictemperatur	CSAT	10272	306	200° = b		SDM
CO ₂	LI-7500	836	311	175° = z	60° = ϵ	SDM
Feuchte	LI-7500	836	311	175° = z	60° = ϵ	SDM
Feuchte	HMP		307			
Temperatur	HMP		307			

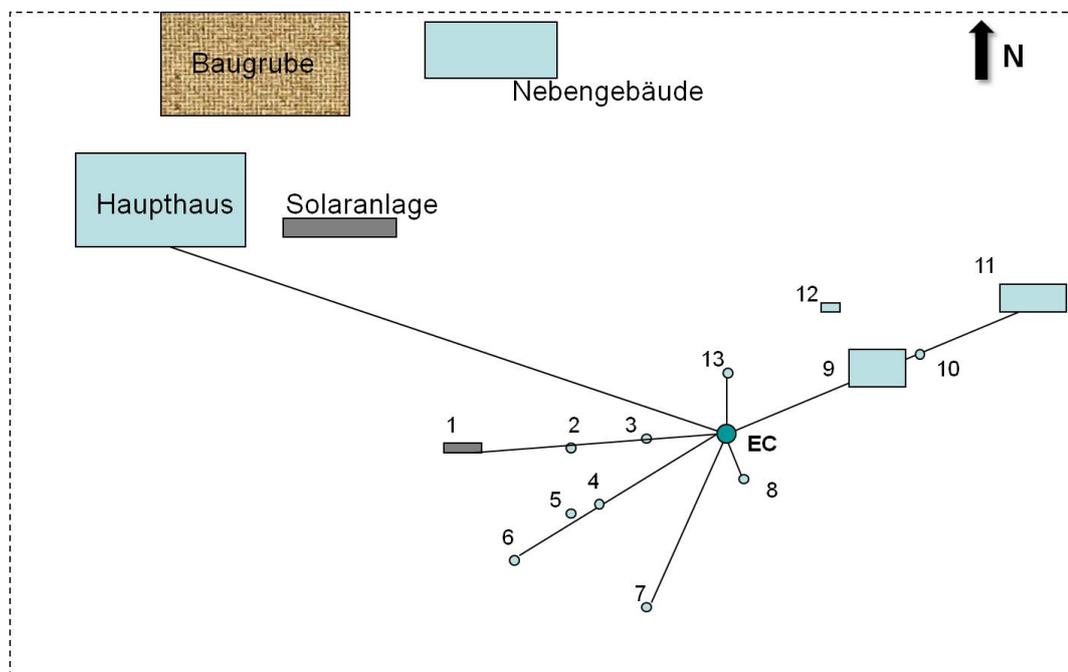


Abbildung 3.4: Umgebungsskizze des Eddy-Kovarianzmesskomplexes (EC). Bedeutung der Zahlen sind Tabelle 3.2 zu finden. Das Gelände der Tibet Research Station ist mit einem Zaun umgeben, welcher durch die gestrichelte Linie dargestellt wird.

Tabelle 3.2: Umgebung der Eddy-Kovarianz-Station, Beschreibung zu Abbildung 3.4

	Parameter	Entfernung EC (m)	Winkel gegen N
1	Partikelmessgerät	33.6	250
2	unbekannt	33.6	250
3	GPS	25.2	250
4	Solar	7.8	245
5	Strahlung	16.2	225
6	Strahlung	38.4	225
7	Photometer	38.4	220
8	Boden	28.2	95
9	Grenzschichtmessturm	9.6	51
10	Regenfänger	31.2	51
11	Atmosphärenchemie	34.2	51
12	Wetterhütte	62.4	72
13	Regenmessung	19.8	20
14	Nebengebäude	57.6	305
15	Hauptgebäude	81	271

3.2.2. KH20 Kalibrierung am Nam Co

Im Winterexperiment am Nam Co waren zur Feuchtemessung der Luft zwei verschiedene Messgeräte vorhanden. Zusätzlich zum bereits vorhandenen LI-7500 wurde die Luftfeuchte mit dem Kryptonhygrometer (KH20) gemessen. Das LI-7500 wurde zuletzt im Juli 2009 kalibriert. Die Kalibrierungskoeffizienten sind aus Tabelle 3.4 zu entnehmen. Für die Kalibrierung des KH20 wurde die mobile Kalibriereinheit nach Foken und Falke (2010) verwendet.

Die Ermittlung der Kalibrierungskoeffizienten wurde zu diesem Zeitpunkt mittels der Kalibriereinheit über eine effektive Pfadlänge erreicht. Es stellte sich aber im Nachhinein heraus, dass dieses komplizierte System durch die Ermittlung der Sauerstoffdichte und des Sauerstoffkoeffizienten K_o ersetzt werden kann. So wurden die Kalibrierungen wie folgt durchgeführt, wobei Pfadlänge, Spannungsausgabe (In V) und die Umweltbedingungen vor Ort (Tabelle 3.3) vom Gerät ausgegeben wurden. Mithilfe dieser Parameter, konnten dann die Kalibrierungsparameter über Formel (2.22) bestimmt werden.

Die Kalibrierung wurde direkt vor der Anbringung des KH20 an das Eddy-Kovarianzmesssystem durchgeführt. Wobei die Kalibrierung des KH20 in einem ca. 20 m² großen unbeheizten Raum mit geschlossenen Fenstern und geschlossener Tür stattfand. Dies sollte für möglichst stationäre Bedingungen für die Regression sorgen, da ansonsten der Kalibrierungsvorgang von der Kalibriereinheit abgebrochen werden würde. Speziell für die Umweltbedingungen auf dem tibetischen Plateau wurde aufgrund der geringen Luftfeuchte die minimale Pfadlänge zwischen den beiden Röhren auf 10 mm gesetzt. Für die Kalibrierung wird zusätzlich der aktuelle Luft-

druck benötigt. Dieser kann nicht mit der Kalibriereinheit bestimmt werden und wurde aus dem Logger der Eddy Kovarianz Station ausgelesen. Für die Regression wurde die variable Pfadlänge zwischen 10 und 30 mm gesetzt. Dieser Pfadlängenbereich wurde in 20 Schritten durchgeführt, bei denen jeweils eine Luftfeuchtemessung in jeweils fünf Sekunden stattfindet. Es kam zu Problemen, wenn durch die erheblichen Schwankungen in der Spannungsversorgung die Netzspannung für die Kalibriereinheit nicht ausreichend war. Es war geplant die Kalibrierung des KH20 mit der mobilen Kalibriereinheit unter verschiedenen Bedingungen, wie zum Beispiel saubere und verschmutzte Fenster, möglichst oft zu testen. Dies konnte jedoch durch die mangelnde Spannungsversorgung auf der Station nur nach wiederholten Versuchen erfolgreich durchgeführt werden.

Tabelle 3.3: Umweltbedingungen bei den Kalibrierungen des KH20 mithilfe der mobilen Kalibriereinheit.

Kalibrierung	Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	Luftdruck [hPa]	Dichte Wasser [g m ⁻³]	Sauerstoffdichte [g m ⁻³]
14.02.2010	-11,69	36,8	576	690,00	16,08
19.02.2010 verschmutzt	-2,05	29,31	566	1133,58	152,33
19.02.2010 sauber	0,25	27,40	566	1271,18	150,99

3.3. Datenaufnahme und -verarbeitung

Die Messdaten wurden auf einer Speicherkarte durch den Logger vom 14.2. bis 25.02.10 aufgezeichnet. In das bereits bestehende Loggerprogramm wurde eine zusätzliche Spalte für die Daten des KH20 eingefügt. Die Messdaten wurden auf einer Speicherkarte abgespeichert. Zum Auslesen der Daten wurde die Speicherkarte aus dem Logger entnommen und die Daten auf einem Laptop kopiert, um danach von der Karte gelöscht zu werden. Durch das Entnehmen der Karte kam es zu einem geringen Datenverlust, da während des Auslesens keine Messdaten aufgezeichnet werden konnten. Die Messdaten wurden etwa alle zwei bis drei Tage ausgelesen. Dabei wurden die turbulenten Daten von Wind, Temperatur, Feuchte (LI-7500 und KH20) und CO₂ hochfrequent mit 10 Hz aufgenommen. Die Referenzmessung von Temperatur und Feuchte wurde mit einer Frequenz von 30 min ausgelesen. Für die weitere Arbeit mit den Daten mussten diese durch die Software LoggerNet der Firma Campbell Sci. konvertiert werden.

Um einen ersten Überblick über die Daten der Feuchte zu erhalten, wurden die hochfrequenten Daten mit dem Programm „R“ (Ihaka und Gentleman 1996) abgebildet. Zur Korrektur und Überprüfung der Anpassung der Messgeräte an die Umweltbedingungen wurden Powerspektren der Feuchte mit „R“ erzeugt.

Um eine Verschiebung der gemessenen Feuchtwerte mit dem KH20 in den Bereich der absoluten Feuchte zu erreichen, wurde eine Anpassung des V_0 -Wertes durchgeführt. Als Referenzluftfeuchte diente dabei die Messung mit dem HMP.

Mit dem Programm TK2 (Mauder und Foken, 2004) können die mikrometeorologischen Werte und deren Flüsse ermittelt werden. Außerdem können auch die Qualitäts-Flags ausgegeben werden, die Aufschluss über die Güte der Daten geben. Dabei werden alle Korrekturen angewendet, die nach dem Stand der Wissenschaft notwendig sind, um turbulente Flüsse auszuwerten, im Folgenden werden die Korrekturen kurz genannt. Die Korrektur des Auftriebsstromes, die notwendig ist, um die mit dem Ultraschallanemometer gemessene Schalltemperatur in den fühlbaren Wärmestrom zu überführen (Schotanus et al., 1983). Die Planarfit-Korrektur dient der Koordinatenrotation in die Hauptwindrichtung. Außerdem ist die Sauerstoffkorrektur für das Kryptonhygrometer notwendig, um Fehler durch die Querempfindlichkeit des Gerätes mit Sauerstoff zu korrigieren. Des Weiteren werden die Korrektur für spektrale Verluste (Moore-Korrektur) und die Webb-Pearman-LeuningKorrektur angewendet.

Ein Hauptaugenmerk der Auswertung lag auf dem Vergleich der latenten Wärmeströme, die mit LI-7500 und KH20 gemessen und mithilfe des TK2 Programms berechnet wurden. Die Datenverarbeitung ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt.

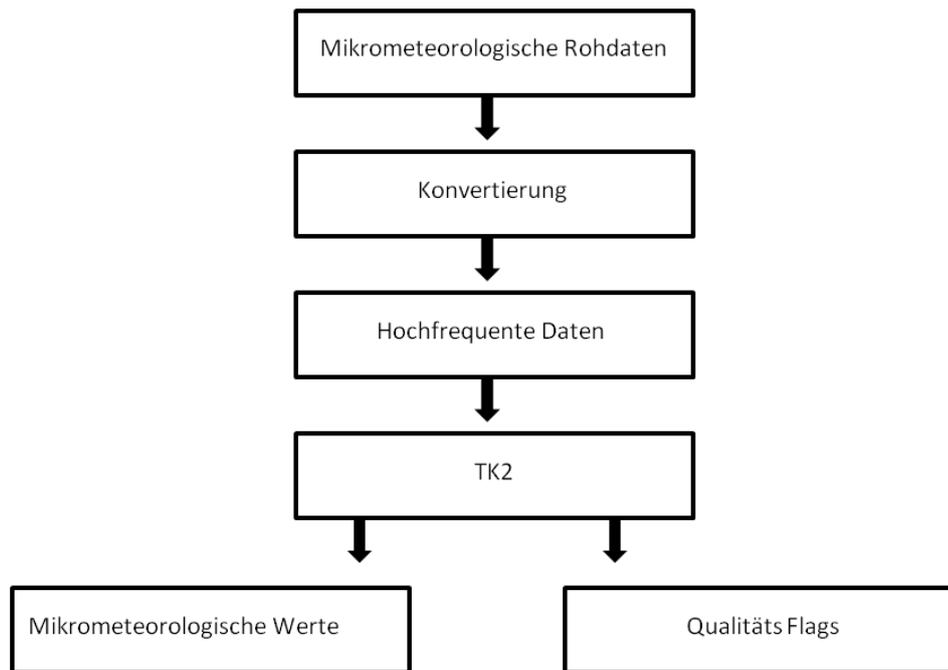


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Datenverarbeitung für das Experiment im Winter 2010.

3.4. Sommerexperiment 2009 auf dem tibetischen Plateau

Das Experiment im Sommer 2009 auf dem tibetischen Plateau sollte den Energie- und Stoffaustauschs zwischen Bodenoberfläche und der Atmosphäre erforschen. Dieses Experiment entstand im Rahmen von zwei Projekten, dem CEOP-AEGIS- und dem TiP-Projekt von der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth an der Nam Co Comprehensive Research Station der Chinese Academy of Science, Tibet, China. Hauptsächlich sollte in diesem Experiment eine Qualitätskontrolle bei der Messung der Oberflächenflüsse durchgeführt werden, so dass diese auf kleinräumige Klimamodelle übertragen werden können. Weiterhin stand auch die korrekte Luftfeuchtemessung in großen Höhen im Vordergrund. In diesem Zusammenhang wurden Luftfeuchtedaten des Jahres 2009 gesammelt und mithilfe des Programms TK2 aufbereitet (Biermann et al., 2009).

Während des Experiments wurde die Kalibrierung des LI-7500 SN 836 durchgeführt. Leider wird von den chinesischen Partnern keine Dokumentation der Eddy-Kovarianzmessung zur Verfügung gestellt. Die Wartung der Messgeräte ist daher nicht immer eindeutig nachzuvollziehen.

Tabelle 3.4: Kalibrierung durch den Anwender von LI-7500 vom 30.06.2009 am Nam Co. Die letzte Kalibrierung wurde am 17.02.2005 durchgeführt.

Device		must value		actual value	
LI-7500	zero	CO ₂	0	0.93 mmol m ⁻³	803.72 μmol mol ⁻¹
SN 836	zero	H ₂ O	0	0.79 mmol m ⁻³	25.75 mmol mol ⁻¹
	span	CO ₂		1.00 mmol m ⁻³	
	span	H ₂ O		0.99 mmol m ⁻³	

	A	B	C	D	E	XS	Z
CO ₂	137.734	13945	3.22975e+07	-9.02271e+9	1.20598e+12	0.001	0
H ₂ O	4676.88	3288210	9.94507e+07			-0.0017	0.0265

4. Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Luftfeuchtemessung mit dem KH20 und dem LI-7500 dargestellt und diskutiert. Im Fokus liegen die Ergebnisse der Kalibrierung des KH20 mit der mobilen Kalibriereinheit. Des Weiteren sollen die Abweichungen der Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500 untersucht werden, um Aufschluss darüber zu geben, aus welchem Grund die Messungen nicht mit den Referenzmessungen des HMP übereinstimmen. Insbesondere soll auch die Messung des latenten Wärmestroms betrachtet werden. Hierzu wurden die Powerspektren von LI-7500 und KH20 analysiert, um eine Aussage über die Anpassung an die turbulenten Gegebenheiten vor Ort zu erlangen.

4.1. Kalibrierung des KH20 mit mobiler Kalibriereinheit am Nam Co

Bei den gegebenen Kalibrierungsbedingungen vor Ort, welche in Tabelle 3.3 aufgelistet sind, lässt sich die Regressionsgerade aus der Pfadlänge mal der Sauerstoffdichte gegen die logarithmische Spannungsausgabe darstellen. Die Regressionsgerade für die Kalibrierung am 14.02.2010 am Nam Co ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Aus der Regressionsgeraden erhält man den Steigungswert der Regression. Dier Wert stellt k_o -Aktuell dar, den aktuellen Kalibrierungskoeffizient für Sauerstoff. Auf die gleiche Weise wurde k_o -Beginn aus der ersten Kalibrierung in Bayreuth am 08.05.2009 ermittelt. Der zusätzlich benötigte Kalibrierungskoeffizient für Wasser zu Beginn k_w -Beginn kann direkt aus der Werkskalibrierung der Firma Campbell Sci. übernommen werden. Aus diesen Werten ergibt sich dann mit Formel (2.22) der aktuelle Kalibrierungskoeffizient für Wasser k_w -Aktuell. Die Kalibrierungskoeffizienten für die Kalibrierung am 14.02.2010 sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Dort befinden sich auch die Kalibrierungen mit verschmutzten und sauberen Fenstern. Um eine Anpassung der absoluten Luftfeuchtwerte in den Feuchtebereich der Referenzmessung zu erreichen, ist eine Verschiebung durch eine Anpassung des V_0 -Wertes erforderlich. Die jeweiligen V_0 -Werte für die verschiedenen Kalibrierungen finden sich ebenfalls in Tabelle 4.1. Die Auswertung der Feuchtedaten mit Kalibrierung bei verschmutzten Fenstern im Vergleich zu gereinigten Fenstern zeigt 10 % höhere Werte der absoluten Luftfeuchte bei sauberen Fenstern (Abbildung 4.2). Im Gegensatz zur absoluten Feuchte, hat das Reinigen der Fenster auf den latenten Wärmestrom keinen Einfluss. Ein Vergleich der Wärmeströme, die sich aus den beiden Kalibrierungen ergeben zeigt eine fast vollkommene Übereinstimmung der latenten Wärmeströme (Abbildung 4.3).

Tabelle 4.1: Kalibrierungskoeffizienten für die Kalibrierungen im Winterexperiment am Nam Co.

Datum	k_w -Beginn	k_w -Aktuell	k_o -Beginn	k_o -Aktuell	$\ln V_0$
14.02.2010	-0,157	-0,0860	-0,0136	-0,0075	7,1015
19.02.2010	-0,157	-0,1038	-0,0136	-0,0090	7,6047
verschmutzt					
19.02.2010	-0,157	-0,0934	-0,0136	-0,0081	7,5904
sauber					

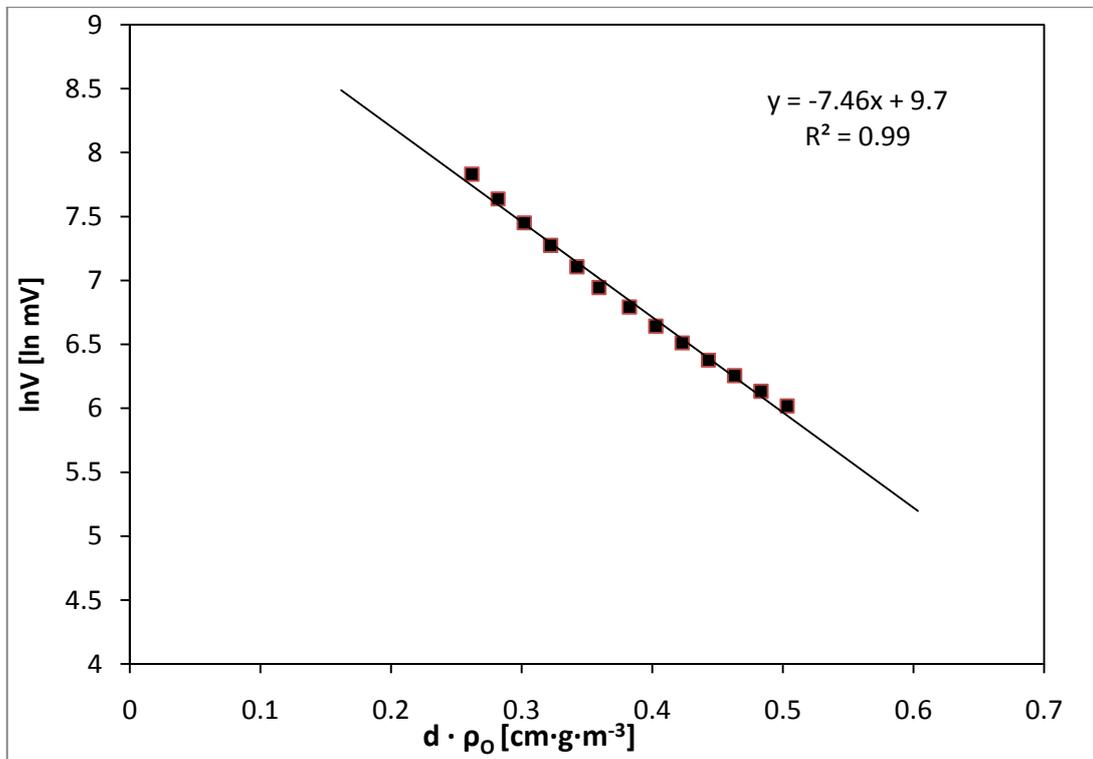


Abbildung 4.1: Regressionsgerade der Kalibrierung vom 14.02.2010 mit Regressionsgleichung. Die Steigung von -7,64 entspricht dem Kalibrierungskoeffizienten für Sauerstoff k_o -Aktuell [$\ln(\text{mV}) \text{ m}^3 \text{ g}^{-1} \text{ cm}^{-1}$].

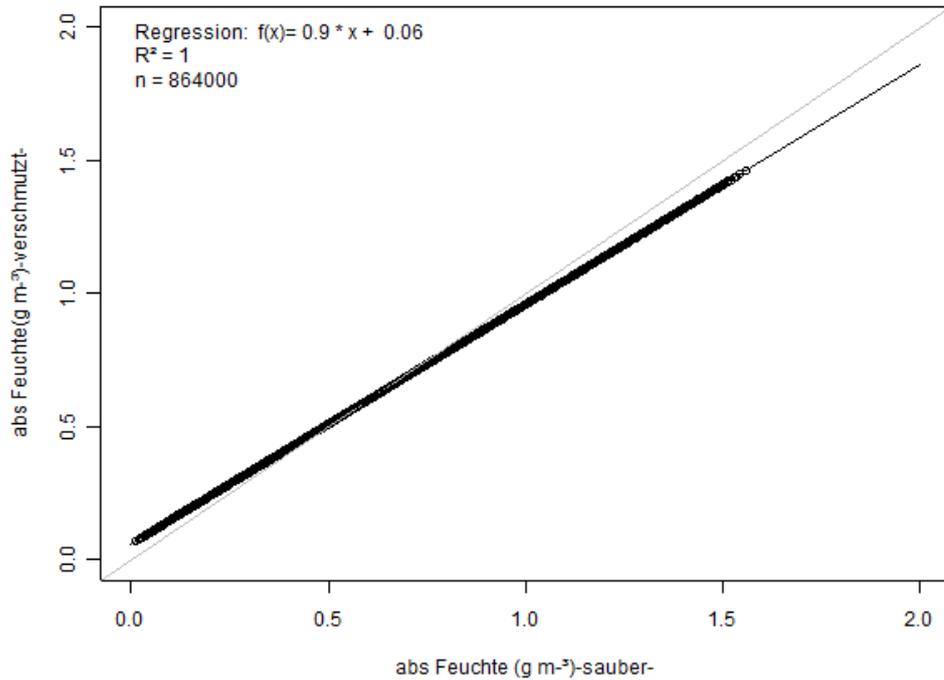


Abbildung 4.2: Vergleich der absoluten Feuchte [g m^{-3}], die mit dem KH20 mit gereinigten und verschmutzten Fenstern gemessen wurden für den 22.02.2010.

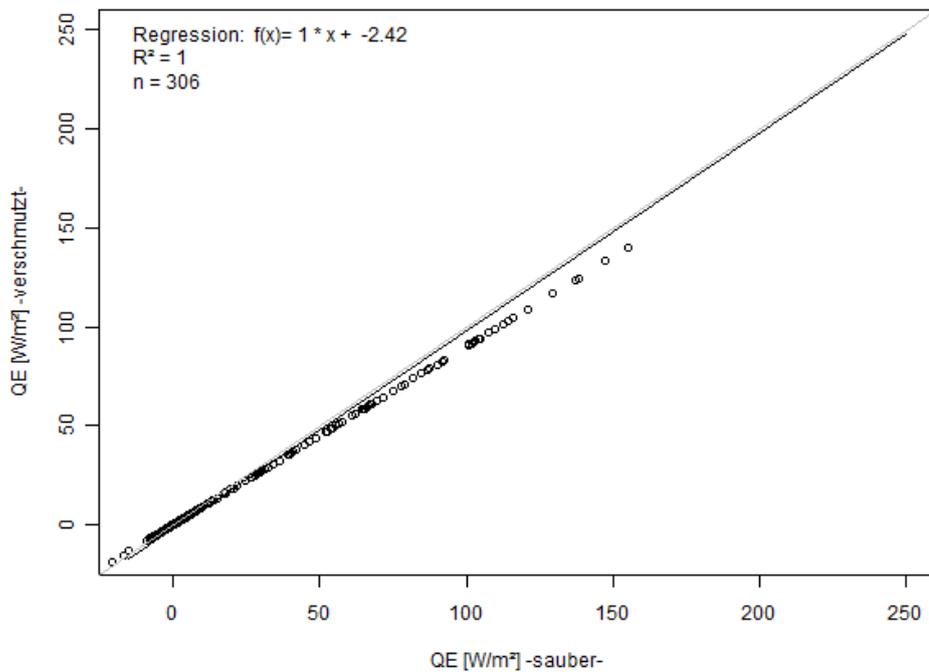


Abbildung 4.3: Vergleich des latenten Wärmestroms Q_E [W m^{-2}], gemessen mit dem KH20 mit gereinigten und verschmutzten Fenstern über einen Zeitraum von 6,5 Tagen.

Mit den Kalibrierungskoeffizienten für die Bedingungen am Nam Co können für das KH20 die Werte der absoluten Feuchte graphisch dargestellt werden. Wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, liegen die gemessenen Feuchtwerte wie erwartet im Luftfeuchtebereich der Referenzmessung. Die Fluktuationen sind am Tag stets größer als in der Nacht, da tagsüber die Verdunstung durch die Sonneneinstrahlung höher ist und die Diversität der turbulenten Wirbel größer ist. Deutlich zu erkennen ist der Sonnenaufgang gegen 9 Uhr (Peking Standardzeit), da zu diesem Zeitpunkt die Fluktuationen der Feuchte zunehmen. Nach Sonnenuntergang gegen 20 Uhr nehmen die Feuchtefluktuationen wieder ab. Die Abweichung der Feuchtwerte des LI-7500 von den Referenzwerten soll in nachfolgenden Kapiteln ausführlicher diskutiert werden.

In Abbildung 4.5 sind die mittleren absoluten Feuchtwerte von LI-7500, KH20 und HMP, welche mit TK2 berechnet und korrigiert wurden über die gesamte Messperiode dargestellt. Für den Messzeitraum wurden für das KH20 die Kalibrierungen vom 14.02. und vom 19.02.2010 (bei sauberen Fenstern) verwendet. Dies ist notwendig, da durch das Säubern der Fenster die Empfindlichkeit des Gerätes steigt. Ab dem 24.02. kommt es zu einem abrupten Anstieg der Luftfeuchte von ca. 1 g m^{-3} auf 3 g m^{-3} . Dieser Anstieg der absoluten Feuchte ist auf einen Schneesturm zurückzuführen, der am Morgen des 24.02. das Untersuchungsgebiet erreichte.

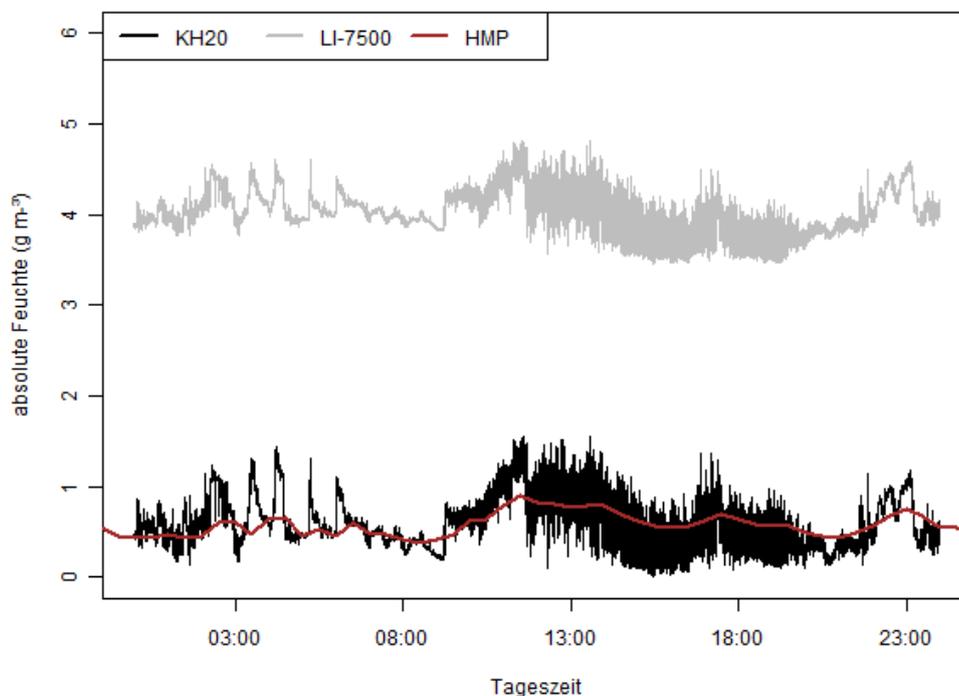


Abbildung 4.4: Feuchtwerte von LI-7500 und KH20 (10 Hz) und dem Referenzmessgerät HMP in 30-Minutenmitteln vom 22.02.2010 (Peking Standardzeit; UTC+8)

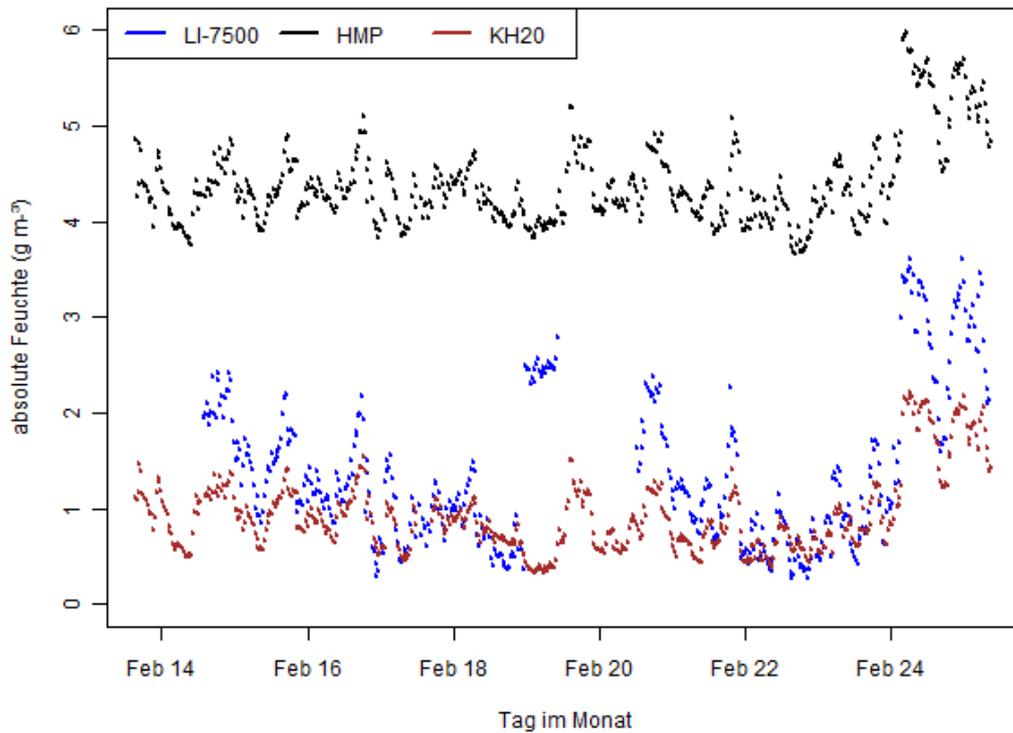


Abbildung 4.5: Absolute Luftfeuchte in 30-Minutenmitteln von LI-7500, KH20 und HMP über den gesamten Messzeitraum

4.2. Luftfeuchtemessung mit dem LI-7500

Der folgende Teil beschreibt den Vergleich der absoluten Luftfeuchte des LI-7500 mit dem Referenzmessgerät HMP über das Jahr 2009 und schließlich dem Vergleich der relativen Luftfeuchte für die Luftfeuchtemessungen im Februar 2010. Die Messdaten für 2009 wurden in Zusammenhang mit dem Sommerexperiment am Nam Co 2009 erhoben.

4.2.1. Messung der absoluten Luftfeuchte mit LI-7500 am Nam Co im Jahr 2009

Die Luftfeuchtedaten wurden für das Gebiet am Nam Co bereits 2009 innerhalb des CEOP-AEGIS-Projekts gesammelt und mithilfe von TK2 ausgewertet. Die Luftfeuchtedaten für LI-7500 und HMP sind mit den Temperaturdaten in Abbildung 4.6 dargestellt. Auffällig ist dabei die extreme Abweichung der absoluten Luftfeuchte vom LI-7500 von den Referenzmessungen in der ersten Jahreshälfte. Diese Abweichungen sind wohl auf die weit zurückliegende Kalibrierung des Gerätes im Jahr 2005 zurückzuführen. Ab Mai 2009 wird die Differenz zwischen LI-7500 und HMP etwas kleiner. Der Grund dafür ist nicht ganz nachvollziehbar, da von der chinesischen Seite kein Logbuch über die Gerätebetreuung zur Verfügung steht. Höchstwahrscheinlich wurde aber die Orientierung und Anbringung des Messgerätes geändert. Am 30.06.2009

wurden dann eine Kalibrierung und der Austausch des Trocknungsmittels vorgenommen. Diese Maßnahme führt zu einer guten Übereinstimmung der absoluten Luftfeuchte von LI-7500 und HMP bis November. Ab diesem Zeitpunkt wird die Differenz zwischen den beiden Luftfeuchtemessungen zunehmend größer. Eine genauere Betrachtung der Witterung zu dieser Zeit zeigt zunächst einen Temperaturanstieg und dann einen rasanten Temperaturabfall innerhalb einer Woche. Insgesamt handelt es sich um eine Temperaturdifferenz von 25 K wobei Tiefsttemperaturen von -15 °C und mehr erreicht werden (Abbildung 4.7). Die Messungen vom Februar 2010 (Abbildung 4.5) zeigen in etwa dasselbe Niveau der Feuchtwerte von LI-7500 und HMP, wie Ende Dezember 2009.

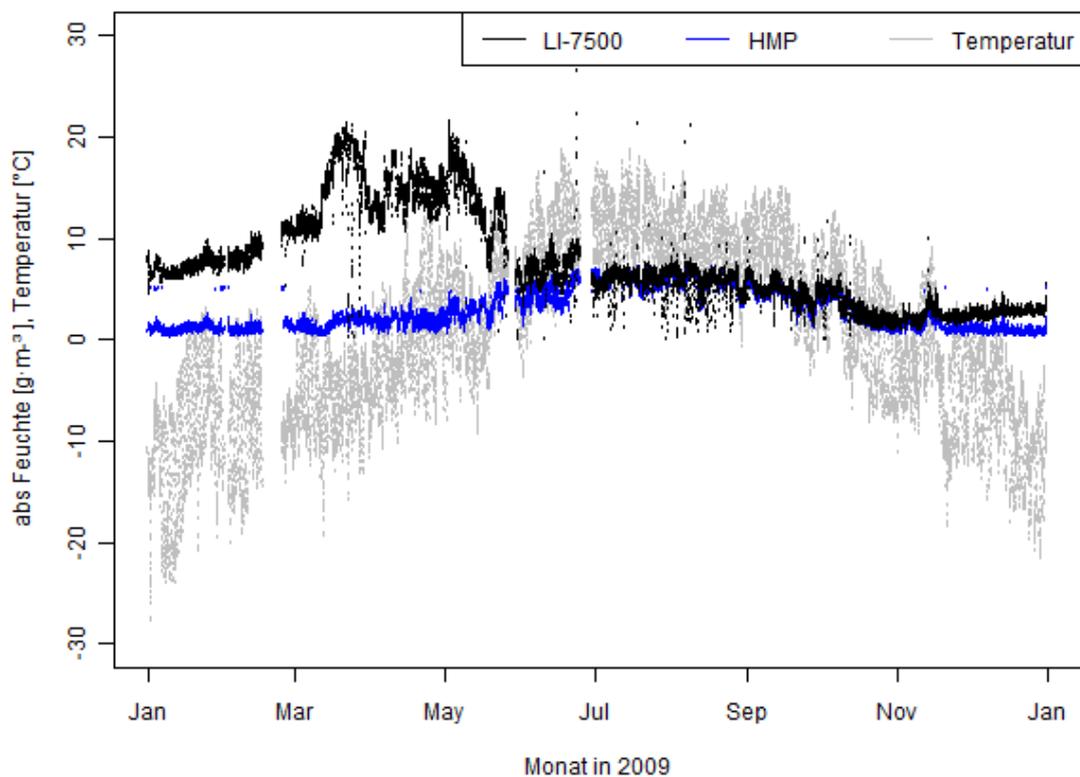


Abbildung 4.6: Temperatur und absolute Feuchte im Jahr 2009 am Nam Co, dargestellt in 30-Minutenmitteln.

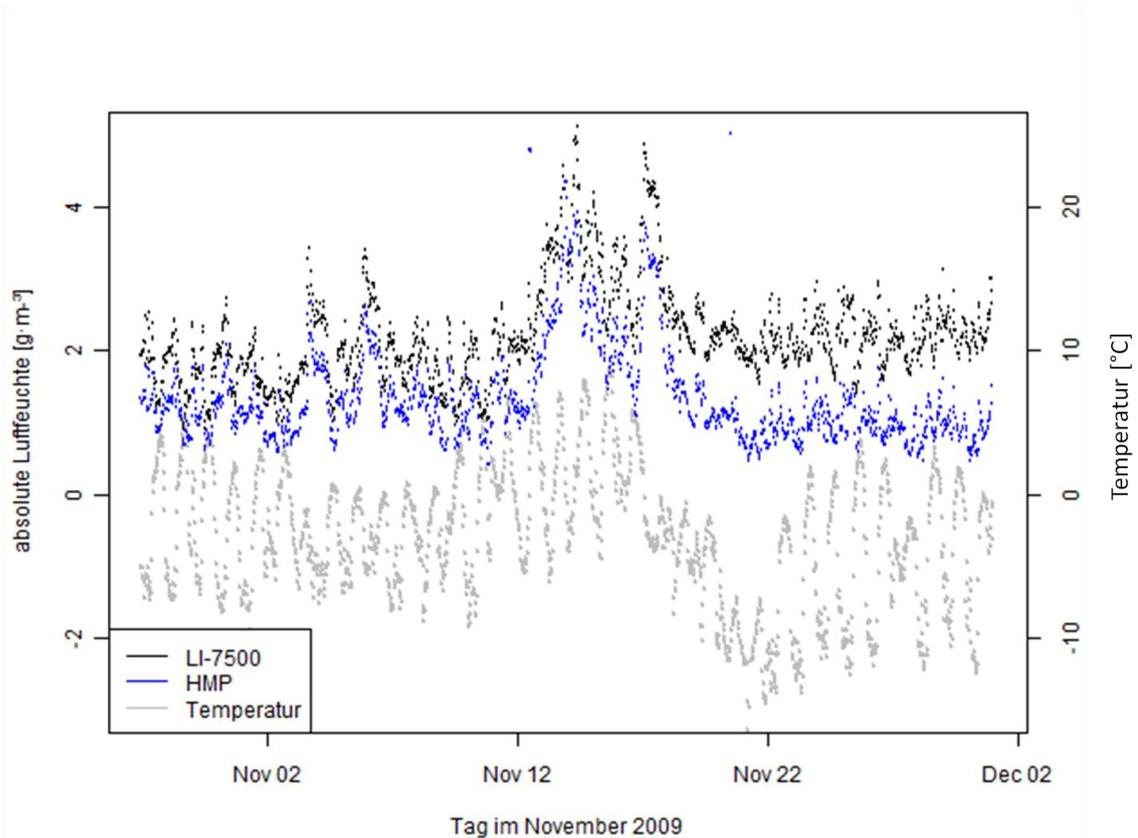


Abbildung 4.7: Temperatur und Feuchte (LI-7500, HMP), für November bis Dezember 2009 am Nam Co.

4.2.2. Messung der relativen Luftfeuchte mit LI-7500 am Nam Co im Winterexperiment 2010

In diesem Abschnitt soll die relative Luftfeuchte betrachtet werden, denn sie gibt in Prozent an, wie hoch die Sättigung der Luft mit Wasserdampf ist und kann maximal etwa bei 100% liegen. Ein Vergleich der absoluten Luftfeuchte des LI-7500 mit der Referenzmessung mit dem HMP zeigte bisher keine Übereinstimmung. Daher soll ein Blick auf die relative Luftfeuchte Aufschluss darüber geben, ob mit LI-7500 die relative Luftfeuchte von 100% überschritten wird, was bedeuten würde, dass die Messung der absoluten Luftfeuchte in einem unrealistischen Bereich liegt. Tatsächlich ergibt sich für die relative Feuchte des LI-7500 ein Wert von über 200 %. Das HMP misst hingegen eine relative Luftfeuchte von etwa 40 % (Tabelle 4.2). Aus dieser Gegenüberstellung wird deutlich, dass die gemessenen Werte der absoluten Feuchte von HMP einem erwarteten Wert entsprechen und davon ausgegangen werden kann, dass die Referenzmessung richtig ist. Das Ergebnis spiegelt Resultate vorhergehender wissenschaftlicher Arbeiten wider, die auch im Winter am Nam Co durchgeführt wurden und ebenfalls eine Übersättigung der Luft mit Wasserdampf zeigten.

Tabelle 4.2: Beispiel für relative Luftfeuchte als 30 Minutenmittel von 8.30 – 9.00 Uhr (Peking Standardzeit) am 18.02.2010, Temperatur für diesen Zeitraum beträgt -15,3 °C (30 Minutenmittel)

	LI-7500	HMP
Absolute Luftfeuchte [g m^{-3}]	4,12	0,65
Relative Luftfeuchte [%]	262,14	41,35

Nachdem gezeigt wurde, dass die Werte der absoluten Feuchte des LI-7500 in einem zu hohen Bereich liegen, werden diese in den Bereich der HMP-Werte verschoben. Dies wird erreicht in dem zunächst die mittlere Differenz zwischen der absoluten Feuchte des LI-7500 und des HMP errechnet wird. Dann wird diese Differenz von den Werten der absoluten Feuchte des LI-7500 abgezogen. Dabei bleiben die Fluktuationen (Standardabweichungen) erhalten, es ändert sich nichts am latenten Wärmestrom. Abbildung 4.8 zeigt die absolute Luftfeuchte des LI-7500 nach Subtraktion einer mittleren Differenz von $3,43 \text{ g m}^{-3}$ für den 22.02.10. Im Vergleich dazu ist die absolute Luftfeuchte, welche mit dem KH20 gemessen wurde, dargestellt. Die Fluktuationen der beiden Messgeräte sind ähnlich. Dennoch sind die Fluktuationen, die mit dem KH20 gemessen wurden in den meisten Fällen höher als die des LI-7500. Die Fluktuationen der beiden Messgeräte sowie die latenten Wärmeströme, die sich daraus ergeben, sollen in einem späteren Abschnitt genauer betrachtet werden. Zunächst soll untersucht werden was zu einer um etwa $3,5 \text{ g m}^{-3}$ höheren Messung der Luftfeuchte durch das LI-7500 führt. Dazu soll nun das Kalibrierungspolynom speziell in Bezug auf den geringen Luftdruck und die niedrige Luftfeuchte des Untersuchungsgebiets untersucht werden.

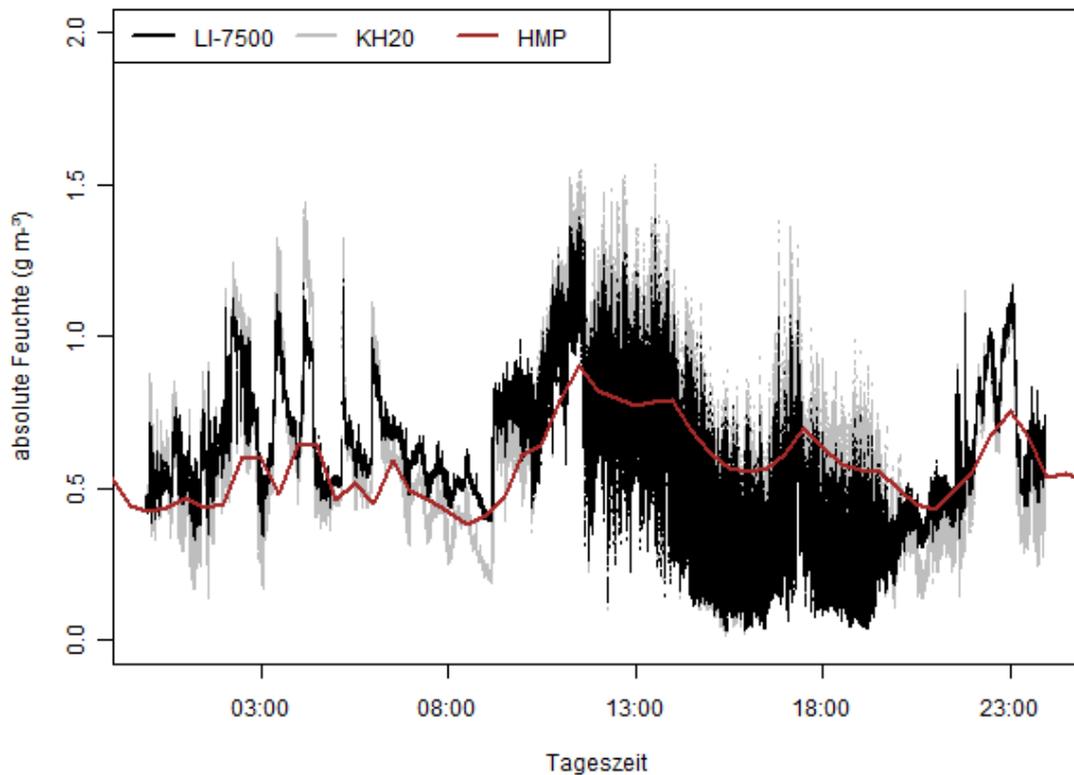


Abbildung 4.8: Darstellung der verschobenen absoluten Luftfeuchte des LI-7500 vom 22.02.10 in den Bereich der Referenzwerte (HMP) durch Abzug der mittleren Differenz von $3,43 \text{ g m}^{-3}$ von den LI-7500 Werten. Zusätzlich ist die absolute Luftfeuchte, die mit dem KH20 gemessen wurde dargestellt.

Betrachtet man das Kalibrierungspolynom des LI-7500 für Wasserdampf, so wird deutlich dass, die Kurve im niedrigen Feuchtebereich von $0\text{-}3 \text{ g m}^{-3}$ abflacht. Dies bedeutet auch eine höhere Empfindlichkeit bei Verschiebung des Kalibrierungspolynoms. Verläuft das Polynom nicht mehr exakt durch Null kann dies bereits zu einer Abweichung der Feuchtwerte um 10 % bedeuten. Stellt man die Abweichung des Kalibrierungspolynoms im niedrigen Luftfeuchtebereich in Abhängigkeit des Luftdrucks dar, so wird deutlich, dass vor allem der Feuchtebereich unter 2 g m^{-3} einer hohen Fehleranfälligkeit in der Messung ausgesetzt ist. Abbildung 4.9 zeigt die Abweichung der Feuchtwerte für 1000 hPa und 570 hPa. Dieser Luftdruck wurde ausgewählt, da bei 1000 hPa die Kalibrierung durch den Hersteller durchgeführt wird und 570 hPa der vorherrschende Luftdruck auf dem tibetischen Hochplateau ist. Die Abweichung des verschobenen Kalibrierungspolynoms im Vergleich zum gegebenen Kalibrierungspolynom ist für 570 hPa bei niedriger Luftfeuchte etwas geringer, als bei 1000 hPa. Bei einer Luftfeuchte von 2 g m^{-3} (570

hPa) beziehungsweise 4 g m^{-3} (1000 hPa) ist die Abweichung am geringsten und bleibt für höhere Luftfeuchten unter 5 %. Auf dem tibetischen Hochplateau beträgt der Feuchtegehalt der Luft in etwa 1 g m^{-3} , was bedeutet, dass in diesem Bereich die Abweichung des verschobenen Kalibrierungspolynoms im Vergleich zum gegebenen Kalibrierungspolynom sehr hoch ist. Dies kann zu einer Variierung des Messwerts zwischen 6 und 10 % in diesem Bereich mit niedriger Luftfeuchte führen. Es muss beachtet werden, dass für diese Darstellung eine Verschiebung des Kalibrierungspolynoms von 0,1 vorgenommen wurde.

In Abbildung 2.8 von Weisensee et al. (2003) ist die Abweichung von Null mit der Temperatur dargestellt. Bei Temperaturen von -10 °C ergibt sich eine Abweichung um $0,6 \text{ g m}^{-3}$. Folglich können Abweichungen in der Luftfeuchtemessung im niedrigen Feuchtebereich auch durchaus größer sein als die beschriebenen 6-10 %.

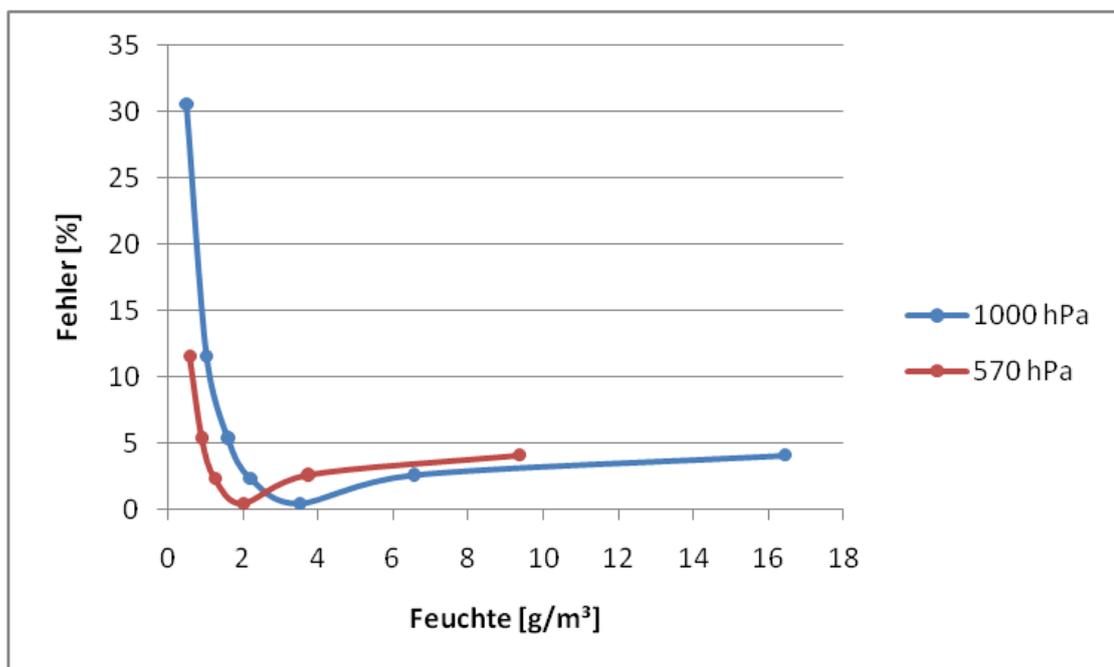


Abbildung 4.9: Fehler [%] bei leichter Verschiebung des Kalibrierungspolynoms. Die rote Linie zeigt den Verlauf bei 570 hPa und die blaue Linie bei 1000 hPa.

4.3. Vergleich von LI-7500 und KH20

Im folgenden Abschnitt sollen LI-7500 und KH20 einander gegenübergestellt werden. Zum einen wird dafür die Anpassung der Geräte an die Umweltbedingungen auf dem tibetischen Plateau mithilfe von Powerspektren dargestellt. Zum anderen werden die Standardabweichungen der Luftfeuchte der beiden Messgeräte, welche die Fluktuationen der Feuchte darstellen und den latenten Wärmestrom, der sich aus den Fluktuationen der Feuchte ergibt miteinander verglichen.

4.3.1. Ergebnis der Powerspektren von LI-7500 und KH20

Wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, dienen Energiedichtespektren (Powerspektren) der Überprüfung, ob die Messgeräte an die Bedingungen vor Ort angepasst sind. Dies ist für die Luftfeuchtemessgeräte dann der Fall, wenn die Energiedichte eine Steigung von $-5/3$ aufweist. Die Energiedichtespektren von KH20 und LI-7500 sind in Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 für einen Zeitraum von 30 Minuten dargestellt. Dabei zeigt die rote Linie die Steigung von $-5/3$ an. In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Abnahme der Energiedichte bei beiden Messgeräten im Bereich von $-5/3$ liegt. Daher wird deutlich, dass bei beiden Feuchtemessungen, die atmosphärischen Turbulenzspektren mit den Messgeräten erfasst werden. KH20 und LI-7500 sind damit optimal an die Messbedingungen angepasst.

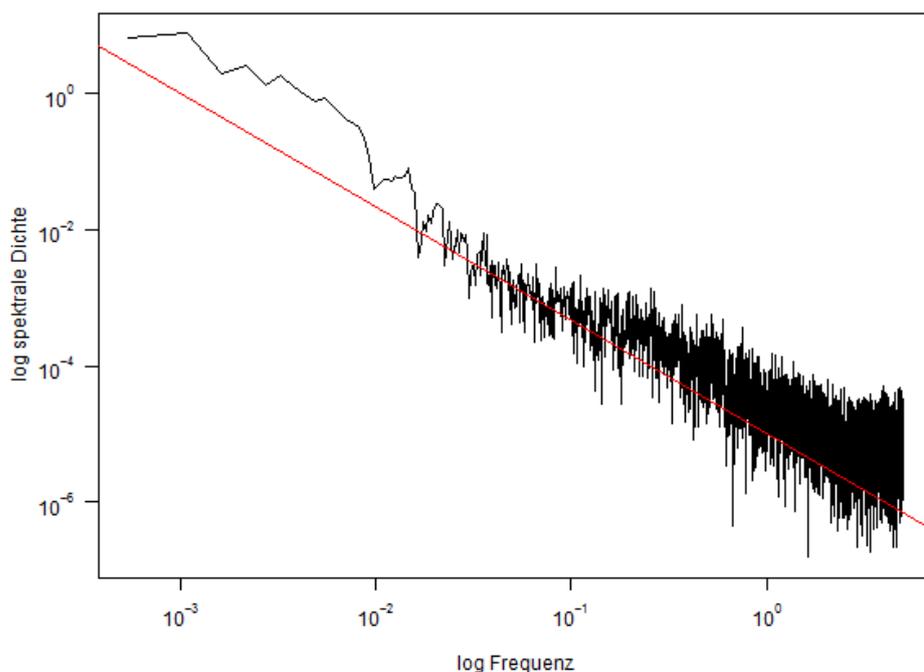


Abbildung 4.10: Energiedichtespektrum der gemessenen Feuchte von KH20 am 18.02.2010 über einen Zeitraum von 30 Minuten.

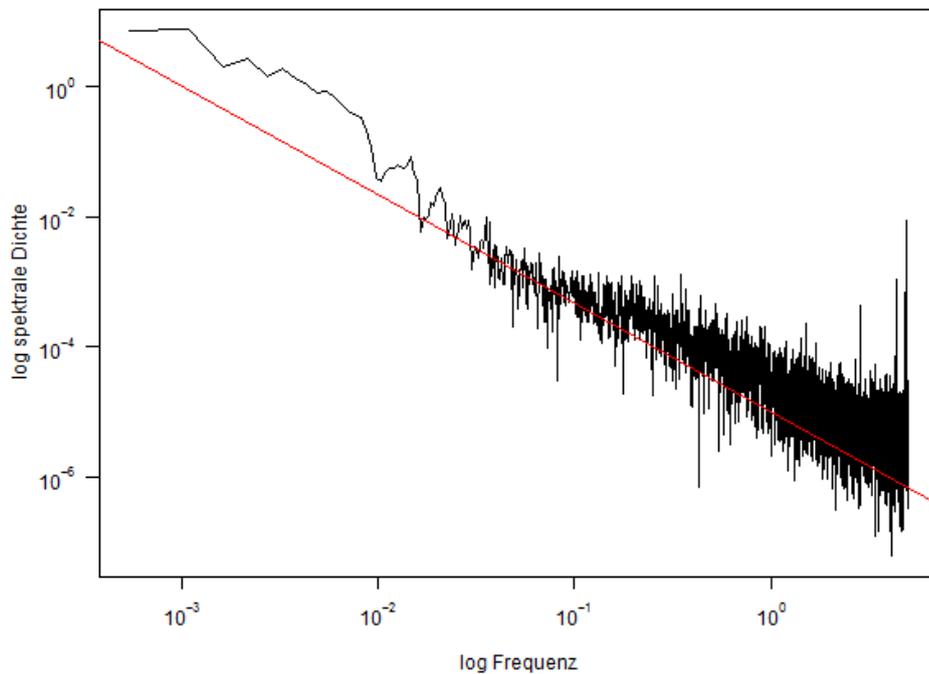


Abbildung 4.11: Energiedichtespektrum der gemessenen Feuchte von LI-7500 am 18.02.2010 über einen Zeitraum von 30 Minuten.

4.3.2. Vergleich der Standardabweichungen und des latenten Wärmestroms von LI-7500 und KH20 am Nam Co im Winterexperiment

Die vorliegende Arbeit schließt mit dem Vergleich der Standardabweichungen und der latenten Wärmeströme, die sich aus den Messungen der absoluten Feuchte mit LI-7500 und KH20 ergeben. Die Standardabweichungen der absoluten Feuchte von KH20 und LI7500 wurden mithilfe des Turbulenz-Programms TK2 berechnet werden. Die Standardabweichung eines Messgeräts ist ein Maß für dessen Empfindlichkeit. Die Standardabweichungen von LI-7500 und KH20 wurden im Folgenden verglichen, um deren Empfindlichkeit abzuschätzen. Trägt man die Standardabweichungen der absoluten Feuchte von LI-7500 und KH20 gegeneinander auf, so ergeben sich um 50 % höhere Standardabweichungen für das KH20. Für das KH20 gilt dabei die Kalibrierung vom 14.02.2010 mit den zugehörigen Kalibrierungsparametern (Tabelle 4.1). Insgesamt sind die Werte der Standardabweichungen der Luftfeuchte der beiden Messgeräte sehr gering. Sie liegen bei beiden Messgeräten unter $0,5 \text{ g m}^{-3}$, was jedoch auf die generell niedrigen Feuchtwerte auf dem tibetischen Plateau zurückzuführen ist. Derselbe Vergleich der beiden Messgeräte, wurde von Weisensee et al. (2003) durchgeführt. Dabei untersuchten Weisensee et al. (2003) unter anderem die Standardabweichung der gemessenen Luftfeuchte

von KH20 und LI-7500 am meteorologischen Observatorium in Lindenberg in Deutschland. Es zeigt sich, dass die Standardabweichungen beim KH20 um 12 % größer sind als beim LI-7500. Es konnte von Weisensee et al. (2003) kein Grund für die höheren Standardabweichungen des KH20 genannt werden.

Die Standardabweichungen der gemessenen Feuchte gehen in die Berechnung des latenten Wärmestromes ein (2.10). In bisherigen Studien auf dem tibetischen Plateau im Zusammenhang mit dem CEOP-AEGIS-Projekt, wird mit den Standardabweichungen des LI-7500 der latente Wärmestrom berechnet (Ma et al. 2009a). Der folgende Vergleich des latenten Wärmestroms aus der Feuchtemessung mit dem KH20 und dem LI-7500 soll zeigen, ob es auch hier Unterschiede zwischen den beiden Messgeräten gibt. Denn bisher wurde offensichtlich davon ausgegangen, dass die Messung des latenten Wärmestroms trotz Abweichungen in absoluter bzw. relativer Luftfeuchtemessung korrekt ist. Im Vergleich ist der latente Wärmestrom des KH20 um 30 % höher als der des LI-7500, dies ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Folglich wird der latente Wärmestrom, welcher mit dem LI-7500 im Winter gemessen wird unterschätzt.

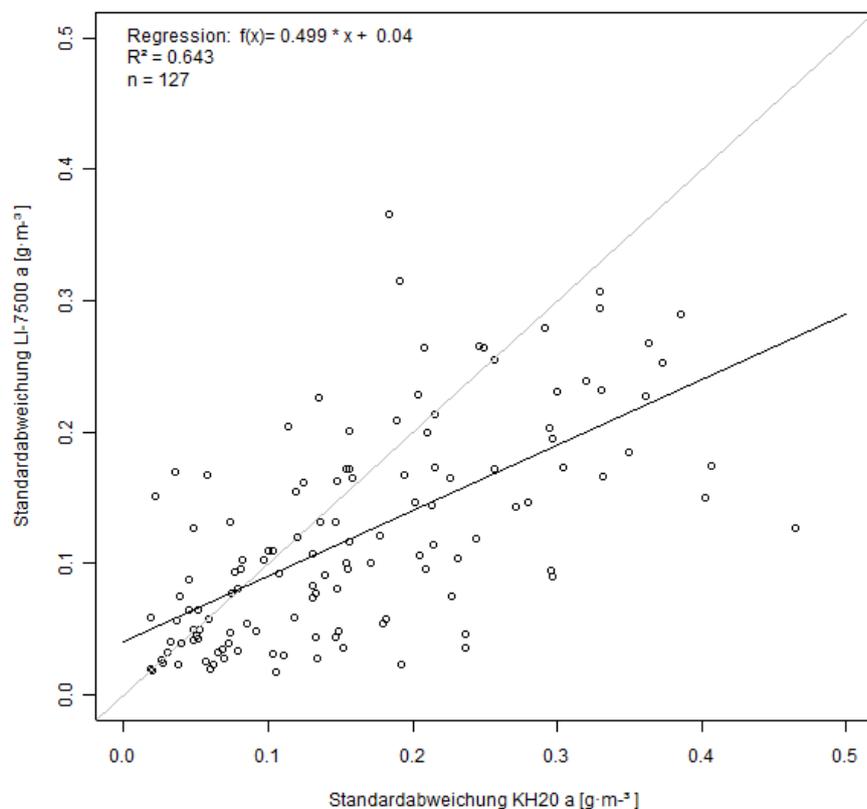


Abbildung 4.12: Standardabweichungen der absoluten Luftfeuchte a in g m^{-3} von LI-7500 und KH20. Berechnet über den Zeitraum von 2,5 Tagen aus 30-Minutenmitteln von TK2. Für das KH20 wurde die Kalibrierung vom 14.02.2010 verwendet.

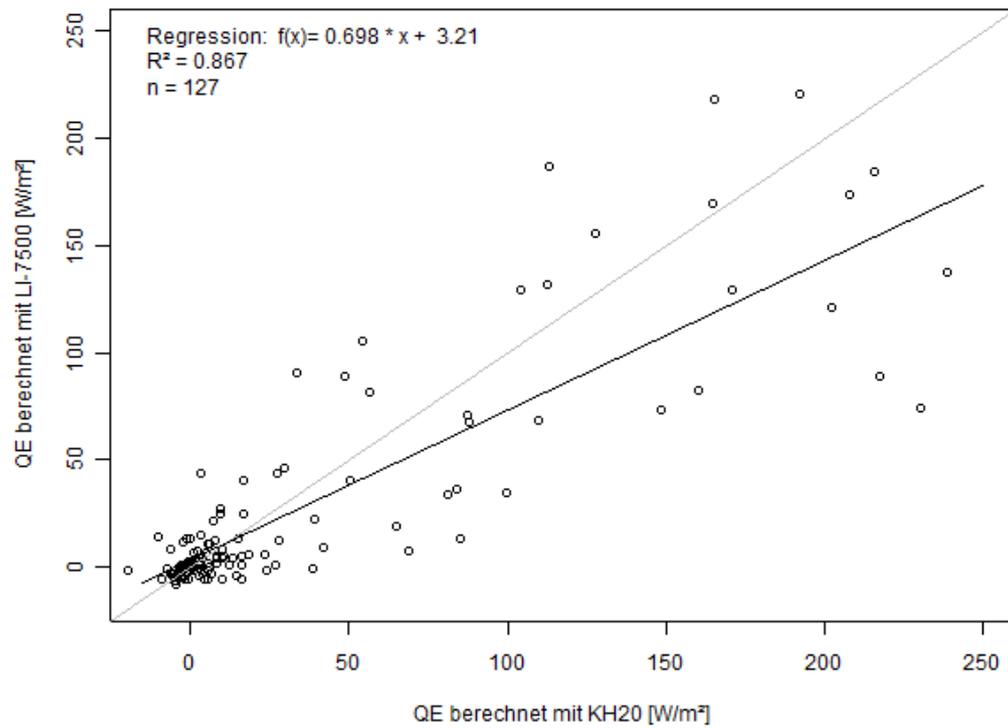


Abbildung 4.13: Vergleich des berechneten Wärmestroms von KH20 und LI-7500 in 30 min Werten über einen Zeitraum von 2,5 Tagen

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel des Experiments war es eine Aussage über die Qualität der Messung der Luftfeuchte sowie des latenten Wärmestroms mit dem LI-7500 auf dem tibetischen Plateau im Winter zu geben. Die Ergebnisse zeigten einen um 30 % niedrigeren latenten Wärmestrom mit dem LI-7500 im Vergleich zum KH20. Ein um 30 % zu niedriger latenter Wärmestrom hat direkte Auswirkungen auf Studien, die sich mit dem latenten Wärmestrom und seiner Modellierung beschäftigen (z.B. Guo et al., 2011). Aber auch auf Studien, die mithilfe der gemessenen Eddy-Kovarianzdaten Fernerkundungsmessungen validieren (Ma et al., 2007; 2009b), wie dies im GEOP-AEGIS-Projekt geplant ist.

Grund zur Annahme, dass nicht nur die absoluten Feuchtwerte des LI-7500 fehlerhaft gemessen werden, sondern dass auch die Messung des latenten Wärmestroms betroffen ist lieferte der Vergleich der Standardabweichungen der Luftfeuchte von LI-7500 und KH20. Dabei zeigte der Vergleich von Weisensee et al. (2003) von LI-7500 und KH20, der um 12 % höhere Standardabweichungen der Luftfeuchte bei ihren Untersuchungen am Observatorium in Lindenberg, Deutschland. Das Winterexperiment in Tibet 2010 weist sogar 50 % höhere Standardabweichungen des KH20 im Vergleich zum LI-7500 auf. Die Ursache dafür konnte nicht eindeutig geklärt werden.

Im Experiment wurden die im Vergleich zum HMP überhöhten Werte der absoluten Feuchte sowie der relativen Feuchte des LI-7500 wie erwartet in den Wintermonaten gemessen. Als ein möglicher Grund ist der zunehmende Fehler im niedrigen Luftfeuchtebereich anzunehmen. Dieser Fehler bei geringer Luftfeuchte ist auf das Kalibrierungspolynom zurückzuführen. Es wurde in der Arbeit gezeigt, dass schon eine geringe Verschiebung des Kalibrierungspolynoms die Luftfeuchtemessung um über 5 % verfälschen kann. Auch wenn bei abnehmendem Luftdruck der Fehler kleiner wird, so beträgt er bei einer Luftfeuchte von 1 g m^{-3} ca. 6 %. Dies erklärt aber nicht die zu hohen Werte der absoluten Luftfeuchte, die etwa um $3,5 \text{ g m}^{-3}$ höher liegen als die Referenzfeuchte und auch nicht den um 30 % geringeren latenten Wärmestrom im Vergleich zum KH20. Um die Höhe der Verschiebung zu erklären muss davon ausgegangen werden, dass die Verschiebungen des Kalibrierungspolynoms relativ groß ist. Eine Festlegung des Kalibrierungspolynoms geschieht durch die Parameter „Span“ und „Zero“. Des Weiteren ist die Drift der Feuchtwerte des LI-7500 im niedrigen Feuchtebereich mit der Temperatur zu beachten. Die Firma LiCor gibt an, dass eine Verschiebung von Span und Zero durch hohe Temperaturschwankungen (ab 30 K) hervorgerufen werden kann sowie durch eine längere Zeitspanne zwischen den Kalibrierungen (LI COR Instruction Manual, 2004). Insgesamt wird die Kalibrierung des LI-7500 von Weisensee et al. (2003) als sehr stabil beschrieben, was bei der

Verwendung des LI-7500 dazu führt, dass von vielen Anwendern die Kalibrierung etwa einmal im Jahr durchgeführt wird. Vom Hersteller wird angegeben, dass das LI-7500 je nach Einsatzgebiet monatlich bis vierteljährlich vom Anwender durch das Setzen von Span und Zero kalibriert werden sollte. Wobei das im Winterexperiment verwendete LI-7500 zuletzt im Juli 2009 kalibriert wurde. Betrachtet man die mit dem LI-7500 gemessenen Feuchtwerte und die gemessene Referenzfeuchte des Jahres 2009 so zeigt sich, dass möglicherweise die hohen Temperaturschwankungen zu einer Verschiebung der Kalibrierungskoeffizienten geführt haben. Weisensee et al. (2003) zeigten, dass eine Temperaturveränderung in einem Feuchtebereich von $1\text{-}3\text{ g m}^{-3}$ eine Feuchtedifferenz in der Messung von $0,6\text{ g m}^{-3}$ bei -10 °C betragen kann. Dies ist ein möglicher Grund warum vor allem in den Wintermonaten mit Temperaturen im Minusbereich keine korrekte Feuchtemessung möglich ist. Ein weiterer Faktor der in Betracht gezogen werden sollte, ist der Wärmestrom, der durch Erwärmung oder Abkühlung des Gerätes zustande kommt (Burba, 2008). Eine Lösung für dieses Phänomen bietet die Burba-Korrektur an. Diese hat zwar in erster Linie Auswirkungen auf den CO_2 -Fluss, jedoch auch auf den Feuchtefluss. Vor allem dann, wenn es sich um Feuchtemessungen in extrem kalten Gebieten mit sehr geringen Wasserdampfkonzentrationen und ρ -dichten handelt (Reverter et al., 2010).

Aufgrund der hier gezeigten Ergebnisse wird eine häufigere Kalibrierung des LI-7500, besonders in Gebieten mit extremen Witterungsbedingungen, wie hier für das tibetische Plateau gezeigt, empfohlen. Schon die täglichen Temperaturdifferenzen lagen während des Experiments zwischen 20 und 30 K. Der Hersteller gibt im Handbuch für das LI-7500 an, dass schnelle Temperaturänderungen von 30 K den Wert von Zero beeinflussen. Dieses Phänomen sollte in weiteren Studien geklärt werden, um qualitativ hochwertige Messungen der Luftfeuchte und des latenten Wärmestroms auf dem tibetischen Plateau sowie anderen Gebieten mit ähnlichen Umweltbedingungen zu gewährleisten.

Das Kalibrierungsprinzip der mobilen Kalibriereinheit des KH20 ist für den Anwender komfortabel durchzuführen und für abgelegene und Orte mit extremen Witterungsbedingungen wie zum Beispiel das tibetische Hochplateau besonders geeignet. Jedoch sollte darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Spannung für die Kalibriereinheit vorhanden ist und aufrechterhalten bleibt. Für die Auswertung der Feuchtedaten des KH20 am Nam Co war es notwendig im Nachhinein die Kalibrierungsparameter zu berechnen, da die bisherige Berechnung der Parameter von Foken und Falke (2010) überdacht und geändert wurde. In diesem Zusammenhang musste über die Verschiebung des V_0 -Wertes eine Anpassung der Luftfeuchtwerte an die Referenzmessung der Luftfeuchte vorgenommen werden. Die Berechnung und Anpassung wird in Zukunft durch die Software der Kalibriereinheit in derselben Art und Weise durchge-

führt, was die Anwenderfreundlichkeit erhöht. Dieser Umstand zeigt aber die Einfachheit und Durchschaubarkeit der Kalibrierung sowie der Luftfeuchtemessung mit dem KH20. Im Gegensatz zur aufwendigeren Kalibrierung und dem komplizierteren Messsystem des LI-7500. Das Messsystem erscheint zwar auf den ersten Blick komfortabler, da die Berechnung der Spannungsausgabe direkt durch die Software geschieht, der Anwender jedoch keine Einsicht in die Berechnung hat und diese zum Teil unvollständig angegeben ist (Weisensee et al. 2003). Um die Qualität der Luftfeuchtemessungen am Nam Co auf dem tibetischen Plateau im Winter zu verbessern sollte also entweder ein anderes Gerät für die Luftfeuchtemessung verwendet werden oder die Kalibrierung des LI-7500 viel häufiger durchgeführt werden.

6. Literatur

- Biermann, T., Babel, W., Olesch, J. and Foken, T (2009): Mesoscale Circulations and Energy and Gas Exchange Over the Tibetan Plateau – Documentation of the Micrometeorological Experiment, Nam Tso, Tibet, 25 June 2009 – 08 August 2009, *Arbeitsergebn*, 41, 37 pp., Univ Bayreuth, Abt. Mikrometeorol, ISSN 1614-8916.
- Buck, A. L. (1976), Variable-Path Lyman-Alpha Hygrometer and its Operating Characteristics, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 57(9), 1113–1118.
- Campbell, G. S., and B. D. Tanner (1985), A Krypton hygrometer for measurement of atmospheric water vapour concentrations, in: *Moisture and humidity*, pp. 609-614, ISA, Research Triangle Park.
- DIN 5031, Teil 7, (Jan. 1984), Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Benennung der Wellenlängenbereiche, Deutsches Institut für Normung e. V..
- Du Zheng, Q. Zhang, and S. Wu (2000), Mountain geocology and sustainable development of the Tibetan Plateau, *The GeoJournal library*, pp. 393, Kluwer, Dordrecht.
- Domrös, M., and G. Peng (1988), The climate of China, 360 pp., Springer, Berlin.
- Elagina, L. G. (1962), Optitscheskij pribor dlja izmerenija turbulentnych pulsacii vlaschnosti. (Optical sensor for the measurement of turbulent humidity fluctuations) *Izv. AN SSSR, ser. geofiz.*, 1100–1107.
- Finlayson-Pitts, B. J., and J. N. Pitts (2000), Chemistry of the upper and lower atmosphere, pp. 963, *Academic Press*, San Diego.
- Foken, T., R. Dlugi, and G. Kramm (1995), On the determination of dry deposition and emission of gaseous compounds at the biosphere-atmosphere interface, *Meteorol. Z.*, 4, 91–118.
- Foken, T., and B. Wichura (1996), Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1-2), 83–105.
- Foken, T., A. L. Buck, R. A. Nye, and R. D. Horn (1998), A Lyman-alpha hygrometer with variable pathlength, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), 211–214.
- Foken T. (2006), *Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden*, 2nd ed., pp. 325, Springer, Berlin.
- Foken, T, Falke, H (2010): Documentation and instruction manual for the Krypton hygrometer calibration instrument, *Arbeitsergebn*, 42, 16 pp., Univ Bayreuth, Abt Mikrometeorol, ISSN 1614-8916.
- Foken, T., and H. Falke (2011), Calibration instrument for the krypton hygrometer KH20, to be submitted.
- Fu, Y.-L., G.-R. Yu, X.-M. Sun, Y.-N. Li, X.-F. Wen, L.-M. Zhang, Z.-Q. Li, L. Zhao, and Y.-B. Hao (2006), Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe

- and alpine shrub. Carbon Exchange Research in ChinaFLUX, *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(3-4), 234–244.
- Genxu, W., H. Hongchang, L. Guangsheng, and L. Na (2009), Impacts of changes in vegetation cover on soil water heat coupling in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau, China, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(3), 327-341.
- Guo, D., M. Yang, and H. Wang (2011), Sensible and latent heat flux response to diurnal variation in soil surface temperature and moisture under different freeze/thaw soil conditions in the seasonal frozen soil region of the central Tibetan Plateau, *Environmental Earth Sciences*, in press, DOI: 10.1007/s12665-010-0672-6.
- Haginoya, S., H. Fujii, T. Kuwagata, J. Xu, Y. Ishigooka, S. Kang, and Y. Zhang (2009), Air-Lake Interaction Features Found in Heat and Water Exchanges over Nam Co on the Tibetan Plateau, *Sola*, 5, 172–175.
- Hyson, P., and B. B. Hicks (1975), Single-Beam Infrared Hygrometer for Evaporation Measurement, *Journal of Applied Meteorology*, 14(3), 301–307.
- Ihaka, R., and R. Gentleman (1996), R: A Language for Data Analysis and Graphics, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299-314.
- Johns, J. W. (1965), The absorption of radiation by water vapor, in *Humidity and moisture, measurement and control in science and industry, Principles and methods of measuring humidity in gases*, vol. 1, edited by R. E. Ruskin, and Reinhold, pp. 417–427, New York.
- Kretschmer, S. I., and J. V. Karpovitsch (1973) Maloinercionnyj ultrafioletovyj vlagometer (Sensitive ultraviolet hygrometer), *Izv. AN SSSR, Fiz. Atm. i Okeana*, 9, 642–645.
- Kristensen, L., J. Mann, S. P. Oncley, and J. C. Wyngaard (1997), How Close is Close Enough When Measuring Scalar Fluxes with Displaced Sensors, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14(4), 814–821.
- Leuning, R. A., and M. J. Judd (1996), The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes, *Global Change Biology*, 2(3), 241–253.
- LI-COR, LI-7500 CO₂/H₂O Analyzer, Instruction Manual, Rev. 1-4, 2001– 2004, (www.licor.com, 28.03.2011).
- Liebenthal, C., and T. Foken (2003), On the Significance of the Webb Correction to Fluxes, *Boundary-Layer Meteorology*, 109(1), 99-106.
- Liebenthal, C., and T. Foken (2004), On the significance of the Webb correction to fluxes, *Corrigendum, Boundary-Layer Meteorology*, 113, 301.
- Ma, Y., Z. Su, T. Koike, T. Yao, H. Ishikawa, K. Ueno, and M. Menenti (2003), On measuring and remote sensing surface energy partitioning over the Tibetan Plateau—from GAME/Tibet to CAMP/Tibet. Applications of Quantitative Remote Sensing to Hydrology, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(1-3), 63–74.

- Ma, Y., S. Fan, H. Ishikawa, O. Tsukamoto, T. Yao, T. KOIKE, H. Zuo, Z. Hu, and Z. Su (2005), Diurnal and inter-monthly variation of land surface heat fluxes over the central Tibetan Plateau area, *Theoretical and Applied Climatology*, 80, 259–273.
- Ma, Y., M. Song H. Ishikawa, K. Yang, T. Koike, L. Jia, M. Meneti, and Z. Su (2007), Estimation of the Regional Evaporative Fraction over the Tibetan Plateau Area by Using Landsat-7 ETM Data and the Field Observations, *Journal of the meteorological society of Japan*, 85A, 295–309.
- Ma, Y., Y. Wang, Z. Hu, K. Yang, M. Li, W. Ma, L. Zhong, F. Sun, X. Chen, Z. Zhu et al. (2009a), Recent advances in land surface climate observations on the Tibetan Plateau, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(1), 943–962.
- Ma, W., Y. Ma, M. Li, Z. Hu, L. Zhong, Z. Su, H. Ishikawa, and J. Wang (2009b), Estimating surface fluxes over the north Tibetan Plateau area with ASTER imagery, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(1), 57–67.
- Martini, L., B. Stark, and G. Hunsalz (1973), Elektronisches Lyman-Alpha-Feuchtigkeitsmessgerät, *Meteorol. Z.*, 23, 313–322.
- Metzger, S., Y. Ma, T. Markkanen, M. Göckede, M. Li, and T. Foken (2006), Quality assessment of Tibetan Plateau Eddy Covariance measurements utilizing Footprint modeling, *Advances in Earth Sciences*, 21, 1260–1267, X-XI.
- Mauder, M., and T. Foken (2004), Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2, *Arbeitsergebn*, 26, 45 pp., Universitätsbibliothek Bayreuth, Univ Bayreuth, Abt. Mikrometeorol, ISSN 1614-8916.
- Metzger, S. (2007), Quality assessment of Eddy Covariance measurements above Tibetan Plateau grasslands, *Dipl.thesis*, Universität Bayreuth, Bayreuth.
- Moncrieff, J. B., J. M. Massheder, H. de Bruin, J. Elbers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Soegaard, and A. Verhoef (1997), A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide, *Journal of Hydrology*, 188–189, 589–611.
- Moore, C. J. (1986), Frequency-Response Corrections for Eddy-Correlation Systems, *Boundary-Layer Meteorology*, 37(1-2), 17–35.
- Mota, R., R. Parafita, A. Giuliani, M. J. Hubin-Franskin, J. M. Lourenco, G. Garcia, S. V. Hoffmann, N. J. Mason, P. A. Ribeiro, M. Raposo, and P. Limão-Vieira (2005), Water VUV electronic state spectroscopy by synchrotron radiation, *Chemical Physics Letter*, 416(1-3), 152–159.
- Ocheltree, T. W., and H. W. Loeschner (2007), Design of the AmeriFlux Portable Eddy Covariance System and Uncertainty Analysis of Carbon Measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(8), 1389–1406.
- Ogawa, S., and M. Ogawa (1975), Absorption cross sections of $O_2(a^1\Delta_g)$ and $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ in the region from 1087 to 1700 Å, *Can. J. Phys.*, 53, 1845–1852.

- Raupach, M. R. (1978), Infrared fluctuation hygrometry in the atmospheric surface layer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104(440), 309–322.
- Reverter, B. R., E. P. Sanchez-Canete, V. Resco, P. Serrano-Ortiz, C. Oyonarte, and A. S. Kowalski (2010), Analyzing the major drivers of NEE in a Mediterranean alpine shrubland, *Biogeosciences*, 7(9), 2601–2611.
- Schmidt, W. (1994), *Optische Spektroskopie. Eine Einführung*, 2nd ed., 372pp., Wiley-VCH, Weinheim.
- Schotanus, P., F. T. M. Nieuwstadt, and H. A. R. Bruin (1983), Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes, *Boundary-Layer Meteorology*, 26, 81–93.
- Sonntag, D. (1990), Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITC-90, and psychrometer formulae, *Z. Meteorol.*, 40, 340–344.
- Stull, R. B. (2009), *An introduction to boundary layer meteorology*, Atmospheric and oceanographic sciences library, 670 pp., Springer, Dordrecht.
- Tanner, B. D., E. Swiatek, and J. P. Greene (1993), Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements, In: *Management of irrigation and drainage systems: integrated perspectives*, edited by R.G. Allen, pp. 945-952, American Society of Civil Engineers, New York.
- Tillman, J. E. (1965), Water vapor density measurements utilizing the absorption of vacuum ultraviolet and infrared radiation, In: *Humidity and moisture, Measurement and control in Science and industry, Principles and methods of measuring humidity in gases*, vol. 1, edited by R.E. Ruskin, pp. 428-433, Reinhold, New York.
- Turnipseed, A. A., D. E. Anderson, P. D. Blanken, W. M. Baugh, and R. K. Monson (2003), Airflows and turbulent flux measurements in mountainous terrain: Part 1. Canopy and local effects, *Agricultural and Forest Meteorology*, 119(1-2), 1–21.
- van Dijk, A., W. Kohsiek, and H. A. DeBruin (2003), Oxygen sensitivity of krypton and Lyman-alpha hygrometers, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 143-151.
- Weisensee, U., F. Beyrich, and J.-P. Leps (2003), Integration of humidity fluctuation sensors into the Lindenberg boundary layer measurement facilities: Experiences, problems, and future requirements, Amer. Meteorol. Soc: 83rd AMS Annual Meeting, Long Beach (California) 09-13 February 2003, paper 14.1 (prepr. on CD-ROM).
- Wernecke, R. (2003), *Industrielle Feuchtemessung. Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen*, 567 pp., Wiley-VCH, Weinheim.
- Wilczak, J., S. Oncley, and S. Stage (2001), Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms, *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127–150.
- Woźniak, B., and J. Dera (2007), *Light absorption in sea water*, Atmospheric and oceanographic sciences library, 452 pp., Springer, New York.

7. Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei Prof. Dr. Thomas Foken bedanken, dass er diese Arbeit betreut und ermöglicht hat und mich immer mit hilfreichen Ratschlägen unterstützt hat.

Weiterer Dank gebührt Dr. Johannes Lüers, dass er sich bereit erklärt hat das Zweitgutachten zu dieser Arbeit zu erstellen.

Danken möchte ich auch den chinesischen Partnern insbesondere Prof. Dr. Yaoming Ma, die das Experiment im Februar 2010 möglich gemacht und unterstützt haben.

Dank gilt auch dem Alfred-Wegner-Institut, das die Expeditionsausrüstung kostenlos zur Verfügung gestellt hat.

Tobias Biermann möchte ich meinen herzlichen Dank für die Unterstützung während des Experiments, bei der Datenauswertung und dem kritischen lesen meiner Arbeit aussprechen. Auch Wolfgang Babel möchte ich vor allem für die Hilfe bei Problemen in der Datenauswertung besonders danken, sowie Johannes Olesch insbesondere für die technische Unterstützung während des Experiments per Telefon.

Weiterhin möchte ich mich bei der gesamten Abteilung Mikrometeorologie für die Unterstützung der Arbeit in jeglicher Hinsicht bedanken. Auch den Diplomanden und Masters aus dem Diplomandenzimmer möchte ich für die vielen konstruktiven Diskussionen danken.

Elisabeth Thiem und Steve Lindner danke ich herzlich für das Korrekturlesen der Arbeit sowie für ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie, die immer für mich da war und mich in jeglicher Hinsicht während des Studiums und dieser Arbeit unterstütz hat. Besonders danken möchte ich dabei meinem Vater, der durch seine Begeisterung für mein Studienfach und meine Arbeit immer eine ermutigende Stütze war.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Absorptionshygrometers mit offenem Messpfad	12
Abbildung 2.2: Absorptionskoeffizienten [m^{-1}] für Wasser in flüssiger Form (durchgezogene Linie) und Wasserdampf (gestrichelte Linie) im langwelligen Bereich. (Aus Woźniak und Dera, 2007, verändert). Eingetragen sind die IR-Absorptionslinien des LI-7500 für H_2O , CO_2 und der Referenzmessung bei der keine Absorption stattfindet.	14
Abbildung 2.3: Absorptionskoeffizienten für Wasserdampf bei bestimmten Spektrallinien im UV-Bereich (Mota et al., 2005) und von Sauerstoff (gepunktet) (Ogawa und Ogawa, 1975), transformiert von Basis e zu Basis 10 durch Finlayson-Pitts und Pitts (2000)). Absorptionslinien sind relevant für das KH20, welches im UV-Bereich misst. Aus Foken und Falke (2011).	15
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der mittleren und fluktuierenden Komponente x aus Foken (2006).....	17
Abbildung 2.5 Eddy-Kovarianz-Messkomplex der Nam Co Station in Tibet mit Anemometer (C-SAT) und Feuchtesensoren (KH20, LI-7500). (Foto: Tobias Biermann).....	20
Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau des LI-7500. (Broschüre LI-COR, verändert)	23
Abbildung 2.7: Kalibrierungspolynom eines LI-7500 (SN 1636) des Herstellers. Aufgetragen ist die Luftfeuchte in $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{kPa}^{-1}$ gegen die Absorption in kPa^{-1} bei drei verschiedenen Temperaturen (17°C , 32°C , 45°C). Der Luftdruck für die Kalibrierung lag bei 97 kPa.	24
Abbildung 2.8: Effekt einer erweiterten Rekalibrierung durch den Hersteller über einen Temperaturbereich von -10 bis 30°C und einem Feuchtebereich von 1 bis 3 g m^{-3} . „before recalibration“ bezeichnet die Kurve vor der Kalibrierung durch den Hersteller und „after recalibration“ danach. Aus Weisensee et al. (2003)	26
Abbildung 2.9: Emissionsspektrum der Kryptonlampe (Campbell und Tanner 1985).....	27
Abbildung 2.10: Kalibriereinheit mit Kryptonhygrometer und HMP45A (Foken und Falke, 2011).....	32
Abbildung 3.1: Lage des tibetischen Hochplateaus mit der Hauptstadt Lhasa.	36

Abbildung 3.2: Umgebungskarte für den Versuchsort Nam Co. Die EC-Station ist mit einem roten Kreuz gekennzeichnet, die schwarzen Linien bezeichnen die Höhe ü.NN [m], die Landnutzung wird durch den Farbbalken gekennzeichnet. Metzger et al. (2006), verändert.....	37
Abbildung 3.3: Schema des Eddy-Kovarianz-Messkomplexes, die Geräte und deren Winkel zueinander sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.....	38
Abbildung 3.4: Umgebungsskizze des Eddy-Kovarianzmesskomplexes (EC). Bedeutung der Zahlen sind Tabelle 3.2 zu finden. Das Gelände der Tibet Research Station ist mit einem Zaun umgeben, welcher durch die gestrichelte Linie dargestellt wird.	39
Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Datenverarbeitung für das Experiment im Winter 2010.....	43
Abbildung 4.1: Regressionsgerade der Kalibrierung vom 14.02.2010 mit Regressionsgleichung. Die Steigung von -7,64 entspricht dem Kalibrierungskoeffizienten für Sauerstoff ko-Aktuell [$\ln(\text{mV}) \text{ m}^3 \text{ g}^{-1} \text{ cm}^{-1}$].....	46
Abbildung 4.2: Vergleich der absoluten Feuchte [g m^{-3}], die mit dem KH20 mit gereinigten und verschmutzten Fenstern gemessen wurden für den 22.02.2010.....	47
Abbildung 4.3: Vergleich des latenten Wärmestroms Q_E [W m^{-2}], gemessen mit dem KH20 mit gereinigten und verschmutzten Fenstern über einen Zeitraum von 6,5 Tagen.	47
Abbildung 4.4: Feuchtwerte von LI-7500 und KH20 (10 Hz) und dem Referenzmessgerät HMP in 30-Minutenmitteln vom 22.02.2010 (Peking Standardzeit; UTC+8).....	48
Abbildung 4.5: Absolute Luftfeuchte in 30-Minutenmitteln von LI-7500, KH20 und HMP über den gesamten Messzeitraum.....	49
Abbildung 4.6: Temperatur und absolute Feuchte im Jahr 2009 am Nam Co, dargestellt in 30-Minutenmitteln.	50
Abbildung 4.7: Temperatur und Feuchte (LI-7500, HMP), für November bis Dezember 2009 am Nam Co.	51
Abbildung 4.8: Darstellung der verschobenen absoluten Luftfeuchte des LI-7500 vom 22.02.10 in den Bereich der Referenzwerte (HMP) durch Abzug der	

mittleren Differenz von $3,43 \text{ g m}^{-3}$ von den LI-7500 Werten. Zusätzlich ist die absolute Luftfeuchte, die mit dem KH20 gemessen wurde dargestellt.	53
Abbildung 4.9: Fehler [%] bei leichter Verschiebung des Kalibrierungspolynoms. Die rote Linie zeigt den Verlauf bei 570 hPa und die blaue Linie bei 1000 hPa.	54
Abbildung 4.10: Energiedichtespektrum der gemessenen Feuchte von KH20 am 18.02.2010 über einen Zeitraum von 30 Minuten.	56
Abbildung 4.11: Energiedichtespektrum der gemessenen Feuchte von LI-7500 am 18.02.2010 über einen Zeitraum von 30 Minuten.	56
Abbildung 4.12: Standardabweichungen der absoluten Luftfeuchte a in g m^{-3} von LI-7500 und KH20. Berechnet über den Zeitraum von 2,5 Tagen aus 30-Minutenmitteln von TK2. Für das KH20 wurde die Kalibrierung vom 14.02.2010 verwendet.	57
Abbildung 4.13: Vergleich des berechneten Wärmestroms von KH20 und LI-7500 in 30 min Werten über einen Zeitraum von 2,5 Tagen.	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vorwiegend eingesetzte kommerzielle UV- und IR-Hygrometer (Foken 2006, bearbeitet).....	11
Tabelle 2.2: Einteilung der optischen Strahlung in die z.Z. üblichen Spektralbereiche. Nach DIN 5031(7).....	13
Tabelle 2.3: Gegenüberstellung der Feuchtemessgeräte LI-7500 und KH20	34
Tabelle 3.1: Geräte des Eddy-Kovarianz-Komplexes.....	39
Tabelle 3.2: Umgebung der Eddy-Kovarianz-Station, Beschreibung zu Abbildung 3.4.....	40
Tabelle 3.3: Umweltbedingungen bei den Kalibrierungen des KH20 mithilfe der mobilen Kalibriereinheit.	41
Tabelle 3.4: Kalibrierung durch den Anwender von LI-7500 vom 30.06.2009 am Nam Co. Die letzte Kalibrierung wurde am 17.02.2005 durchgeführt.....	44
Tabelle 4.1: Kalibrierungskoeffizienten für die Kalibrierungen im Winterexperiment am Nam Co.....	46
Tabelle 4.2: Beispiel für relative Luftfeuchte als 30 Minutenmittel von 8.30 – 9.00 Uhr (Peking Standardzeit) am 18.02.2010, Temperatur für diesen Zeitraum beträgt -15,3 °C (30 Minutenmittel)	52

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

C-SAT	Dreidimensionales Sonic Anemometer (Messung der Windgeschwindigkeit vertikal und horizontal sowie Temperatur)	
CEOP-AEGIS	Coordinated Asia-European long-term Observing system of Qinghai–Tibet Plateau hydro-meteorological processes and the Asian-monsoon system with Ground satellite Image data and numerical Simulations	
ChinaFLUX	Chinesisches Netzwerk in dem Eddy-Kovarianzmessungen gesammelt und zugänglich gemacht werden	
CO ₂	Kohlendioxid	
EC	Eddy-Kovarianz-Methode	
HMP	Gerät für Wasserdampf-und Temperaturmessungen (HMP45A Firma Vaisala Inc.)	
H ₂ O	Wasser	
KH20	Gerät zur Wasserdampfmessung (Hygrometer), misst H ₂ O durch Absorption eines UV-Strahls	
LI-7500	Gerät zur Gasanalyse, misst CO ₂ und H ₂ O durch Absorption eines IR-Strahls	
SN	Seriennummer	
TK2	Turbulenz Knecht 2	
TiP	Projekt auf dem tibetischen Plateau	
ü.NN	über Normalnull	
UTC+8	Koordinierte Weltzeit + 8 Stunden	
a	Absolute Feuchte	g m ⁻³
A _i	Spannung am Detektor für Gas i	V
A _{io}	Spannung wenn keine Absorption statt findet	V
e	Dampfdruck	hPa
E	Sättigungsdampfdruck	hPa
f ()	Funktion	-
f _i	Funktion für Gas i	-
h _i ()	Funktion für Gas i	-
I	Intensität des Lichtes wenn Absorption stattfindet	W m ⁻²
I _o	Intensität des Lichtes wenn keine Absorption stattfindet	W m ⁻²

k	Absorptionskoeffizient	m^{-1}
k _o	Kalibrierungskoeffizient Sauerstoff	$\ln(mV) m^3 g^{-1} cm^{-1}$
k _o –Aktuell	Aktueller Kalibrierungskoeffizient Sauerstoff	$\ln(mV) m^3 g^{-1} cm^{-1}$
k _o –Beginn	Kalibrierungskoeffizient Sauerstoff zu Beginn (erste Kalibrierung mit dem KH ₂ O)	$\ln(mV) m^3 g^{-1} cm^{-1}$
k _w	Kalibrierungskoeffizient Wasser	$\ln(mV) m^3 g^{-1} cm^{-1}$
K _w –Aktuell	Aktueller Kalibrierungskoeffizient für Wasserdampf	$\ln(mV) m^3 g^{-1} cm^{-1}$
K _w –Beginn	Kalibrierungskoeffizient für Wasserdampf zu Beginn (erste Kalibrierung mit dem KH ₂ O)	$\ln(mV) m^3 g^{-1} cm^{-1}$
P	Druck	hPa
P _{ei}	Druck für Gas i	hPa
q	spezifische Feuchte	$kg kg^{-1}$
QE	latenter Wärmestrom	$W m^{-2}$
R	Relative Feuchte	%
S _i	„Span“ für Gas i	-
T	Temperatur, Temperaturdifferenz	K
u _i	Menge des absorbierenden Gases	$mol m^{-2}$
V	Spannung bei Absorption	V
V _o	Spannung wenn keine Absorption stattfindet	V
x	Messgröße (allgemein)	-
z _i	„Zero“ für Gas i	-
α _i	Absorption für Gas i	-
ρ _i	Dichte eines Gases i	$g m^{-3}$
ρ _w	Dichte von Wasser	$g m^{-3}$
ρ _o	Dichte von Sauerstoff	$g m^{-3}$
τ	Taupunkt	°C

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Masterarbeit „Luftfeuchtemessung in großen Höhen und bei niedrigen Temperaturen“ selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe, und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Bayreuth, den 31. März 2011

Daniela Pfab