Friedrich-Schiller-Universität Jena
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät

Bachelor-Arbeit
Im Studiengang Biogeowissenschaften

Aufbau einer CO_2-Messstation und qualitative Analyse der resultierenden Tages- und Monatsgänge

Datum: 28.05.2008
Name: Dominic Clement
Matr.Nr.: 79825

Erstbetreuer:	Prof. Dr. Martin Heimann (Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena)
Zweitbetreuer:	Prof. Dr. Georg Büchel (Institut für Geowissenschaften, FSU Jena)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebene Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Jena, den 28.05.2008

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis I
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis II
1 Einleitung 1
2 Theoretischer Hintergrund 3
2.1 Atmosphärischer Kohlendioxid 3
2.2 Der Treibhauseffekt 3
2.3 Der Kohlenstoff-Kreislauf 5
2.4 Entwicklung des atmosphärischen CO_2-Gehalts 7
2.5 Messverfahren von CO_2 8
2.6 Variationen des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre 9
2.6.1 Der Einfluss der Biosphäre 10
2.6.2 Der Einfluss der Pedosphäre 11
2.6.3 Der Einfluss anthropogener Emissionen 12
2.6.4 Der Einfluss von meteorologischen Größen 12
2.6.4.1 Schichtung der Atmosphäre 12
2.6.4.2 Windstärke 14
2.6.4.3 Windrichtung 14
2.1.4.4 Weitere meteorologische Größen 14
2.6.5 Diurnale Variationen des ruralen CO_2-Gehalts 15
2.6.6 Annuelle Variationen des ruralen CO_2-Gehalts 16
2.6.7 Diurnale Variationen des urbanen CO_2-Gehalts 18
2.6.8 Annuelle Variationen des urbanen CO_2-Gehalts 19
2.6.9 Vergleich zwischen urbanen und ruralen Messergebnissen 21
3 Materialien und Methoden – Aufbau der CO_2-Messstation 22
3.1 Allgemeine Erläuterungen des pneumatischen Aufbaus 22
3.1.1 Beschreibung der einzelnen Teile im pneumatischen Diagramm 24
3.2 Der Gas-Analysator LI-6262 26
3.2.1 NDIR-Messmethode 27
3.2.2 Interne Kalibrierung des LI-6262 27
3.3 Das elektrische Schaltdiagramm 28
3.4 Der Datenlogger CR10X 30
3.4.1 Erläuterung des Edlog-Programms 30
3.4.2 Kalibrier-Zyklus 31
3.5 Der Weg zur Website 33
3.6 Charakterisierung des Standorts 34

4 Ergebnisse..... 35
4.1 Überblick über Gesamtsatz der erfassten Daten……..……... 35
4.2 Saisonale Variationen des CO_2-Gehalts (bezogen auf einen Zeitraum von 3 Monaten……... 37
4.3 Diurnale Variationen des CO_2-Gehalts ……... 40
4.4 CO_2 in Abhängigkeit von verschiedenen Variablen…….……... 42
4.4.1 Atmosphärische Schichtungsverhältnisse…..……. 42
4.4.2 Windgeschwindigkeit……. 46
4.4.3 Photosynthetisch aktive Strahlung´...……. 48
4.4.4. Relative Luftfeuchte……..…… 50
4.4.5. Niederschlagsereignisse..……..…… 51
4.4.6. Windrichtung……...……..…… 52
4.4.7. Anthropogene Emissionen……..…… 55
4.5 Vergleich zur Messstation auf Waldfläche (Hainich)…….. 57
4.6 Vergleich zur Messstation auf landwirtschaftlicher Fläche (Gebesee)……..……. 59
5 Diskussion…….……..... 62
6 Literaturverzeichnis.…….……..... 65
7 Anhang…….. 71

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der in den Medien, in der Politik und in der Wissenschaft vielfach diskutierten Kontroverse der „Globalen Erwärmung“ ist ein verstärktes Interesse an dem so genannten Treibhauseffekt in der Öffentlichkeit zu verzeichnen. Insbesondere stehen dabei die vielerorts zitierten Treibhausgase in der Diskussion, deren Konzentration in der Atmosphäre durch anthropogene Emissionen künstlich erhöht wird bzw. gänzlich aus anthropogener Produktion stammt. Kohlendioxid gehört zu dieser Gruppe, hauptsächlich aus Spurengasen bestehend, und wird aufgrund des Mengenanteils oft als wichtigstes Treibhausgas klassifiziert. Diese Gase sind in der Lage, terrestrische langwellige Strahlung zu absorbieren und zurück auf die Erdoberfläche zu emittieren, was zu einer zusätzlichen Erhöhung der Oberflächentemperatur führt.

Messergebnisse zeigen, dass der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution 1850 stark zugenommen hat und die globale CO_2-Konzentration von damaligen ca. 280 ppm auf den Stand von 379 ppm im Jahre 2005 gestiegen ist (IPCC 2007). Die Vorhersagen für die kommenden Jahrzehnte differieren zum Teil sehr stark voneinander, die Erstellung von Klimamodellen gestaltet sich als sehr komplex, allerdings wird in den meisten eine kontinuierliche Zunahme der CO_2-Konzentration sowie der Oberflächentemperatur auch weiterhin erwartet. Der aktuelle Trend besagt einen Anstieg des CO_2-Gehalts in der ungefähren Größenordnung von 1.9 ppm pro Jahr (Zeitraum 1995-2005) im globalen Mittel (IPCC 2007). Dies macht deutlich warum in der Wissenschaft ein großer Aufwand betrieben wird, um die Funktionen sowie die Effekte von Kohlendioxid in unserer Atmosphäre vollständig zu verstehen. Dazu gehören die Untersuchung der globalen Stoffkreisläufe von Kohlendioxid, die Analyse der natürlichen und anthropogenen Quellen und Senken sowie eine hochauflösende Messung des globalen und regionalen CO_2-Gehalts in der Atmosphäre. Ein global umfassendes Netz von CO_2-Messungen deckt hierbei die unterschiedlichsten Klimabedingungen ab und liefert einen guten Überblick über die CO_2-Konzentration in den verschiedenen topographischen Lagen. Zum Beispiel unterscheidet sich ein CO_2-Jahresgang in der Nord-Hemisphäre wesentlich von der gemessenen CO_2-Konzentration auf der südlichen Halbkugel. Zusätzlich zu diesen oftmals auf hohen Türmen gemessenen Hintergrund-Konzentrationen werden vermehrt auch auf kleinerer Ebene in geringerer Höhe CO_2-Messungen durchgeführt, auf ruralen wie auch urbanen Flächen.

Solche CO_2-Messungen auf regionaler Ebene sind auch der Ausgangspunkt für diese Arbeit und es soll das Ziel sein, eine zeitlich hoch auflösende Erfassung der CO_2-Konzentration über einen Zeitraum von knapp drei Monaten auf verschiedene Charakteristika zu analysieren:

- auf jahreszeitliche und tageszeitliche Variationen
- auf den Effekt von variablen und invariablen meteorologischen Einflussgrößen
- auf den Effekt von direkter und indirekter anthropogener Emissionen

- auf Gemeinsamkeiten zu Ergebnissen aus der Literatur zu urbanen und ruralen Messgebieten
- auf Gemeinsamkeiten zu den Ergebnissen aus zwei Umlandstationen auf landwirtschaftlicher Fläche und auf Waldfläche

Darüber hinaus soll diese Arbeit eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus einer solchen Messstation beinhalten bzw. die verschiedenen Schritte beschreiben von der Ansaugung der Außenluft bis hin zur graphischen Darstellung auf der Website des MPI Biogeochemie, Jena.

Diese Arbeit ist das Ergebnis aus der Kombination der beiden Module Projektmodul und Bachelor-Arbeit im Studiengang Biogeowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Das MPI Biogeochemie, Jena gestattete mir die Durchführung dieses Projekts mit dem Aufbau der CO_2-Messstation auf dem Dach des Instituts.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Atmosphärischer Kohlendioxid

Kohlendioxid ist seit dem Beginn der Entstehung der Atmosphäre ein fester Bestandteil der Luft in der Erdatmosphäre. In den relativ frühen Stadien der Erdatmosphäre war der Kohlendioxid-Anteil vermutlich um vieles höher gelegen als in der heutigen Atmosphäre. Hauptursache für den drastisch zurückgehenden CO_2-Gehalt in der Geschichte der Erdatmosphäre sind die Bildung der Ozeane und die Entwicklung des Lebens im Ozean und auf dem Festland, da hierbei bedeutende CO_2-Senken geschaffen wurden. Ausgehend von verhältnismäßig hohen CO_2-Gehalten aus den früheren Stadien der Atmosphäre zeigen Ergebnisse aus Eisbohrkernen, dass der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre in den letzten ca. 450.000 Jahren einen verhältnismäßig stabilen Wert einnahm, mit teils großen Schwankungen bezogen auf die variierenden Wechsel zwischen Eiszeit und Warmzeit (PETIT et al. 1999). Auffällig bei den aus Eisbohrkernen gewonnen Daten über die Eigenschaften der Atmosphäre sind die positiven bzw. negativen Korrelationen mit den Variablen Temperatur, Methan-Gehalt, Staub-Gehalt und Sonneneinstrahlung. Der aktuelle CO_2-Gehalt beläuft sich auf ca. 0,0382 % oder 382 ppm (Stand 2007), weshalb CO_2 auch als Spurengas bezeichnet wird aufgrund des verhältnismäßig geringen Anteils. Zwischen 1995 und 2005 betrug der durchschnittliche globale jährliche Anstieg von CO_2 in der Atmosphäre 1,9 ppm/Jahr (IPCC 2007).

Als Gas gehört CO_2 zu den $\geq$ 3-atomigen Spurengasen, in einer Gruppe mit z.B. N_2O oder CH_4. Man bezeichnet es auch als strahlungsaktiv, da es mit Hilfe seiner asymmetrischen Molekülstruktur Strahlung im infraroten Spektralbereich absorbieren kann. Damit spielt es eine wichtige Rolle bezüglich des in der Literatur häufig erwähnten Treibhauseffekts. Zusammen mit dem troposphärischen Wasserdampf und den Treibhausgasen Methan (CH_4), Ozon (O_3) und Distickstoffoxid (N_2O) kann man den Einfluss mit fast 98 % des natürlichen Treibhauseffekts beziffern. Der Absorptionsbereich von Kohlendioxid liegt bei 15-18 µm, mit einer dominierenden Energiebande bei 15 µm.

2.2 Der Treibhauseffekt

Einfach gesagt ist dieser Effekt ein natürlicher Vorgang in der Erdatmosphäre, der die Oberflächentemperatur in gemäßigte Bereiche transferiert, die das Leben auf der Erde erst ermöglichen (KUTTLER 1995). Grundsätzlich ist ein Zusammenspiel von verschiedenen Vorgängen zu beobachten, wobei die Absorption der emittierten Infrarotstrahlung den größten Effekt hat. Weitere Energieflüsse sind zum Beispiel die direkte Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung in der Atmosphäre sowie ein latenter (Verdunstung) und fühlbarer Wärmefluss von der Erdoberfläche in die Atmosphäre. Der dominierende Effekt ist allerdings folgender: die bis zur Erdoberfläche durchkommende kurzwellige Sonneneinstrahlung wird zu einem großen Teil (abhängig von der Albedo) an der Erdoberfläche absorbiert, was zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur führt. Die

Erdoberfläche emittiert ihrerseits langwellige Strahlung, deren Intensität und Wellenlänge gemäß dem Stephan-Boltzmann-Gesetz von der Oberflächentemperatur abhängen. Diese langwellige Strahlung wird nun auf ihrem Weg durch die Atmosphäre in zum Teil unterschiedlichen Bereichen von den so genannten Treibhausgasen (CO_2, CH_4, O_3, etc.) zu einem gewissen Anteil absorbiert und als atmosphärische Gegenstrahlung zurück in Richtung Erdoberfläche emittiert, was zu einer Erwärmung führt. Das vielerorts diskutierte Problem basiert auf dem Fakt, dass die Konzentration der verschiedenen Treibhausgase zunimmt und somit ein verstärkter Treibhauseffekt zu beobachten ist. Darüber hinaus reichern sich Gase in diesem Band an, die zu 100 % oder zumindest größtenteils aus anthropogener Produktion stammen (FCKWs, PFCs, SF_6, N_2O, etc.) und ebenfalls Infrarotstrahlung absorbieren können. Man spricht auch vom anthropogenen Treibhauseffekt, wodurch der Anteil der strahlungsaktiven Treibhausgase erhöht wird, und der eine zusätzliche Erwärmung zu dem natürlichen Effekt mit sich bringt. Der globale Temperaturanstieg der letzten fünfzig Jahre beläuft sich auf 0,13ºC ± 0,03ºC / Dekade (IPCC 2007). Abbildung 1 zeigt die gesamten Energieflüsse ausgehend von der eintreffenden Sonnenstrahlung, hierbei ist die in gelb gekennzeichnete Strahlung kurzwellige UV-Strahlung, während die langwellige terrestrische Infrarot-Strahlung in rot erscheint.

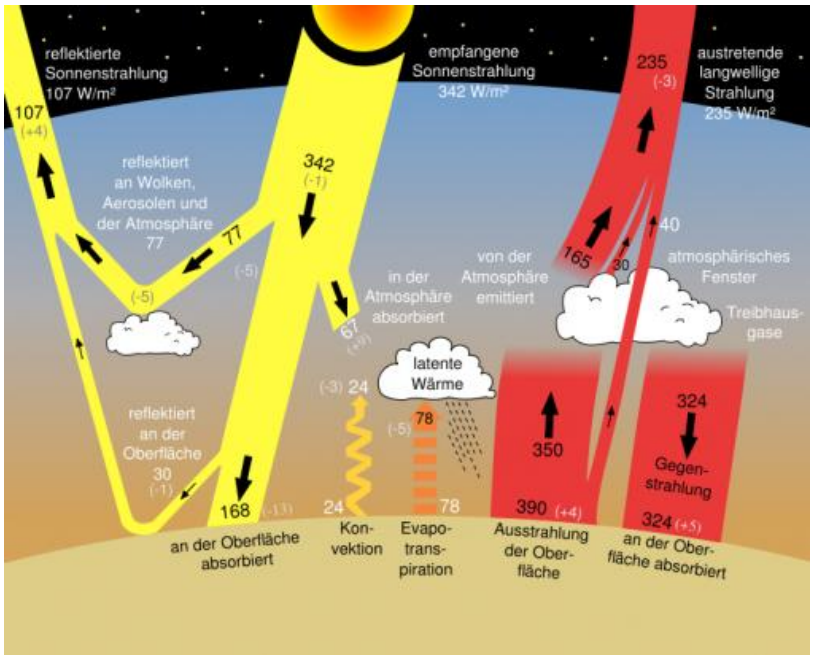


Abb. 1: Energieflüsse ausgehend von der empfangenen Sonnenstrahlung (nach KIEHL und TRENBERTH 1997, verändert)

Grundsätzlich sind die Auswirkungen der anthropogenen Erwärmung schwer abzuschätzen bzw. zu quantifizieren, die Vorhersagen der verschiedenen Modelle in der Literatur weichen teils sehr stark voneinander ab, wodurch sich das „Global Warming“ zur Streitfrage in der Politik und Wissenschaft entwickelt hat (IPCC 2007). Mehrheitlich wird allerdings eine Erwärmung als Folge von anthropogenen Emissionen anerkannt und es ist schon 1997 gelungen, die meisten Staaten in das so genannte „Kyoto-Protokoll“

einzubinden. Hierbei wurde eine „Rote Liste“ erstellt, die sechs Treibhausgase umfasst (CO_2, CH_4, FCKWs, PFCs, N_2O und SF_6), deren Emissionen in den kommenden Jahrzenten drastisch reduziert werden müssen, um den „Global Warming“-Effekt zu verlangsamen bzw. zu stoppen. Aktuell wurden das IPCC („Intergovernmental Panel on Climate Change“) für den „Fourth Assessment Report 2007“ sowie Al Gore mit dem Film „An inconvinient truth“ mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet, da eine aktuelle und effektive Analyse des Klimawandels erstellt wurde, die zum schnelleren Handeln in Politik und Wirtschaft anregen soll.

2.3 Der Kohlenstoff-Kreislauf

Das Kohlendioxid in der Erdatmosphäre ist ein wichtiger Bestandteil des Kohlenstoff-Kreislaufes. Kohlenstoff findet sich in allen organischen Verbindungen und besitzt somit eine zentrale Bedeutung für alle Lebewesen. Unter dem Kohlenstoff-Kreislauf versteht man die Gesamtheit aller Auf-, Um- und Abbauprozesse, durch die Kohlenstoff und seine Derivate umgesetzt werden.

Den größten Speicher für Kohlendioxid bilden die Ozeane, dort befindet sich in gelöster Form und größtenteils anorganisch (zu 97 %) etwa 60-mal soviel CO_2 wie in der Atmosphäre und ca. 20-mal soviel wie in der Biosphäre (FREUDIG 2001). Die molekulare Gasdiffusion sorgt für den Austausch von CO_2 zwischen Atmosphäre und Ozean, dieser Prozess hängt von der Differenz des Partialdruckes des Kohlendioxids im Wasser und in der darüberlegenden Luftschicht ab (GUDERIAN 2000). Allgemein kann man sagen, dass die CO_2-Konzentration in oberflächennahen Bereichen (bis zu 75 m Tiefe) von Diffusion und Windaktivität bestimmt wird. Darüberhinaus kann Algenwachstum durch Photosynthese als CO_2-Senke fungieren, über die abgestorbenen Überreste der Kalkalgen gelangt dieses gebundene CO_2 in die Tiefsee (SCHULZ et al. 2004). Bei gelöstem Kohlendioxid hängt ein solcher Transport von der Durchmischung des Ozeans ab und kann bisweilen mehrere Jahrhunderte dauern. Allerdings spielen mehrere Prozesse eine Rolle, die diesen Transport verlangsamen oder beschleunigen können. In der Literatur ist öfters von der Puffertätigkeit der Ozeane die Rede, welche den Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre zum gewissen Maße regulieren kann. Allerdings sind die damit verbundenen Prozesse noch nicht vollständig verstanden und eine Quantifizierung bzw. Bestätigung ist nur schwer möglich. Die Quantifizierung des Diffusionsprozesses ist möglich, ca. $0{,}2 \times 10^{12}$ t CO_2 werden in die Atmosphäre abgegeben und ungefähr der gleiche Wert wieder in den Weltmeeren gelöst (FALBE 1999).

In der Pedosphäre und Biosphäre ist die Funktion des Bodens von essentieller Bedeutung für den Kohlenstoff-Kreislauf. In der Form von Lebewesen und absterbender bzw. toter Biomasse werden hier große Mengen an CO_2 gespeichert. Durch die langsame Mineralisation organischer Verbindungen und Humusbestandteilen bleibt der größte Teil des CO_2 im Boden gebunden. Durch mikrobiellen Abbau tierischer und pflanzlicher Organismen und Wurzelatmung wird ein gewisser Anteil wieder an die Atmosphäre abgegeben. Ähnlich des CO_2-Austausches der Ozeane, findet ein CO_2-Massenaustausch

zwischen Bodenluft und atmosphärischer Luft aufgrund differierenden Partialdrucks statt. Die Intensität dieses Massenstroms ist abhängig von der Menge an organischen Substanzen im Oberboden, von der Aktivität der Bodenlebewesen, der Bodenfeuchte, dem Porenvolumen, vom Luftdruck und von der Temperatur sowohl im Boden als auch oberflächennah (BORKEN et al. 2003, PARKIN & KASPAR 2003).

Die lebende Biomasse spielt ebenfalls eine gewichtige Rolle aufgrund ihrer Photosynthese- und Respiration-Aktivitäten. Die Kohlendioxidassimilation durch grüne Pflanzen (Umwandlung von Kohlendioxid in Zucker und andere organische Verbindungen) bzw. die CO_2-Fixierung und die Aufnahme und Reduktion von CO_2 im Organismus entziehen der Atmosphäre CO_2, während ungefähr die Hälfte dieses Anteils durch nächtliche Respiration (Dunkelatmung) der Pflanzen zurücktransferiert wird (OSCHMANN et al. 2000). Allerdings kann ein Wald nicht unbedingt als CO_2-Senke klassifiziert werden. Durch die Wurzelatmung und die zersetzende Aktivität von Mikroorganismen wird ebenfalls ein beträchtlicher Anteil von CO_2 durch Bodenatmung an die Atmosphäre ausgestoßen. Man geht davon aus, dass ein ausgewachsener Wald im Durchschnitt ungefähr eine neutrale CO_2-Bilanz besitzt, nur bei einem wachsenden Wald (Bilanz aus Bruttozuwachs und Nutzungsmenge ist positiv) kann man von einer CO_2-Senke sprechen. Mit einer zunehmenden C-Speicherung durch anwachsende Wälder kann höchstens Zeit gewonnen, aber nicht das Problem der steigenden CO_2-Konzentrationen gelöst werden. Große Vorräte an Kohlenstoff in Wäldern können aber auch eine Hypothek für die Zukunft sein, da sie schnell zu CO_2-Quellen werden können, aufgrund vermehrten Waldsterbens, Sturmeinwirkungen und Waldbränden.

Unter ganz bestimmten Umweltbedingungen (sehr warm und feucht, Prozess der Inkohlung) konnte in der Vergangenheit der vollständige Abbau organischer Verbindungen nicht stattfinden und es kam zur Bildung der Lagerstätten fossiler Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle). Diese speichern große Mengen von Kohlenstoff bzw. Kohlendioxid, sind aber sozusagen inaktiv im Kohlenstoff-Kreislauf. Erst durch menschliche Aktivitäten sind diese fossilen Brennstoffe zu einer beträchtlichen Quelle von atmosphärischem Kohlendioxid geworden.

Interessant ist der Kohlenstoff-Kreislauf auch unter dem Gesichtspunkt der globalen Erwärmung. Zum Beispiel ist bei erhöhtem CO_2-Gehalt in der Atmosphäre eine „CO_2-Düngung“ zu erwarten, welches die Photosynthese und somit das Pflanzenwachstum fördert. Auch scheint eine Erhöhung der Meerestemperatur nicht förderlich für die CO_2-Aufnahme der Ozeane, da in wärmeren Breiten mehr Kohlendioxid abgegeben als zurückgeführt wird. Dies ist jeweils ein Beispiel für einen negativen und einen positiven Rückkoppelungs(Feedback)-Effekt.

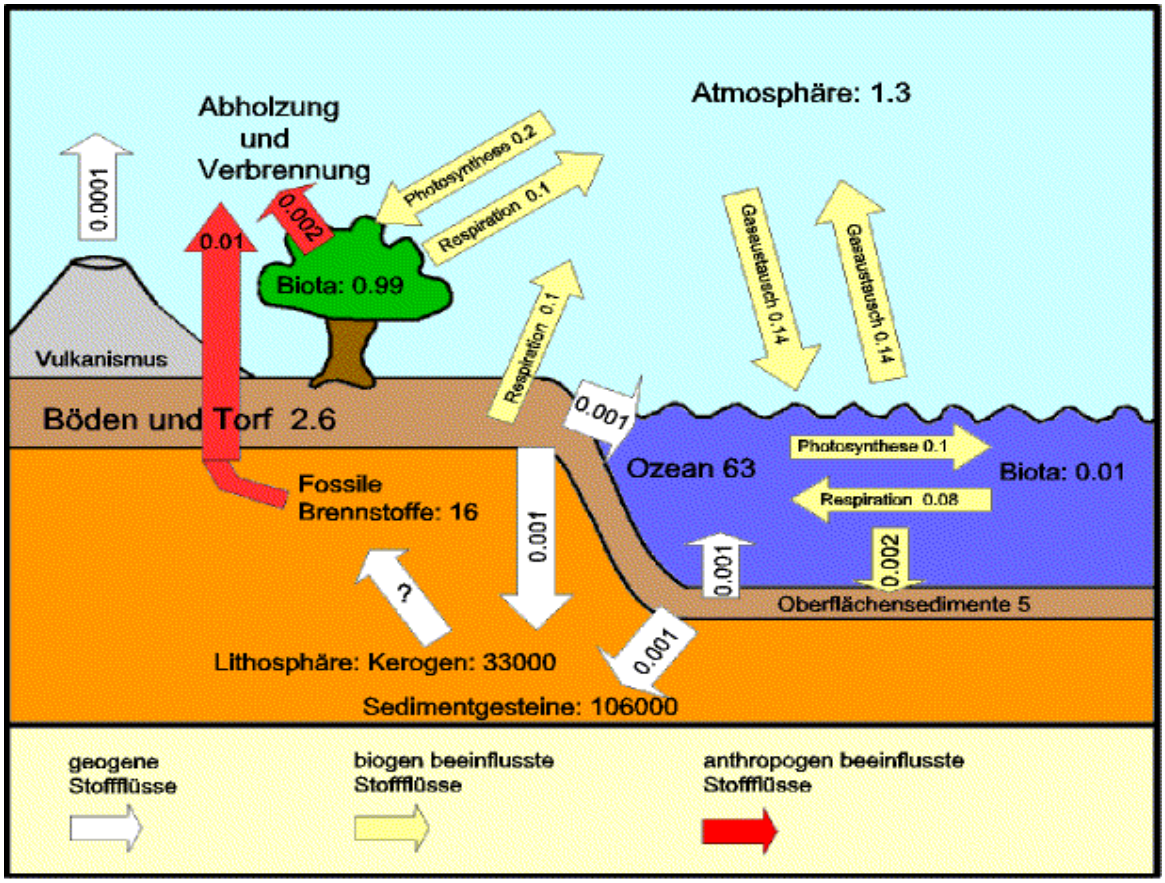


Abb. 2: Biosphären-gekoppelter Kohlenstoffkreislauf, alle Werte sind Relativzahlen bezogen auf die Biomasse, jeder Wert × $0{,}6 \cdot 10^{18}$ g C (OSCHMANN et al. 2000, verändert)

2.4 Entwicklung des atmosphärischen CO_2-Gehalts

In einem relativ frühen Stadium der Atmosphäre war diese hauptsächlich aus den reaktionsfreudigen Elementen Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff zusammengesetzt, wobei Kohlendioxid einen Anteil von bis zu 10 % erreichte, gebildet durch chemische Reaktion und vulkanische Exhalation (HÄCKEL 1990). In dem sogenannten dritten Stadium der Entwicklung der Erdatmosphäre (vor ca. 3,5 Mrd. Jahren) kam es ausgehend von einer Reihe von photochemischen Prozessen zu einer CO_2-N_2-H_2O-Ar-Anreicherung und es bildete sich ein Zustand, der mit der heutigen Venus- und Marsatmosphäre zu vergleichen ist mit einem sehr hohen CO_2-Gehalt (ca. 95 %). Im Zuge der weltweiten Abkühlung im Archaikum (gilt trotzdem als exzessive Warmzeit) in der Zeit vor 3,8 – 2,6 Mrd. Jahren, können erste Anzeichen der Ozeanbildung (vor ca. 3,2 Mrd. Jahren) und der Entstehung des Lebens (vor ca. 2,6 Mrd. Jahren) in diesem Zeitraum geschätzt werden (SCHÖNWIESE 1994). Mit dem Entstehungsprozess der ersten Ozeane war ebenfalls eine Abkühlung verbunden und erhebliche Anteile von Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff konnten in den frühzeitlichen Meeren gelöst und zu Calciumcarbonat umgewandelt werden, der Ozean agierte sozusagen als Pumpe (HÄCKEL 1990). Der Entwicklungsprozess des vierten Stadiums der Erdatmosphäre (heutige Atmosphäre) wurde durch diese Prozesse angetrieben. Mit der fortschreitenden Entstehung von Leben

und dem Transfer von den Meeren auf das Festland nahm die Photosynthese-Leistung rapide zu. Ab dem Devon und Karbon (vor ca. 400 – 280 Mio. Jahren) steigerte sich der Kohlenstoff-Umsatz kontinuierlich aufgrund sich ausbreitender Biomasse auf dem Festland und der etwas später folgenden Verbreitung von tierischen Organismen. Dieser Umsatz wurde zum dominierenden Effekt bei dem CO_2-Austausch mit der Atmosphäre (FEIGE & JENSEN 1995). Mit der zunehmenden Herausbildung von Wechselwirkungen zwischen der Biosphäre auf dem Festland und den Ozeanen bildete sich eine frühe Form des Kohlenstoff-Kreislaufes, und CO_2-Massenaustäusche zwischen den Bereichen Atmosphäre, Ozeane und Biosphäre formten ein natürliches Gleichgewicht. Aus so einem Gleichgewicht konnte dann eine Stabilisierung des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre erfolgen, dessen Schwankungen hauptsächlich auf die solare Aktivität und die Erdbahnparameter zurückzuführen sind. Die Werte bewegten sich im Bereich von ca. 200 ppm in glazialen und ca. 275 ppm in interglazialen Perioden (STEPHENS & KEELING 2000). Allerdings wurde festgestellt, dass in dem Zeitraum Paläozän (vor ca. 65 bis 55 Mio. Jahren) bis zum frühen Miozän (vor ca. 25 Mio. Jahren) der CO_2-Gehalt noch deutlich höher im Bereich von 1500-3000 ppm lag, dies konnte wiederum auf verstärkten Vulkanismus im späten Paläozän sowie im Eozän (vor ca. 55-40 Mio. Jahren) zurückgeführt werden. Im frühen Miozän (vor ca. 22 Mio. Jahren) stabilisierte sich der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre um den heute bekannten natürlichen Wert (PEARSON & PALMER 2000).

Der Einfluss des Menschen spielte eine eher untergeordnete Rolle bis zum Einsetzen der Industrialisierung 1850. Die schon vor ca. 8000 Jahren einsetzende Veränderung der Landnutzung durch Brandrodung und Abholzung der Wälder hatte einen eher geringfügigen Einfluss (RUDDIMAN 2003). Von um 1850 rekonstruierten 280 ppm, die ungefähr den natürlichen Gehalt einer interglazialen Periode widerspiegeln, stieg der CO_2-Wert kontinuierlich und exponentiell auf den heute gemessen Gehalt von 382 ppm (Stand 2007). Es ist davon auszugehen, dass mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen den anthropogenen Aktivitäten und dem rapide ansteigenden CO_2-Gehalt in der Atmosphäre besteht (IPCC 2007). Von größter Bedeutung sind hierbei sicherlich die Verbrennungsprozesse von fossilen Energieträgern (Kohle, Erdgas und Erdöl) sowie die in Waldgebieten betriebene Brandrodung. Die Brandrodung ist in doppelter Hinsicht von Relevanz, da ein bedeutender CO_2-Speicher reduziert wird. ARDENNE et al. (2001) beziffert die gesamten Verbrennungsprozesse auf 92 % aller anthropogenen CO_2-Emissionen. Weitere Einflussfaktoren stellen die Produktion von Zement und der allgemeine Abbau fossiler Biomasse dar (OLIVIER et al. 1999).

2.5 Messverfahren von CO_2

Von dem heute umfangreichen Gesamtbild von CO_2-Messstationen ist zuallererst die CO_2-Hintergrundmessstation in Mauna Loa, Hawaii hervorzuheben, da sie die erste kontinuierlich messende Station war, betrieben seit dem „Geophysikalischen Jahr“ 1957-58, sowie die kurz darauffolgende installierte Hintergrundstation in der Antarktis (BROWN & KEELING 1965). Bis zum heutigem Datum hat sich die Anzahl der bestehenden

kontinuierlich messenden CO_2-Stationen vervielfacht und werden in der „Carbon Cycle Greenhouse Gases Group“ (CCGG) zusammengefasst, die ein globales Netz der CO_2-Erfassung bilden soll. Zusätzlich zu den Festland-Stationen kommen hierbei Installationen im Offshore-Bereich (auf Bojen) und auf Inseln zum Einsatz, um die Ozeane abzudecken. Der Einsatz in Flugzeugen ermöglicht eine kontinuierliche Luftüberwachung, speziell werden horizontale CO_2-Profilmessungen durchgeführt.

Wie die verwendete CO_2-Station für diese Bachelor-Arbeit, kommen verstärkt auch lokale Messungen des CO_2-Gehalts zum Einsatz. Während in der Literatur schon relativ früh Messungen in ruralen Gebieten zu finden sind (z.B. CLARKE 1965, ALLEN 1969), ist nun auch größeres Interesse an dem CO_2-Wert in urbanen Räumen zu beobachten. Hierzu wurden eine Vielzahl von Arbeiten veröffentlich (z.B. AIKAWA et al. 1995, IDSO et al. 2002). Vereinzelt kommt es hierbei auch zur Durchführung einer Kohlenstoffisotopenanalyse, die der CO_2-Quellenlokalisation dient und weitreichende Informationen über die Herkunft des CO_2 besonders in urbanen Räumen geben kann (z.B. PATAKI et al. 2003). Ausgehend von dem Bestreben, geobiochemische Wechselwirkungen zu verstehen, kommt eine Vielzahl von sogenannten „Eddy Covariance“-Systemen zum Einsatz, die der CO_2-Flussmessung dienen (z.B. HILLER et al. 2008). Die Methode beruht auf der Annahme, dass jeglicher Transport von Wärme, Feuchtigkeit, Impuls und Spurengasen zwischen bodennaher Grenzschicht und Atmosphäre durch turbulenten Austausch vonstatten geht. Diese Wirbel bilden die Basis für zum Beispiel Wärme- oder Feuchtigkeitsaustausch zwischen tiefer und höher gelegenen Luftschichten (FRÜHAUF 1998).

Die Rückdatierung des CO_2-Gehalts der Atmosphäre kann durch verschiedene Methoden ermöglicht werden. Die prominenteste und umfassendste Methode ist hierbei die Untersuchung von Eisbohrkernen, wo eine Rekonstruierung bis zu ca. 450.000 Jahren vor heute erreicht wurde (PETIT et al. 1999). Hierbei werden eingeschlossene Luftblasen in den mächtigen Eisschichten auf Grönland und der Antarktis analysiert und somit ein Bild der damals vorherrschenden Atmosphäre erstellt. Weitere Methoden sind die Analyse von Baumringen, Sedimenten und Korallen, welche allerdings einen wesentlich geringeren Zeitraum umfassen. PEARSON & PALMER (2000) gingen bei der Analyse von Sedimenten neue Wege und fanden eine Methode um die CO_2-Entwicklung der Erdatmosphäre bis zum Paläozän (vor ca. 60 Mio. Jahren) zu datieren. Dabei konnte anhand von Bor-Isotopen Verhältnissen von planktonischen Foraminiferen, die in Sedimenten des Pazifischen Ozeans eingeschlossen waren, der ph-Wert der oberen Schicht der Ozeane geschätzt werden und damit eine Rekonstruierung des CO_2-Gehalt in der Atmosphäre vorgenommen werden.

2.6 Variationen des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre

Die im letzten Abschnitt **2.5** angesprochenen Hintergrund-Messstationen liefern ein global umfassendes Netz von CO_2-Messungen. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass der CO_2-Verlauf selbst auf globaler Ebene teils großen Schwankungen unterliegt. Man

erkennt sehr schnell die annuellen Variationen des CO_2-Verlaufs seit 1958 an der Mauna-Loa-Station. Dies wird als typisches Beispiel für die Nord-Hemisphäre genommen und lässt sich erklären durch den eintretenden Photosynthese-Effekt, der im Spätsommer seinen Höhepunkt erreicht (Minima in der CO_2-Kurve). Auch spielen hier anthropogene Emissionen eine Rolle, deren Wert im Winter aufgrund der kälteren Temperaturen höher ist (Heizung, privater Hausbrand, KFZ-Benutzung, etc.). Da die Landmasse sich überwiegend in der nördlichen Hemisphäre befindet, sind diese Effekte dort weitaus stärker zu beobachten als auf der Süd-Halbkugel, was geringere Variationen in dort präsenten CO_2-Hintergrundmessungen belegen (Antarktika-Station).

Um auf die regionale Ebene zu schließen kann man nur bedingt ein sogenanntes „Downscaling“ betreiben. Festzuhalten ist, dass hier ein ähnlicher Jahresgang zu erwarten ist wie auf globaler Ebene, wie verschiedene wissenschaftliche Arbeiten zeigen (z.B. LEVIN et al. 1995, MURAYAMA et al. 2003). Allerdings gibt es auf dieser Ebene sehr viel weitreichendere Effekte zu beobachten, wodurch sich eine meso- bzw. mikroskalige Auswertung als sinnvoll erweist. Das Interesse richtet sich auf die Tagesgänge, die abhängig von den klimatischen Bedingungen und der räumlichen Umgebung sehr unterschiedlich ausfallen können. Die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit kausale Abhängigkeit des CO_2-Gehalts der Atmosphäre von anthropogenen Emissionen führte zu vermehrten Veröffentlichen über CO_2-Messungen in Stadtgebieten, wo selbst ein solch hoher CO_2-Wert für möglich gehalten wurde, der den ersten Grenzwert von 1000 ppm übersteigt (WIDORY & JAVOY 2003). Der MAK-Wert („Maximale Arbeitsplatz-Konzentration“) beträgt zum Vergleich 5000 ppm, was sich überwiegend auf Innenraum-Konzentrationen bezieht (ZÜRCHER et al. 1992). Es ist wichtig, die räumlichen Gegebenheiten zu differenzieren. Grundsätzlich können ruraler und urbaner Bereich voneinander getrennt werden, wobei aber noch zahlreiche Subklassifikationen gemacht werden können. Beispiele wären suburbane Gebiete, an urbane Bereiche angrenzende Waldgebiete oder landwirtschaftliche Flächen. In den folgenden Unterkapiteln soll zwischen den beiden grundlegenden Gebieten differenziert werden:

1. einen urbanen Bereich, mit größtenteils anthropogen bebauten Flächen.
2. einen ruralen Bereich, in welchem man Einflüsse von anthropogenen Emissionen weitestgehend ausschließen kann.

Bevor allerdings die verschiedenen charakteristischen Tagesgänge erläutert werden, ist es wichtig die unterschiedlichen Einflussgrößen zu erklären, da sie alle eine bestimmte Rolle in den Tagesgängen einnehmen. Die drei Größen Biosphäre, Pedosphäre und anthropogene Emissionen kann man in Hinblick auf CO_2 als Quellen und Senken bezeichnen. Die verschiedenen meteorologischen Effekte sind dagegen für den vertikalen und horizontalen Transport von CO_2 in der Atmosphäre verantwortlich.

2.6.1 Der Einfluss der Biosphäre

Wie schon in Abschnitt **2.3** ersichtlich spielt die Biosphäre eine wesentliche Rolle im Kohlenstoff-Kreislauf. Bei der Photosynthese wird durch Chlorophyll CO_2 der Atmosphäre entnommen und in biochemischen Reaktionen zu Energie bzw. zu Biomasse umgewandelt.

Dieser photochemische Prozess der CO_2-Fixierung ist in großem Maße von photosynthetisch aktiver Strahlung abhängig. Lufttemperatur und Wasser- bzw. Mineralstoffversorgung können allerdings die biochemischen Vorgänge zur Produktion von Zucker (Energie) und anderen organischen Verbindungen beschleunigen bzw. hemmen. Der gegenteilige respiratorische Gaswechsel geschieht bei Nacht und wird auch Dunkelatmung genannt, wobei wiederum CO_2 an die Atmosphäre abgegeben wird. Allerdings ist die Nettoproduktion von CO_2 der Biosphäre negativ, daher kann es insgesamt als Senke klassifiziert werden. LARCHER (2001) zeigt einen schönen Tagesgang des CO_2-Gaswechsels in der Biosphäre in Abhängigkeit des Strahlungsangebots. Hierbei sieht man sehr gut die Korrelation zwischen Strahlung und CO_2-Aufnahme, differenziert durch Pflanzen mit unterschiedlicher potentieller CO_2-Aufnahme. Schattenpflanzen zeigen zum Beispiel relativ früh eine Form der Sättigung und können das steigende Strahlungsangebot nicht effektiv nutzen.

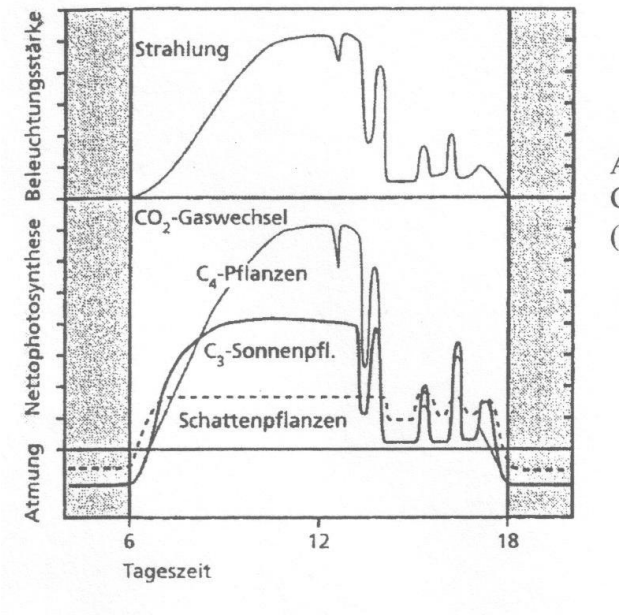


Abb. 3: CO_2-Gaswechsel von verschiedenen Pflanzentypen abhängig vom Strahlungsangebot (LARCHER 2001)

2.6.2 Der Einfluss der Pedosphäre

Die in der Pedosphäre vorherrschende Bodenatmung setzt sich zusammen aus der Wurzelatmung und der biologischen Aktivität von Bodenorganismen. Durch diese Prozesse wird CO_2 freigesetzt und führt zu einer mit CO_2 angereicherten Bodenluft im Vergleich zur Atmosphäre. In diesem Sinne kann der Prozess der Bodenatmung als CO_2-Quelle bezeichnet werden. Allerdings ist der Gaswechsel mit der Atmosphäre von dem CO_2-Partialdruck abhängig, daher bildet sich CO_2-angereicherte Bodenluft. Grundwasserschwankungen und Wasserfüllung der Bodenporen können ebenfalls zu einer Abgabe der mit CO_2 angereicherten Bodenluft führen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Die Bodenatmung an sich ist abhängig von den Faktoren Temperatur, Feuchte und organischem Kohlenstoffgehalt. Besonders in humiden Regionen kann die Temperatur als der dominierende Faktor bestimmt werden. In Abhängigkeit dieser Faktoren kann für verschiedene klimatische Rahmenbedingungen ein Tages- bzw. Jahresgang der

Bodenatmung beobachtet werden, den Einfluss auf den CO_2-Tagesgang zu quantifizieren ist allerdings nur bedingt möglich, da der Gaswechsel von Bodenluft und Atmosphäre vom CO_2-Partialdruck abhängig ist (FREUDIG 2001).

2.6.3 Der Einfluss anthropogener Emissionen

Zuallererst bleibt festzuhalten, dass das Gesamtbild der anthropogenen Emissionen sehr vielseitig ist. Hierbei kann man unterscheiden zwischen konstanten (z.B. Kraftwerke), jahreszeitabhängigen (z.B. privater Hausbrand) und tageszeitabhängigen (z.B. Stadtverkehr) Emissionen. Für die qualitative Analyse eines CO_2-Tagesgangs, in dessen räumlicher Umgebung anthropogene Aktivitäten zu verzeichnen sind, spielen alle drei Arten eine Rolle. Eine konstante Quelle kann eigentlich zu jeder Tageszeit zu dem natürlichen Tagesgang addiert werden. Wie später ersichtlich wird, spielen hier aber auch die meteorologischen Verhältnisse eine Rolle, und so kann zum Beispiel bei bestimmter Windrichtung die Emissionsquelle zurückverfolgt werden. HENNINGER (2005) zeigt das sehr schön am Beispiel des Ruhrgebiets bei bestimmten Windrichtungen. Jahreszeitabhängige Emissionen sind im Hinblick auf die saisonalen Variationen des CO_2-Gehalts wichtig. Der Hausbrand (private Verbrennungsprozesse für Heizung) bedeutet hier eine sehr wichtige Größe und es wurde auch schon gezeigt (IDSO et al. 2002), dass in kälteren Wintern höhere CO_2-Werte im Jahresgang zu verzeichnen waren. Der im Winter etwas stärker auftretende KFZ-Verkehr und das Vorkommen von Kaltstarts bei Automobilen haben ebenfalls einen Effekt auf den Jahresgang. Der KFZ-Verkehr ist von größerer Bedeutung durch seine tageszeitlichen Variationen, besonders in Städten stellt sich hierbei der sogenannte „rush hour"-Effekt ein, bei dem ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zu den Stoßzeiten früh morgens (ca. 6-8 Uhr) und am späten Nachmittag (ca. 16-18 Uhr), zu verzeichnen ist. In Hinblick auf eine Woche kann ebenfalls zwischen Werktag und Wochenende differenziert werden. Am Wochenende zeigt sich ein niedrigeres Verkehrsaufkommen, das mehr über den ganzen Tag verteilt auftritt, aufgrund von Wochenendausflügen.

2.6.4 Der Einfluss von meteorologischen Größen

2.6.4.1 Schichtung der Atmosphäre

Einen bedeutenden Einfluss auf die CO_2-Konzentration hat der vertikale Austausch von Luft in der Atmosphäre. Abhängig von verschiedenen meteorologischen Variablen (Strahlung, Druck, Temperatur, etc.) kommt es in der Atmosphäre zu unterschiedlichen Schichtungsverhältnissen. Man unterscheidet zwischen labilen, indifferenten (neutral) und stabilen Schichtungsverhältnissen. Der Normalzustand bedeutet eine indifferente Schichtung, ein adiabatischer Temperaturgradient gemäß der Gasgleichung stellt sich ein (Abnahme von ca. 1K / 100m). Bewegt sich ein Luftpaket auf eine andere Höhe, verweilt es dort gemäß des adiabatischen Temperaturgradienten. Sinkt die Temperatur mit weniger als 1K / 100m, so spricht man von einem unteradiabatischen Gradienten im Gegensatz zu einem überadiabatischen Gradienten. Setzt man eine unteradiabatische Schichtung voraus, wird die vertikale Bewegung so genannter Luftpakete je nach Grad der Schichtung erschwert, da zum Beispiel bei einer Steigung auf die neue Höhe h_1, die

Umgebungstemperatur höher ist als die Temperatur des adiabatisch gekühlten Luftpakets, und dieses auf seine Originalhöhe h zurückkehrt. Das gleiche gilt für ein potenzielles Absinken des Luftpakets. Dadurch entstehen stabile Bedingungen, da die vertikale Bewegung der Luftpakete stark eingegrenzt wird. Der gegenteilige Effekt stellt sich bei einer überadiabatischen Schichtung ein, bei einem Aufsteigen des Luftpakets ist die Temperatur größer als die Umgebungstemperatur und die vertikale Bewegung wird beschleunigt (HÄCKEL 1990).

Vor allen Dingen in Hochdruckwetterlagen ist während des Tages eine sehr labile Schichtung der Atmosphäre zu beobachten. Aufgrund hoher Sonneneinstrahlung wird durch Wärmekonvektion eine turbulente Durchmischung der Luftschichten gefördert und verstärkte vertikale Luftbewegungen führen zu einer Mischungsschicht. Ebenfalls fördert die Oberflächenrauigkeit mechanische Turbulenzen in Oberflächennähe. Mit sinkendem Sonnenstand reduziert sich allerdings die thermisch-konvektive Erwärmung und es kommt zu einer negativen Strahlungsbilanz der Oberfläche, da die langwellige Ausstrahlung größer ist als die atmosphärische Gegenstrahlung. Besonders bei wolkenlosen Nächten kann sich ein solcher Effekt in einer Inversionslage ausbilden, was zu einer sehr stabilen Schichtung der Atmosphäre führt, in der sich Spurengase anreichern können. Vertikale Bewegungen werden nun unterdrückt und ein umgekehrter Temperaturgradient stellt sich ein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Messungen in Jena (Thüringen) erhoben. Geographisch liegt die Stadt im Saaletal, umgrenzt von moderaten Bergen. EUGSTER & SIGRIST (2000) zeigen die Bildung einer Inversionslage in einer ähnlichen Situation:

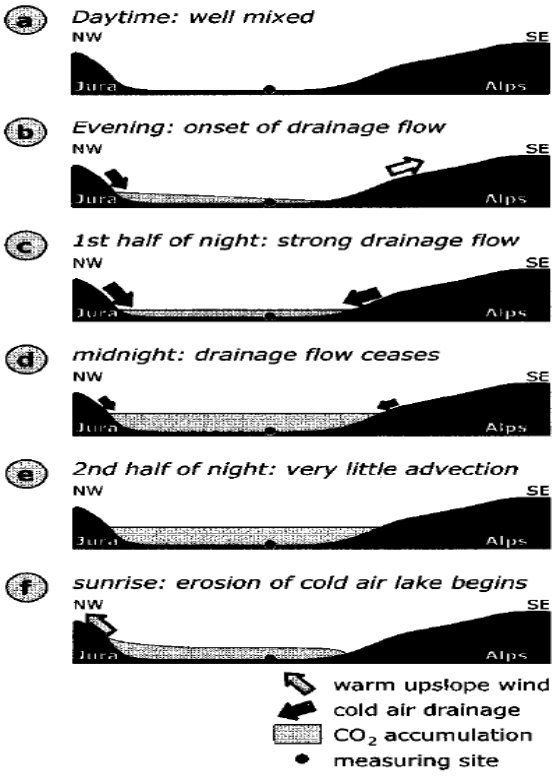


Abb. 4: CO_2-Akkumulation in einer Inversionslage (EUGSTER & SIGRIST 2000)

Sehr gut zu sehen sind hierbei die Kaltluftströme an den Hängen in das Tal hinein, die schließlich zu dem Temperaturgradienten führen. Bei Sonnenaufgang beginnt der Prozess der Wärmekonvektion von neuem und der angesammelte „See“ wird wieder durchmischt. Ein gutes Beispiel für eine Verlangsamung dieses Prozesses wäre Nebelbildung.

2.6.4.2 Windstärke

Die Ursache für die Entstehung des Windes sind Unterschiede im Luftdruck zwischen Luftmassen (oder Luftpaketen). Das Bestreben, einen Druckausgleich zu bewirken, führt zu einer Bewegung von Gebieten höheren Drucks zu Gebieten niedrigeren Drucks, also ein Massenstrom von Hochdrucklage zu Tiefdrucklage. Der Wind ist somit eine Ausgleichsströmung zwischen Gebieten verschiedenen Drucks. Einwirkende Kräfte sind die Gradientkraft und die Corioliskraft (HÄCKEL 1990, MALBERG 1997).

In verschiedenen Publikationen wird auf eine direkte negative Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und CO_2-Konzentration hingewiesen (z.B. NASRALLAH 2003, EUGSTER & SIGRIST 2000). Der Vergleich ist naheliegend, eine höhere Windgeschwindigkeit führt zu einer besseren Durchmischung der Atmosphäre, wodurch eine Akkumulation von Kohlendioxid deutlich erschwert wird. Ähnlich der Bildung der Schichtungsverhältnisse kann man auch einen Tagesgang für die Windstärke beobachten. Bei Hochdruckwetterlagen führt die Sonnenstrahlung typischerweise zur verstärkten Wärmekonvektion, die eine Beschleunigung der Luftpakete verursacht und damit die Windgeschwindigkeit erhöht. Wichtig ist ebenfalls die Rauigkeit der Oberfläche, sowie von Objekten in verschiedenen Höhen (z.B. Bäume, Häuser). Wegen der Bodenreibung nimmt die Windgeschwindigkeit mit ansteigender Höhe zu. Tiefdruckwetterlagen bringen höhere Windstärken mit sich, daher sind labile Schichtungsverhältnisse wahrscheinlicher. Hier kann der Tagesgang der Windgeschwindigkeit sehr unterschiedlich ausfallen.

2.6.4.3 Windrichtung

Die Windrichtung ist im Hinblick auf die CO_2-Konzentration sehr wichtig, da die Richtung des horizontalen Transports der natürlichen und anthropogenen CO_2-Emissionen durch sie bestimmt wird. In der ständigen Dynamik der Atmosphäre kann die Bahn eines individuellen Teilchens verfolgt werden, die als Trajektorie bezeichnet wird. Ein bekanntes Beispiel für die Verfolgung von Trajektorien ist Tschernobyl (27.04.1986), wo der Verlauf der radioaktiven Stoffe über die verschiedenen Gebiete Europas zurückverfolgt werden konnte. In der gleichen Art und Weise können CO_2-Emissionen verfolgt werden. Es gilt dabei zu beachten, dass Trajektorien sehr unterschiedlich verlaufen, beispielsweise ist eine durchgehend lineare Richtung eher unwahrscheinlich.

In verschiedenen Publikationen ruraler Messstationen wurde beobachtet, dass es bei bestimmten Windrichtungen zu nicht erwarteten Variationen kam, die anhand der Windrichtung umliegenden anthropogenen Emissionsquellen zugeordnet werden konnten (z.B. LEVIN et al. 1995, HASZPRA 1992).

2.6.4.4 Weitere meteorologische Größen

Es ist des Weiteren Aufgabe dieser Arbeit, weitere Größen wie Photosynthetisch Aktive Strahlung (Anteil der Globalstrahlung, PAR), Temperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag und Druck und deren Zusammenhänge mit der CO_2-Konzentration zu untersuchen. Die Strahlung kann zur Bildung der Schichtungsverhältnisse der Atmosphäre beitragen und ist für die Photosynthese-Funktion der Biosphäre wichtig. Temperatur und relative Luftfeuchte sollten einen Einfluss auf die Größe der Bodenatmung haben. In Hochdruck- bzw. Tiefdruckwetterlagen können sich ganz unterschiedliche Eigenschaften von Wind und Schichtung der Atmosphäre herausbilden.

2.6.5 Diurnale Variationen des ruralen CO_2-Gehalts

Bezüglich des tageszeitlichen Verhaltens des ruralen CO_2 ist verhältnismäßig früh geeignete Literatur zu finden, bereits in den 60-Jahren gaben z.B. CLARKE (1965) und ALLEN (1969) einen guten Überblick über die tageszeitliche Variationen in ruralen Gebieten. Bis zum heutigen Datum kann man auf Ergebnisse von den meisten Flächenstrukturen eines ruralen Gebietes zurückgreifen, wie zum Beispiel landwirtschaftlich genutzte Flächen (z.B. ALLEN 1969), Waldflächen (z.B. AUBINET et al. 2001) oder Wiesen- und Prärielandschaften (z.B. KIM & VERMA 1990).

Im Überblick bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse teils voneinander abweichen, besonders in den jeweiligen Amplituden, aber die meisten Veröffentlichungen den typischen Tagesgang aufweisen können. Wie in Abbildung 5 zu erkennen, bildet ein solcher Tagesgang ein deutliches Maximum in der Nacht und ein Minimum am Nachmittag aus.

Als hauptsächliche Quellen und Senken können in ruralen Gebieten der Photosynthese/Respiration – Effekt der Biosphäre sowie die Bodenatmung der Pedosphäre gesehen werden. Über einen Tag verteilt kann der Wechsel zwischen respiratorischem und photosynthetischem Gasaustausch in der Biosphäre sehr gut beobachtet werden. Aufgrund hoher Kohlendioxidassimilation infolge präsenter photosynthetisch aktiver Strahlung bildet sich während der Tageszeit ein Minimum heraus, typischerweise zu den Nachmittags-Stunden. Mit einsetzender Respiration produzieren Biosphäre und Pedosphäre über Nacht CO_2 und ein Anstieg ist zu verzeichnen als Folge der CO_2-Anreicherung. Hierbei gilt zu beachten, dass die Bodenatmung der Pedosphäre auch zur Tageszeit auftritt. Der Effekt der Anreicherung kann aber ganz unterschiedlich ausfallen abhängig von atmosphärischen Austauschverhältnissen. Stabile Schichtungsverhältnisse, wie bei einer Inversion, bieten günstige Bedingungen für eine Anreicherung sowie schwache Windverhältnisse. HASZPRA (1992) zeigt den sommerlichen CO_2-Tagesgang abhängig von der Windgeschwindigkeit und der eintreffenden Strahlung (sonnig oder bewölkt als Indiz). Während die CO_2-Konzentrationen zur Tageszeit nur leicht voneinander abweichen, zeigen sich in der Nacht deutliche Unterschiede. CO_2 nimmt die höchsten Werte ein bei geringen atmosphärischen Austauschbedingungen, in dem Fall schwachwindige Verhältnisse und ein sonniger Tag (höhere Wahrscheinlichkeit für Ausbildung von Inversionen). Im Gegenzug ist der Tagesgang sehr viel weniger ausgeprägt bei windigen und bewölkten Verhältnissen, da hier eine bessere Durchmischung der Atmosphäre stattfindet.

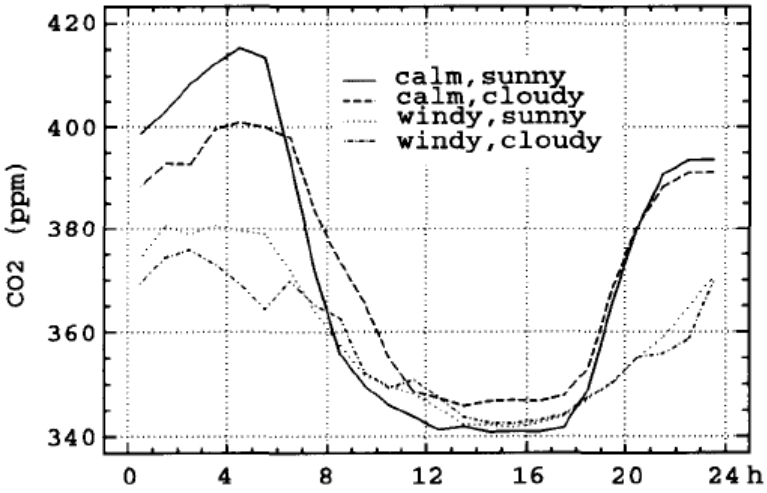


Abb. 5: CO_2-Tagesgang abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Bewölkungsgrad an einem ruralen Standort (HASZPRA 1992)

2.6.6 Annuelle Variationen des ruralen CO_2-Gehalts

Wie der auf ruralen Flächen dominierende Photosynthese/Respiration – Effekt abhängig von der Tageszeit verschieden ausfällt, stellen sich auch Variationen mit Hinblick auf den Verlauf eines Jahres ein. Ganz offensichtlich ist das Pflanzenwachstum im Frühling und Sommer dafür verantwortlich, wodurch mehr photosynthetisch aktive Strahlung durch die Biosphäre umgewandelt werden kann. Dies bedeutet, dass der typische CO_2-Tagesgang sich im Laufe des Jahres verändert, abhängig von der bestehenden Pflanzendichte (Blattflächenindex). Verschiedene Beispiele zeigen (z.B. LEVIN et al. 1995, MURAYAMA et al. 2003), dass lokale Messstationen auf ruraler Ebene ähnliche Ergebnisse zu verzeichnen haben, wie die Hintergrundmessstationen, zum Beispiel die Station Mauna Loa, Hawaii. Unterschiede entstehen aufgrund der Verbindung zwischen Jahreszeiten und Breitengraden, jedoch bleibt der prinzipielle Jahresgang in etwa der Gleiche.

Als Beispiel wurden die Ergebnisse einer deutschen Arbeit gewählt, innerhalb welcher der Jahresgang an fünf verschiedenen Stationen aufgezeigt wird. Levin et al. (1995) zeigt hier deutlich die maximalen CO_2-Konzentrationen vor Einsetzen des Frühlings in der Zeit Februar-April, sowie die minimalen CO_2-Konzentrationen im Spätsommer im Juli-September (Abb. 6). Zeitliche Variationen können auftreten aufgrund der unterschiedlichen geographischen Lagen der gewählten Messstation, Westerland befindet sich im nördlichen Küstenbereich während die Station Schauinsland auf einer Höhe von 1205 m im Gebirge liegt.

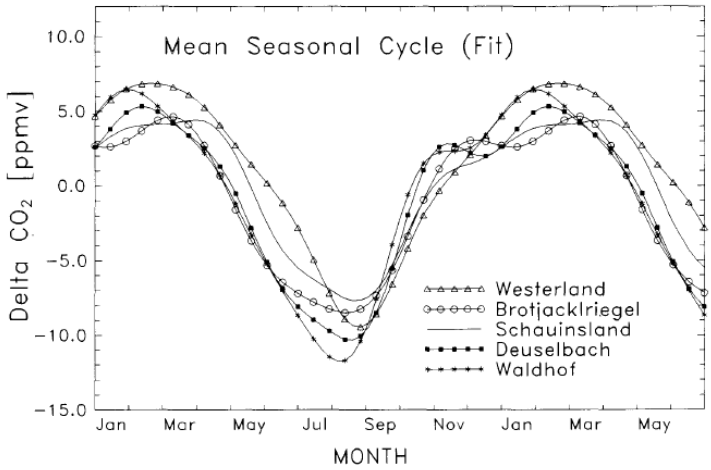


Abb. 6: Saisonale Variationen an fünf verschiedenen Messstationen in ruralen Gebieten in Deutschland (LEVIN et al. 1995)

Interessant ist ebenfalls die unterschiedliche Ausprägung des Tagesgangs in ruralen Gebieten über ein Jahr gesehen. Tritt Photosynthese und Respiration auf, vergrößern sich die Amplituden der beobachteten Minima und Maxima. Die maximalen CO_2-Konzentrationen erhöhen sich in den Sommermonaten aufgrund größerer Respirationsleistung der Biosphäre und erhöhter Bodenatmung der Pedosphäre in Zusammenhang mit den ansteigenden Temperaturen. Das Tagesgang-Minimum am Nachmittag bildet sich ebenfalls deutlicher aus, da die Kohlendioxid-Assimilation durch die Biosphäre nun einen größeren Wert einnimmt.

Der winterliche Tagesgang zeigt hingegen nicht so deutliche Extreme, da geringe Temperaturen zu reduzierter Aktivität der Biosphäre und Pedosphäre führen. Gut zu sehen sind diese Effekte bei LEVIN et al. (1995), wobei allerdings manche Stationen aufgrund ihrer geographischen Lage (regionale Einflüsse sind dort minimiert) keinen solch ausgeprägten Tagesgang aufweisen (Abb. 7). Schauinsland ist z.B. eine aktuell beitragende Station zu „Carbon Cycle Greenhouse Group“, deren Aufgabe Hintergrundmessungen sind. In der folgenden Abbildung zeigen sich die maximalen Amplituden im Juli und die minimalen Ausprägungen im Januar:

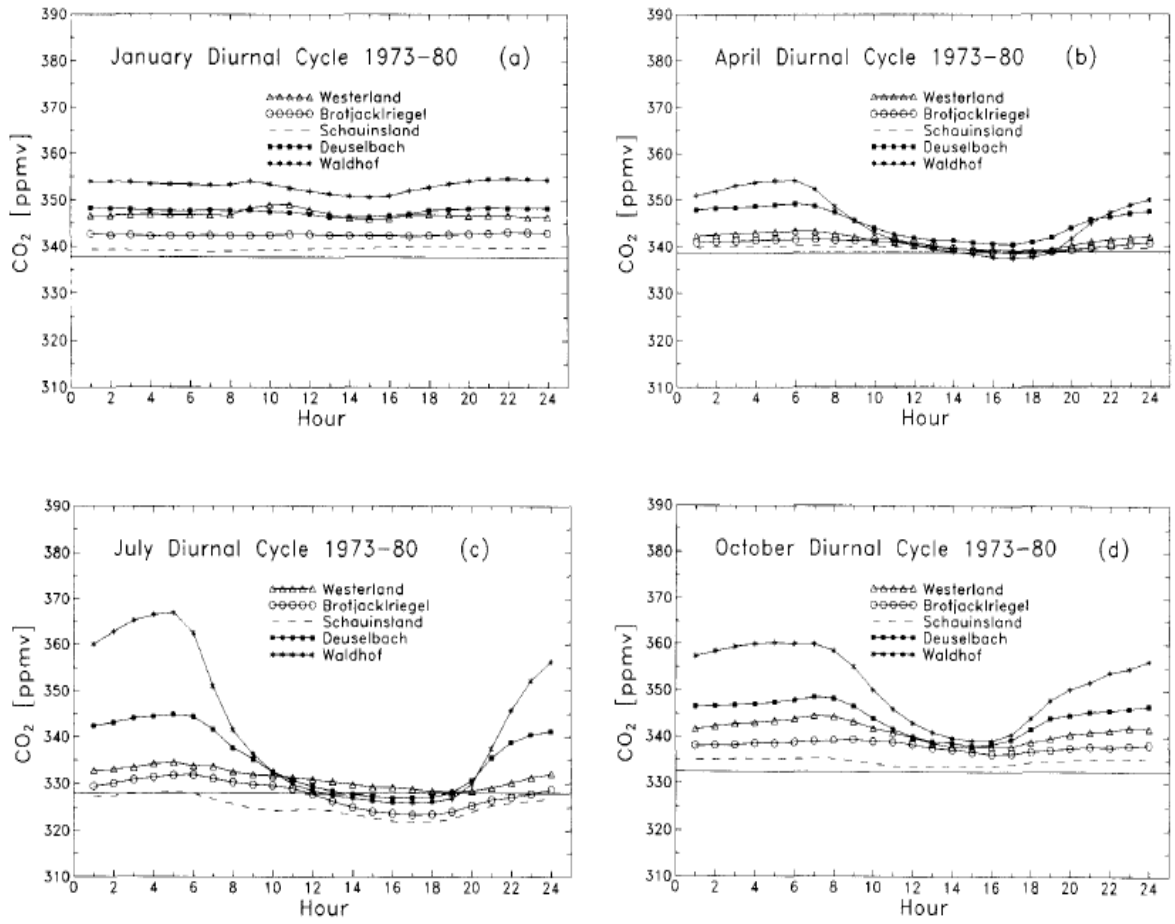


Abb.7: Jahreszeitliche Unterschiede in der Ausprägung des Tagesgangs in ruralen Gebieten (LEVIN et al. 1995)

2.6.7 Diurnale Variationen des urbanen CO_2-Gehalts

Während sich bei dem ruralen CO_2-Tagesgang aus einer Vielzahl von Messergebnissen ein relativ einheitlicher diurnaler Verlauf verfolgen lässt, gestaltet sich die Situation in urbanen Räumen etwas schwieriger. Wie bereits angesprochen, ist das Interesse an dem CO_2-Gehalt in Städten stark angestiegen und die Anzahl von Publikationen in der Vergangenheit nahm zu. Allerdings lässt sich bei einem Vergleich feststellen, dass die Eigenschaften der verschiedenen untersuchten Ballungsgebiete in Bezug auf CO_2-Emissionen sehr unterschiedlich ausfallen. Variablen wie Messzeitraum, Messhöhe und Jahreszeit wurden nicht repräsentativ gewählt, sodass kein übergreifend geltender Tagesgang erstellt werden kann, allerdings kann man gewisse Gemeinsamkeiten der verschiedenen Ergebnisse feststellen.

Den größten Einfluss als CO_2-Quelle haben die Emissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr und den Hausbrand (BERRY & COLLS 1990b, CLARKE & FAORO 1966). Hier wird schon deutlich, dass die jeweiligen tageszeitlichen und jahreszeitlichen Emissionen sehr stark vom gewählten Standort abhängen können. Nicht minder zu beachten sind der Einfluss der Biosphäre und Pedosphäre, den ZIMNOCH et al. (2004) auf bis zu 20 % beziffern. Dies zeigt, dass auch im urbanen CO2-Tagesgang die Effekte von Photosynthese und Respiration zu beobachten sein werden.

Bei genauerer Betrachtung zeigen die veröffentlichten Ergebnisse durchgängig ein Minimum am frühen Nachmittag, ähnlich dem vergleichbaren Effekt in ruralen Gebieten (Photosynthese, gute Durchmischung der Atmosphäre). Auch sind zu dieser Zeit wenig Kraftfahrzeugverkehr zu erwarten bzw. geringere Hausbrandemissionen. Ein Maximum zu den Nachtstunden ist schwieriger zu identifizieren verglichen mit dem ruralen Tagesgang. Vielmehr teilt sich der Verlauf hier in zwei Maxima, was von den meisten Publikationen bestätigt wird (z.B. BERRY & COLLS 1990b, AIKAWA et al. 1995). Das zweite Maximum tritt relativ einheitlich zu den frühen Morgenstunden zwischen 6-8 Uhr, während das erste Maximum variabel zwischen 18-24 Uhr auftreten kann bezogen auf verschiedene Messergebnisse.

Besonders in den Frühlingsmonaten treten die Effekte des erhöhten morgendlichen Kraftfahrzeugverkehrs und die Durchmischung der Atmosphäre durch einfallende Strahlung ungefähr zum gleichen Zeitpunkt auf. Falls eine relativ stabile Atmosphärenschichtung zu verzeichnen ist kann die Anreicherung von Kohlendioxid bis zum Beginn der einfallenden Strahlung ihren Höhepunkt erreichen. Kumulierend zu dem in der Frühe sehr konzentrierten Kraftfahrzeugverkehr sind zu dieser Zeit deutliche Maxima zu beobachten.

Die Annahme, dass das zweite Maximum aufgrund der Addierung zweier zeitlich gesteuerter Ereignisse stärker ausfällt als das erste spätabendliche Maximum, lässt sich nach intensiver Recherche nicht bestätigen. Vielmehr zeigen die Ergebnisse von AIKAWA et al. (1995), NASRALLAH et al. (2003) und IDSO et al. (2002), dass die atmosphärischen Austauschverhältnisse eine eminent wichtige Rolle spielen, wie schon beim ruralen Tagesgang zu beobachten war. Bei den verschiedenen Ergebnissen aus Nagoya, Kuwait City und Phoenix ergibt sich das erste Höchstwert in der Zeit von 22-24 Uhr und stellt dabei die maximalen CO_2-Konzentrationen des Tagesgangs (vgl. Abb. 9). Nicht wie bei dem morgendlichen Höchstwert ist hier der abendliche Berufsverkehr nur indirekt zu erkennen, die Emissionen reichern sich in einer langsam sich stabilisierenden Atmosphäre an und ergeben gepaart mit den gestiegenen Hausbrand-Emissionen in der Abendzeit ein Maximum. Die meteorologischen Beobachtungen an den Standorten ergeben allerdings eine Veränderung der Windrichtung bzw. teilweise auch der Windgeschwindigkeit, wodurch Turbulenzen entstehen und der CO_2-Wert früher als erwartet wieder abnimmt. In diesen Umgebungen ist der morgendliche Höchstwert ein purer Effekt des konzentrierten Berufsverkehrs. Andere Ergebnisse wie von BERRY & COLLS (1990b) und GRIMMOND et al. (2002) können den abendlichen Berufsverkehr direkt zur gleichen Tageszeit am erhöhten CO_2-Wert bestimmen. Hier fällt dieses Maximum jedoch deutlich geringer aus und nach kurzfristiger Abnahme des CO_2-Gehalts reichert sich CO_2 ab den späten Abendstunden in wieder stabileren Verhältnissen an bis die Atmosphäre am frühen Morgen wieder durchmischt wird.

2.6.8 Annuelle Variationen des urbanen CO_2-Gehalts

Während eine Vielzahl von Arbeiten über Messungen in urbanen Räumen veröffentlicht wurde, sind Messzeiträume über ein ganzes Jahr bzw. mehrere Jahre seltener. Die Ergebnisse ähneln dem Jahresgang in ruralen Gebieten mit den niedrigsten Werten im

Spätsommer und den Höchstwerten kurz vor Einsetzen des Frühlings (z.B. AIKAWA et al. 1995, NASRALLAH 2002). Es ist gut zu beobachten, dass auch in urbanen Gebieten die Photosynthese bzw. Respiration eine Rolle spielt, wenngleich der dominierende Effekt der Jahresgang von Emissionen aus Kraftfahrzeugverkehr und privatem Hausbrand ist. In den Wintermonaten fällt die Heiztätigkeit sehr viel höher aus, private Kraftfahrzeuge sind im geringen Maße einer häufigeren Benutzung ausgesetzt und bei geringen Temperaturen tritt der Kaltstart von Automobilen auf. Eine typische Verteilung zeigt NASRALLAH et al. (2003) am Beispiel der Stadt Al-Jahra:

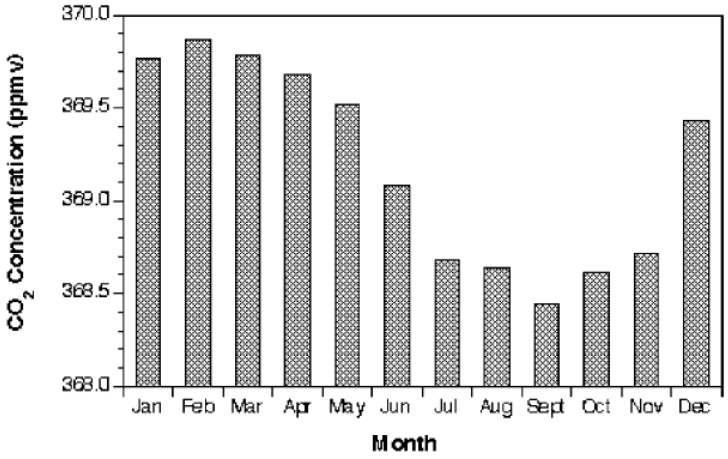


Abb.8: Durchschnittliche monatliche CO_2-Konzentrationen an einem urbanen Standort, Al-Jahra (NASRALLAH 2003)

Bei der Betrachtung des CO_2-Tagesgangs in Abhängigkeit der Jahreszeit lassen sich konträre Interpretationen in der Literatur finden. CLARKE & FAORO (1966) veröffentlichten bereits 1966 einen Vergleich des urbanen CO_2-Tagesgangs drei amerikanischer Städte zu drei verschiedenen Jahreszeiten. Hierbei fällt der CO_2-Tagesgang von Cincinnati im Sommer sehr ausgeprägt aus, während ein winterlicher Tagesgang in St.Louis sehr viel geringere Variationen aufweist. In diesem Fall steht die These, dass die in den Wintermonaten erhöhten Emissionen durch den Hausbrand einen erheblichen Einfluss haben, aber über den ganzen Tag verteilt auftreten und somit keine Schwankungen des CO_2 verursachen, während der Effekt des pflanzlichen Gaswechsels sehr viel geringer ausfällt (TAKAHASHI et al. 2001, ZIMNOCH et al. 2004). Allerdings existieren durchaus auch andere Ergebnisse. In AIKAWAS (1995) Verteilung der Tagesgänge über 12 Monate sieht man eher gegenteilige Effekte mit den ausgeprägtesten Tagesgängen im Januar/Februar. IDSO et al. (2002) zeigen in deren Auswertung der Messungen in Phoenix erstaunliche Ergebnisse, in denen besonders in den Nachtstunden die Amplitude wesentlich größer ausfällt im Zeitraum Dezember/Januar als zur Sommerzeit. Sie erklären dies mit wechselnden atmosphärischen Austauschverhältnissen und beziffert für seinen Standort die Chance auf Ausbildung von Inversionen im Winter sehr viel höher als im Sommer.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die CO_2-Konzentrationen in urbanen Gebieten standortabhängig doch sehr unterschiedlich ausfallen können. Verschiedene Emissionsspektren und verschiedene meteorologische Verhältnisse auf einen längeren

Zeitraum bezogen können hier ausschlaggebend sein, weshalb ein Vergleich von Städten mit ähnlichen Eigenschaften nahe liegt.

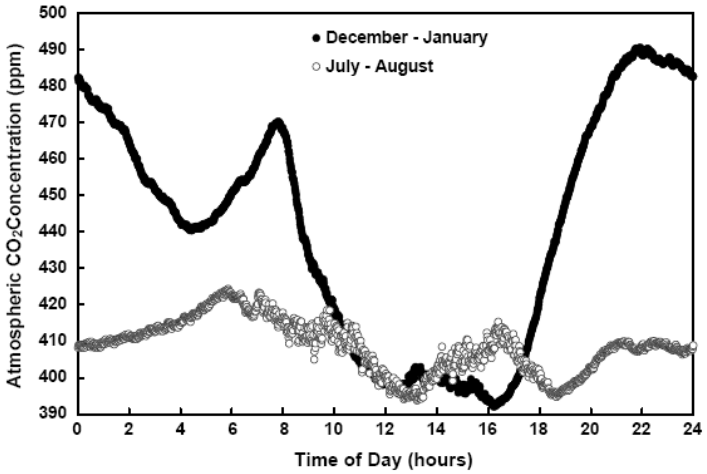


Abb. 9: Urbaner Tagesgang in Phoenix zu unterschiedlichen Jahreszeiten (IDSO et al. 2002)

2.6.9 Vergleich zwischen urbanen und ruralen Messergebnissen

Insgesamt gesehen haben die Tages- und Jahresgänge ruraler und urbaner Flächen viele Gemeinsamkeiten. Im Hinblick auf ein Jahr wird der geringere Effekt von Photosynthese und Respiration durch einen ausgeprägten Jahresgang der anthropogenen Emissionen ausgeglichen, sodass sich beide Verläufe gleichen, allerdings mit höheren CO_2-Werten in den Städten. Bei den verschiedenen CO_2-Tagesgängen kommt es doch zu größeren Unterschieden (urban mit 2 Maxima), allerdings wird der grobe Verlauf in beiden Bereichen durch die Schichtungsverhältnisse der Atmosphäre bestimmt, was auch zu einer Angleichung führt. BERRY & COLLS (1990a & b) haben diesen Vergleich genauer untersucht und kamen zu dem Ergebnis, dass die urbanen CO_2-Tagesmittel wie erwartet höher liegen, die urbanen CO_2-Nachtmittel jedoch geringer ausfielen als in der ruralen Vergleichsstation. Sie begründen dies mit dem städtischen Wärmeinseleffekt, der im Vergleich zum Umland etwas weniger stabile Verhältnisse in der Atmosphäre hervorrufen kann. Allerdings muss dies nur als eine Möglichkeit gesehen werden, OFFERLE et al. (2002) geben an, dass es in der Stadt sehr wohl zu solch stabilen Verhältnissen wie im ruralen Umland kommen kann, und bestimmte Messreihen zeigen höhere Werte im urbanen Raum sowohl zur Tages- als auch zur Nachtzeit an (IDSO et al. 2002, MARTIN & STABLER 2000).

3 Materialien und Methoden – Aufbau der CO_2-Messstation

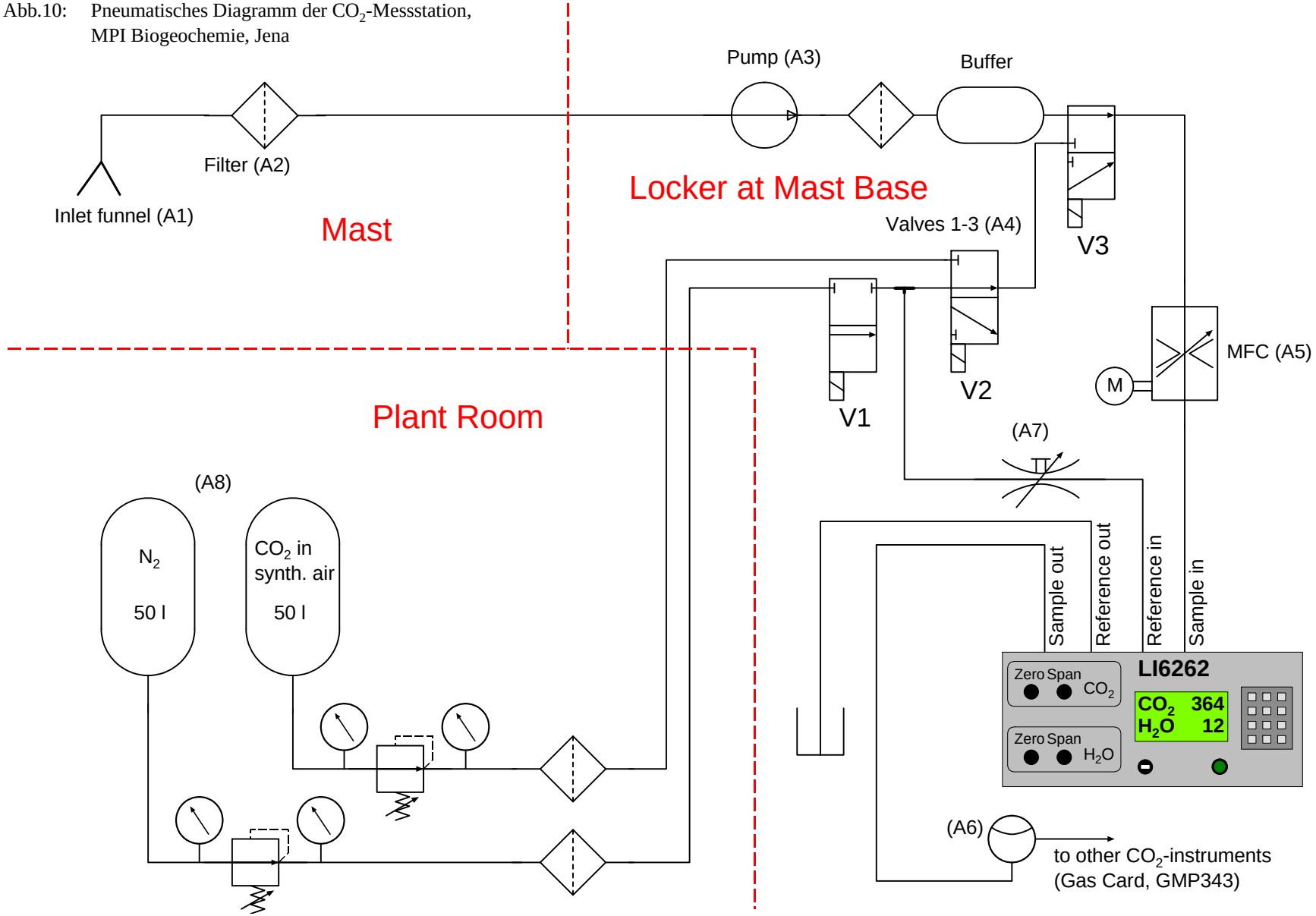
3.1 Allgemeine Erläuterung des pneumatischen Aufbaus:

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Konstruktion einer vollautomatischen CO_2-Messstation mit einem selbst regulierenden Kalibrierzyklus. Dia Daten sollen alle 10 Minuten aktualisiert auf der Website http://www.bgc-jena.mpg.de/wetter in numerischer und graphischer Form einzulesen sein. Der einzige manuelle Eingriff soll der nach gewisser Zeit benötigte Austausch der Filter und der Kalibriergase sein.

Das „Herzstück“ des pneumatischen Aufbaus bilden die Platine und der Gas-Analysator LI-6262, die auf zwei Schubfächern im Schrank auf dem Dach des MPI Biogeochemie, Jena platziert sind. Zu diesem internen System führen drei Eingänge, einmal die Verbindung mit dem Einlasstrichter zur Messung der CO_2-Konzentration der Außenluft sowie die beiden Verbindungen zu den Kalibriergasen, welche eine Etage tiefer angebracht sind. Da in diesem Aufbau die absolute Messmethode bei dem Gas-Analysator LI-6262 verwendet wird, steht als erstes Kalibriergas Stickstoff zur Verfügung, welches die CO_2-Konzentration von 0 ppm repräsentiert. Das zweite Kalibriergas (synthetische Luft) weist eine momentane Konzentration von 408,15 ppm CO_2 auf, es kann allerdings auch leicht abweichende Konzentration genommen werden (muss allerdings im Programm angegeben sein). Gleichzeitig wird das N_2-Gas zur Spülung der Referenzzelle im LI-6262 benutzt, daher wird der Fluss durch ein T-Stück geteilt. Das Feinstregulierventil in Verbindung mit Paraffin-Öl in einem Behälter am Ausgang der Referenzzelle sichert einen geregelten Fluss des N_2-Gases.

Da das System über drei Eingänge verfügt, zu jedem beliebigen Zeitpunkt jedoch nur ein Fluss in den Sample-Eingang des LI-6262 stößt, sind drei Magnetventile (V1-V3) auf der Platine angebracht, die in Kombination bestimmen welches Gas das System durchströmt. Die Kombination wird zu jeden Zeitpunkt vom Datenlogger vorgegeben. Vor dem Sample-Eingang des LI-6262 ist zudem ein Massendurchflussregler, der einen konstanten Fluss der drei verschiedenen Gase garantiert. An den Kalibriergasen sind Druckregulatoren befestigt um den Druck zu reduzieren und konstant zu halten, der Druck wird dadurch auf ca. 1-1,5 bar eingestellt. Die Außenluft wird mit einer bürstenlosen Pumpe (Modell 811) angesaugt. Der eingestellte Fluss im Massendurchflussregler ist mit der Leistung dieser Pumpe abgestimmt, so dass auch in diesem Fall kein Überdruck entsteht. Überdruck würde sich ab einem bestimmten Wert negativ auf den Massendurchflussregler auswirken. Der installierte Schwebedurchflussmesser dient der visuellen Kontrolle des Durchflusses vor Ort. Der Gas-Analysator LI-6262 an sich stellt nun die Ein-und Ausgänge für den Reference- und Sample-Fluss und ermöglicht auch eine manuelle Kalibrierung via Potentiometer falls eventueller Bedarf vorhanden ist. Der Sample-Ausgang kann im Generellen dazu verwendet werden weitere Messgeräte an das System anzuschließen, wie andere CO_2-Sensoren (Gascard, Vaisala)

Abb.10: Pneumatisches Diagramm der CO_2-Messstation, MPI Biogeochemie, Jena



3.1.1 Beschreibung der einzelnen Teile im pneumatischen Diagramm

A1: Einlasstrichter:
Der Einlass ist auf dem Dach des MPI Biogeochemie, Jena konstruiert. Hier befindet sich ein ca. 10 Meter hoher Mast an dem verschiedene Messgeräte für die MPI-Wetterstation angebracht sind, wie zum Beispiel: Windfahne, Thermometer, Barometer, etc. Der Einlass ist in 10 Meter Höhe angebracht und wird per Decabon-Schlauch (1/4“) zum Schrank auf dem Dach geführt. Die Konstruktion sieht einen Einlassfilter vor, der wiederum mit einem PTFE Filter verbunden (direkt nach dem Einlass) ist und dann zum Schrank geführt wird. Eine kleine Metallplatte dient als Anbringung an den Mast sowie als Verbindung, da durch diese spezielle Konstruktion die Filter sehr leicht ausgetauscht werden können.

A2: PTFE Filter:
Die Filter werden mehrfach in dieser Konstruktion eingesetzt, nach dem Einlass, nach den Gasflaschen und vor dem Mass Flow Controller. Es sind polypropylene Filter, welche PTFE Filter Elemente benutzen mit einer Porengröße von 1µm. Zu den Merkmalen gehören sehr gute Partikelfilterung, niedrige Wassersorption, geringer Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit und kleine interne Volumina. Die Filter gelten als optimale Ergänzung zu dem in diesem Aufbau eingesetzten Gas-Analysator LI-6262. Die Filter benötigen von Zeit zu Zeit eine Kontrolle um den Grad der Verschmutzung zu bestimmen und einen eventuellen Austausch vorzunehmen. Allerdings sind alle Filter so angebracht, dass dies relativ einfach und nicht zeitaufwendig geschehen kann (PTFE Filter-Operating Instructions 2001).

A3: Mini-Membran Vakuumpumpe (N811):
Im Pumpenkopf werden durch eine ständige Auf- und Abbewegung der Membran in Kombination mit gasgesteuerten Ein- und Auslassventilen Gase durch den Einlasstrichter angesaugt. Für die Leistung einer Membranvakuumpumpe sind folgende Faktoren wichtig: Das Verdichtungsverhältnis (Verhältnis Schöpfraum zu Totraumvolumen), das Hubraum- und Totraumvolumen innerhalb des Pumpenkopfes, sowie die Drehzahl der Pumpe. Das verwendete Modell liefert eine Durchflussgeschwindigkeit von ca. 3,5 l/min, welches durch den Widerstand von Filtern und Verbindungsschlauch etwas geringer als die Originalleistung ausfällt. Das Modell ist eine bürstenlose Variante, wodurch die Lebensdauer merklich erhöht wird (Neuberger N811 K-Betriebsanleitung 2002).

A4: Magnetventile:
Ein Magnetventil ist ein Ventil, das von einem Elektromagneten betätigt wird. Abhängig von der Bauart kann ein Magnetventil sehr schnell schalten, es kann eine Schaltfrequenz von mehreren kHz erreicht werden. Im Industriebereich, wo Magnetventile bis etwa 80VA Leistungsaufnahme gängig sind, gibt es einen sehr großen Anwendungsbereich in der Hydraulik und Pneumatik. In dem pneumatischen Aufbau auf der Platine kommen ein 2/2-Wege-Ventil (V1) und zwei 3/2-Wege-Ventile (V2 und V3) zum Einsatz, alle mit 24 V (DC) betrieben (BC-Systemtechnik-Ventil-Steuerfunktionen 2006).

A5: Massendurchflussregler:

Auf der Platine installiert ist das Modell Bronckhorst El-Flow F-201C. Hierbei handelt es sich um einen digitalen Massendurchflussregler, welcher auf einer digitalen Platine basiert, auf der das Messsignal des Sensors einem Mikroprozessor zugeführt wird. Dies erhöht die Signalstabilität und Messgenauigkeit. Der Controller ist mit einem Selbstdiagnoseprogramm ausgerüstet sowie einem Warnsignal falls die Messung bzw. Regelung nicht normal funktioniert. Der Controller wendet das thermische Messprinzip an. Bei einem Fluss durch den Sensor wird dieser durch die Heizung R_H erwärmt. Dadurch entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen T_1 und T_2, welche direkt proportional zu dem Massendurchfluss ist. Elektrisch stellen sich die Temperaturen T_1 und T_2 als Widerstände R_{T1} und R_{T2} dar, welche zu elektrischen Ausgangssignalen verarbeitet werden können. Das Ausgangssignal wird nun ständig mit dem Sollwertsignal (vom angeschlossenen Regler vorgegeben) verglichen und bei einer Abweichung angepasst bis beide Signale wieder übereinstimmen. Das Sollwertsignal wird von dem Logger CR10X über einen Widerstandsregler zugeführt (Bronkhorst-Instruction Manual 2002).

A6: Schwebekörperdurchflussmesser:
In einem senkrechten, sich nach oben konisch erweiternden Messrohr wirken auf einen Schwebekörper folgende Kräfte: die Gewichtskraft (nach unten), die Auftriebskraft (nach oben) und die Kraft des strömenden Mediums (nach oben). Die Kraft des strömenden Mediums auf den Auftriebskörper wird durch den Widerstandsbeiwert (c_f-Wert) bestimmt, der wiederum von der Form des Schwebekörpers und von der *Reynolds*-Zahl (und damit von vom freien Strömungsquerschnitt und von der Strömungsgeschwindigkeit, also von der Lage des Körpers im konischen Messrohr) abhängt. Der Durchfluss ist somit mit der Lagehöhe des Schwebekörpers direkt proportional und lässt sich somit von der Anzeige ablesen. Der Durchflussmesser ist hinter dem Ausgang des LI-6262 angebracht (BIERWERTH 2007).

A7: Feinstregulierventil:
Das Feinstregulierventil ist im Fluss des Referenzgases angebracht bevor die Referenzzelle des LI-6262 gespült wird. Es handelt sich hierbei um eine Verbindung, in welcher per Potentiometer der Durchfluss reguliert werden kann. Zur Kontrolle dient ein Behälter mit Paraffin-Öl, dieses ist verbunden mit dem Reference Out-Anschlusses des LI-6262.

A8: Kalibriergase:
Zur Kalibrierung, die täglich um 0:00 Uhr durchgeführt wird (detaillierte Beschreibung in Absatz **3.4.2**) dienen zwei verschiedene Gase, die in Gasflaschen ein Stockwerk unter dem Dach angebracht sind. Es handelt sich hierbei um Stickstoff, dass als Kalibriergas mit CO_2-Konzentration von 0 ppm dient, und synthetische Luft mit einer Konzentration von 408,15 ppm. Die synthetische Luft (408,15 ppm) kann gegebenfalls ausgetauscht werden, die neue Konzentration muss dann allerdings dem Data Logger CR10X übermittelt werden. An beide Gasflaschen sind Druckregulatoren angebracht, welche den weitaus höheren Druck der Gasflasche auf ca. 1-1,5 bar reduzieren. Wichtig ist hierbei, dass die Schraubstellen mit Teflon-Band umwickelt sind um eine bessere Dichtung zu erzeugen. Von den Druckregulatoren werden die Gase wiederum über den DeCabon-Schlauch zum Schrank auf dem Dach geleitet. In dieser Verbindung sind wieder Filter eingebaut, wo der Einsatz

von Teflon-Band beachtet werden muss. In dem Schrank selbst geschieht ein Übergang (mit Verbindern) auf den Bev-A-Line Schlauch vor der eigentlichen Verbindung mit der Platine. Der Bev-A-Line Schlauch garantiert eine höhere Flexibilität, wenn das Schubfach mit der Platine herausgefahren wird.

3.2 Der Gas-Analysator LI-6262

In dieser Messstation wird ein Gas-Analysator der amerikanischen Firma „Li-Cor" verwendet (Typ LI-6262), welches als Standard in vielen Labor- und Freilandmessungen genutzt wird. Der LI-6262 basiert auf der NDIR-Messmethode (Nicht-Dispersive Infrarot). Er operiert mit einer Sample- und einer Referenzzelle und verwendet hierbei das differentielle Messprinzip. Die Infrarot-Quelle wird über einen separaten optischen Feedback-Kreislauf auf 1250 K stabilisiert und ist auf eine Lebensdauer von über 10000 Stunden ausgelegt. Die Strahlung wird durch eine mit 500 Hz rotierende Modulier-Scheibe („Chopping shutter disc") ausgestrahlt und trifft auf die Referenz- und Samplezelle, deren Vergoldung zu einer höheren IR-Reflektion führt. Diese Infrarot-Strahlung wird durch einen dichromatischen Strahlteiler getrennt und zu zwei verschiedenen Bleiselenid-Detektoren geführt welche ein H_2O-Signal und ein CO_2-Signal erzeugen. Beide Detektoren werden durch thermoelektrische Kühler auf -5 ºC stabilisiert. Optische Filter garantieren ein Spektrum, dass auf bestimmte Rotationsbanden eingestellt ist:

CO_2-Detektor: 150 nm Bandpass bei 4,26 µm
H_2O-Detektor: 50 nm Bandpass bei 2,59 µm

Das ausgegebene Signal kann nun auf eine spezifische Molfraktion für H_2O bzw. CO_2 umgewandelt werden und erscheint auf dem Display.

Grundsätzlich gilt, dass die Referenzelle von einem Gas mit bekannter Konzentration und die Samplezelle von einem Gas mit unbekannter Konzentration durchströmt werden (Ausnahme: Kalibrier-Modus). Der Detektor gibt somit ein Differenz-Signal aus, dass auf der Absorption der IR-Strahlung in diesen beiden Zellen basiert. Bei der CO2-Messung ist die Unterscheidung zwischen einem absoluten und differentiellen Modus wichtig, in Abhängigkeit von der CO_2-Konzentration des Gases in der Referenzelle. Im absoluten Modus wird eine CO_2-Konzentration von 0 ppm verwendet, typischerweise in Form von Stickstoff. Somit folgt eine Berechnung der Molfraktion ausgehend von dem Ereignis, dass keine Absorption in den gesuchten Rotationsbanden in der Referenzzelle stattgefunden hat. Den differentiellen Modus könnte man als noch exaktere Methode bezeichnen. Es wird ein Referenzgas ähnlicher Konzentration verwendet und die nun aus zwei Absorptionsereignissen gebildete differentielle Molfraktion erhöht im geringen Maße die Messgenauigkeit.

Das Gerät-spezifische Rauschen von CO_2-Konzentration bewegt sich im Bereich von 0,3 – 1 ppm, abhängig von der zeitlich gesteuerten Signalausgabe von 0,1 – 1 s (LI-6262 Manual 1996).

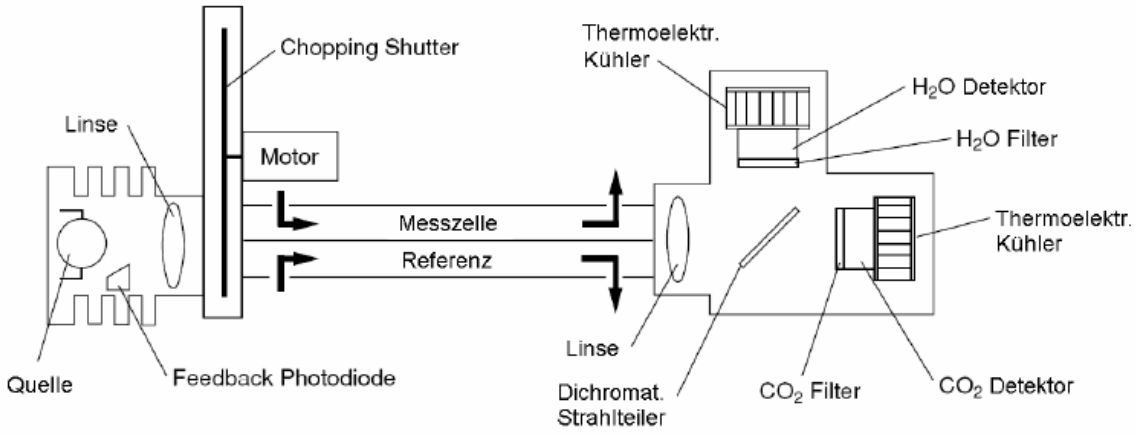


Abb. 11: Prinzipskizze des LI-6262 Gas-Analysators (LI-6262 Manual, 1996)

3.2.1 NDIR-Messmethode

Wie in vielen anderen CO_2-Messgeräten auch wird im Gas-Analysator LI-6262 das „non dispersive infrared" Messprinzip verwendet (nichtdispersive Infrarot- Messung).

Die Bezeichnung „nichtdispersiv" besagt, dass in dieser Methode kein spektral zerlegtes Licht genutzt wird. Stattdessen werden Dioden aus dem Infrarotbereich oder temperaturstabilisierte, glühende Metallplättchen verwendet, deren Emissionsspektren mit Filtern auf die gewünschten Bereiche eingegrenzt werden können. Dieses auf einen bestimmten Bereich gefilterte Licht trifft nun auf die Messzelle, welche von dem zu untersuchendem Gas durchströmt wird, und wird darauffolgend von einem Detektor analysiert. Das sich in der Messzelle befindende Gas absorbiert dabei in Substanz-spezifischer Weise bestimmte Anteile (Wellenlängenbereich) der Infrarot-Strahlung. Das Ausmaß dieser Absorption ist ein Maß für die Konzentration der jeweiligen Gas-Komponente. Der Detektor operiert mit einem optischen Filter, welcher alle Wellenlängen der IR-Strahlung eliminiert außer dem Wert, den das ausgesuchte Gas absorbieren kann. In diesem Fall der CO_2-Messung handelt es sich um einen 150 nm „bandpass" optischen Filter, der auf die Rotationsbanden des CO_2-Moleküls von 4,26 µm optimiert ist. Die Absorption wirkt negativ korrelierend auf die Signalstärke im Detektor, die durch Berechnung auf die Konzentration des Gases übersetzt werden kann. Je geringer das Signal, desto höher die Konzentration des Gases. Für rauschärmere Messungen wird die Lock-In-Technik verwendet, welches durch eine zeitliche Modulation des Emitters erreicht wird (LI-6262 Manual 1996), (WINDERLICH 2007).

3.2.2 Interne Kalibrierung des LI-6262

Wichtig bei der Berechnung der Molfraktion im absolutem sowie im differentiellen Modus ist die interne Kalibrierung. Sie verwendet einen bestimmten Faktor F, der aus der bereits durchgeführten „Factory Calibration" entnommen wird. Dieser Faktor wandelt die vorher nicht-lineare Funktion in ein lineares, digitales Signal um. Für die CO_2-Konzentration wird hierbei ein Polynom fünften Grades verwendet (H_2O: Polynom dritten Grades). Dieser stellt sich unter Berücksichtigung des jeweiligen Detektor-Outputs V wie folgt dar:

$$(1) \qquad F(V) = a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + a_4V^4 + a_5V^5$$

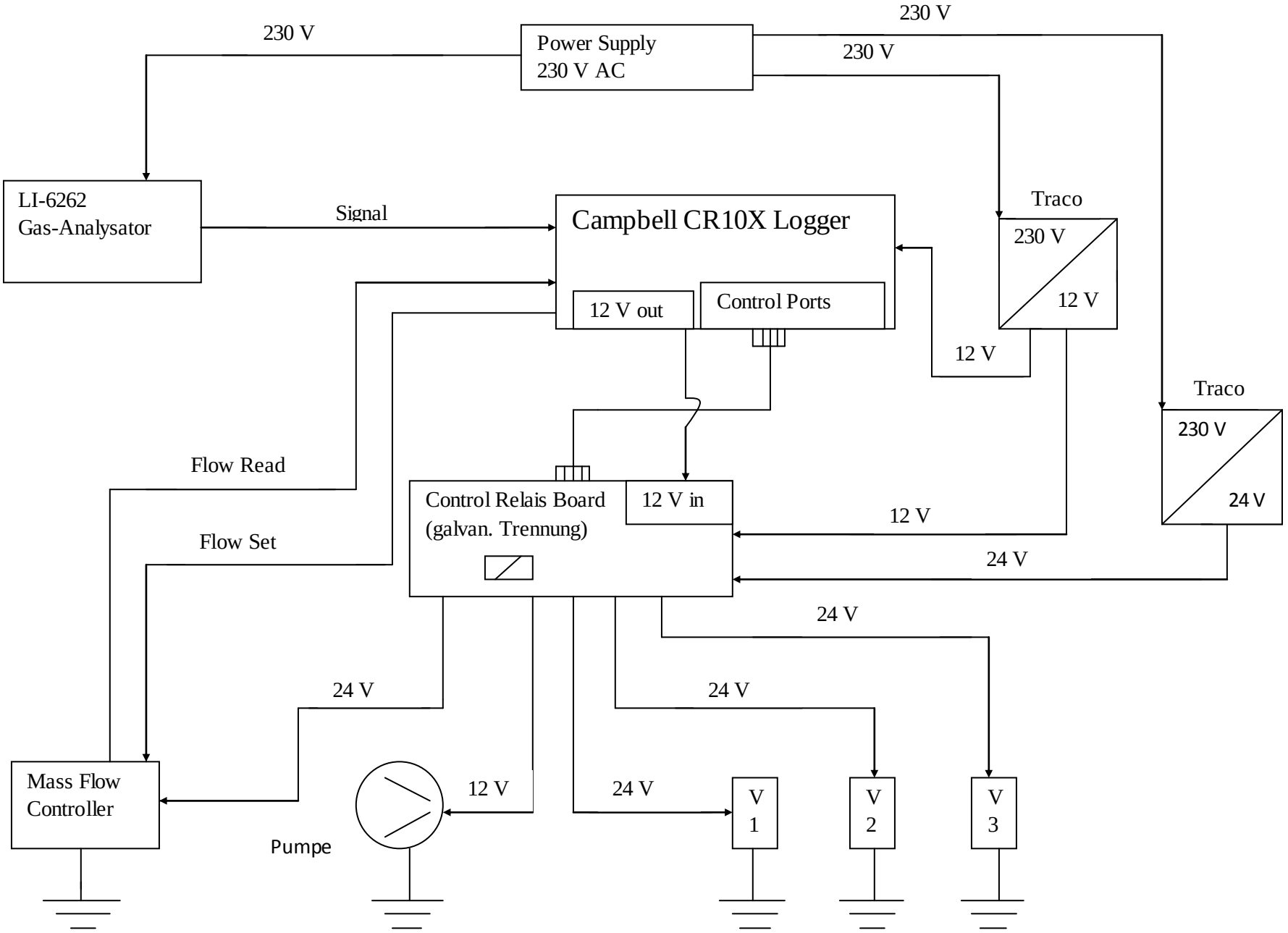
Mit Hilfe der fünf Koeffizienten a1-a5 kann nun die interne Kalibrierung für jedes beliebige Signal vom Detektor durchgeführt werden und der Faktor F errechnet werden.

In der „Factory Calibration“ werden 13 Gase verschiedener CO_2-Konzentrationen verwendet, welche für eine hohe Präzision stehen. Auf diese Weise wird der Kalibrierungs-Polynom bestimmt, der für jedes Gerät verschieden ist. Diese Kalibrierung wird bei drei genau kontrollierten Temperaturen durchgeführt und resultiert in einem Gerät-spezifischen Messbereich von 0 ppm bis 3000 ppm. Die „Factory Calibration“ unterliegt den Standards des amerikanischen NIST (National Institute of Standards and Technology), (LI-6262 Manual 1996).

3.3 Das elektrische Schaltdiagramm

Alle elektrischen Anschlüsse werden mit 230V (AC), 12V (DC) oder 24V (DC) betrieben. Der 230V (AC)-Anschluss versorgt die beiden Traco-Wandler sowie das LI-6262. Der 12V-Wandler versorgt den Datenlogger CR10X sowie das Control Relais Board. Die Pumpe ist an einen externen 12V-Wandler angeschlossen, da ansonsten die Stromstärke nicht ausreichen würde. Der 24V-Wandler ist hauptsächlich für die Magnetventile zuständig sowie für den Massendurchflussregler. Der Datenlogger ist dafür vorgesehen, die Signale des Massendurchflussreglers („Read Flow“) und des LI-6262 einzulesen und zu speichern. Weiterhin führt er die Befehle des gespeicherten Programms (Edlog) aus, welches wiederum die Relais auf dem Control Relais Board sowie einen zweiten Datenlogger CR510 ansteuert. Der Datenlogger CR510 liest ebenfalls ein Signal vom LI-6262 ein, ist aber auf ein geringeres Mittelungsintervall programmiert. Außerdem ist an den 5V-Ausgang des CR10X ein Widerstandsregler angebracht, womit manuell der Fluss durch den Massendurchflussregler bestimmt werden kann („Set Flow“). Auf dem Control Relais Board sind in diesem Aufbau fünf elektromechanische Relais in Funktion. Drei Relais bestimmen das jeweilige Öffnen bzw. die Richtung der Magnetventile. Ein Relais schaltet die Pumpe an und ein Relais bestimmt die Funktion des Massendurchflussreglers. Dieses Relais schaltet ein zweites Relais, welches die Verbindung („Set Flow“) zwischen 5V-Ausgang vom CR10X und dem Massendurchflussregler herstellt bzw. trennt. Bei den drei +/- Verbindungen zu den Magnetventilen sind Schutzdioden integriert, welche die mögliche induzierte Spannung soweit reduzieren, dass die Ventile keinen Schaden nehmen. Darüber hinaus sind drei Sicherungen eingebaut bei der Versorgung des Massendurchflussreglers, der Pumpe, dem 12 V-Wandler sowie dem Control Relais Board. Der Gasentladungsableiter Hensel FZ 26, der vor der Erdung eingebaut ist, ist verbunden mit der Gleichspannungsmasse und dient zur Sicherheit. Ein Durchbruch wäre erst ab 90 V zu erwarten.

Abbildung 12: Vereinfachtes elektrisches Schaltdiagramm der CO_2-Messstation, MPI Biogeochemie, Jena



3.4 Der Datenlogger CR10X

Allgemein versteht man unter einem Datenlogger ein Messgerät, welches physikalische Messdaten über eine bestimmte Zeit hinweg erfassen kann (z. B. Temperaturen, Spannungen etc.). Das so genannte Herzstück eines Datenloggers ist ein programmierbarer Mikroprozessor, welcher die erfassten Daten mit Hilfe des eingespeisten Programms (in diesem Fall Edlog) bearbeitet und ausgibt. Darüber hinaus besitzt ein Logger ein Speichermedium, ein oder mehrere Schnittstellen sowie mehrere Kanäle zum Anschluss der Sensoren. Die über den Sensor erfassten Messdaten können durch einen Analog-Digital-Umsetzer umgewandelt und auf dem zugehörigen Speichermedium (CR10X: Festplatte) gespeichert werden („Final Storage“). Durch diese Art von Speicherung kann einem Datenverlust durch beispielsweise unzureichende Stromversorgung vorgebeugt werden. Die erfassten Daten können über eine Schnittstelle ausgelesen werden (CR10X: serielle Schnittstelle) und werden anschließend mit geeigneter Software ausgewertet (Programm PC208W). PC208W ist ebenfalls für den Transfer des Edlog-Programms via der seriellen Schnittstelle zuständig, wodurch der Datenlogger für seinen Einsatz konfiguriert wird bzw. seine Befehle erhält. Der Datenlogger wird über eine 12V-Spannung versorgt, er ist allerdings auch in der Lage, Strom zu liefern (über 5V-Ausgänge, „Excitation“-Ausgänge). Andere Eigenschaften sind eine relativ hohe Robustheit bzw. Langzeitstabilität, sowie einer Temperaturbeständigkeit bis zu einem bestimmten Grade. Darüberhinaus verfügt er über standardisierte Ein- und Ausgänge und besitzt parametrierbare Eingänge. Ebenfalls besteht die Möglichkeit einer Fernabfrage (z.B. Modem, GSM-Telefon), (Campbell CR10X-Instruction Manual 2000).

3.4.1 Erläuterung des Edlog-Programms:

Es sollte ein Edlog-Programm geschrieben werden, dass problemlos in das existierende Programm auf dem Datenlogger CR10X integriert werden kann. Hierfür ist von hoher Bedeutung, dass die Sampling Rate von 10 s und das Mittelungsintervall von 10 min übernommen werden. In diesem Programm werden 4 Flags (0,1,5,6) verwendet. Sie sind als sogenannter Trigger für eine bestimmte Aktion zu verstehen, die erst wieder beendet wird, wenn man den Flag auf 0 heruntersetzt. In diesem Fall ist der Flag 0 wie immer die Output Flag. Hochsetzen dieses Flags bedeutet, dass Daten an die „Final Storage Area“ des Loggers ausgegeben werden. Diese speichert die endgültigen Daten, die z.B. über einen Computer abgerufen werden können. Flag 1 steht für Beginn und Ende des Programms. Flag 5 und 6 haben ihre Funktion in Zusammenhang mit der Kalibrierung, wobei Flag 5 für Beginn und Ende der Kalibrierung steht und Flag 6 eine manuelle Initiierung zum nächstmöglichen Zeitpunkt bedeutet, was über ein Keyboard oder den Computer geschehen kann. Insgesamt sind fünf Control Ports vergeben, die dem zugehörigen Teil Stromzufuhr leisten können. Im Falle der Pumpe und Massendurchflussregler ist das die Inbetriebnahme, bei den Magnetventilen wird die jeweilige Öffnung bestimmt. Ein weiterer Control Port sendet ein Signal zu dem zweiten Datenlogger CR510 (Start des Kalibrierzyklus), der mit einem geringeren Mittelungsintervall operiert.

Außerhalb des Kalibrierzyklus ist das Programm relativ simpel geschrieben. Es ist ein bestimmtes Ausführungsintervall („Execution Interval“) gegeben, welches mit der

Sampling Rate übereinstimmt und vorgibt, dass alle 10 Sekunden ein Wert gemessen wird. Gemessen wird die ausgegebene Spannung (als digitales, lineares Signal) vom LI-6262, die über einen Multiplikationsfaktor in einen ppm-Wert übertragen wird. Darüber hinaus wird der Massendurchfluss gemessen, wo die Konversion von Volt auf l/min ebenfalls durch einen Multiplikationsfaktor geschieht. Alle 10 Minuten wird die Output Flag hochgesetzt und über den „Average"-Befehl werden dann die über 10 Minuten gemittelten Messwerte an den Computer übertragen (in die DAT-Datei geschrieben). Die Konfiguration der Control Ports bleibt konstant über den Messzeitraum, das bedeutet, die Pumpe und der Massendurchflussregler sind in Betrieb und die Magnetventile in gewünschter Konfiguration.

Mit dem Hochsetzen der Flag 5 zu einem bestimmten Zeitpunkt (um 24:00 Uhr) wird die Kalibrierung gestartet und die Programmierung gestaltet sich etwas komplizierter. In den fünf Minuten durchlaufen die Samplezelle drei verschiedene Gase. Dies zieht drei verschiedene Konfigurationen der Control Ports nach 0,2 und 4 Minuten nach sich. In den ersten zwei Minuten wird die Samplezelle von Stickstoff (CO_2: 0ppm) durchlaufen. Mit dem „Running Average"- Befehl kann der Mittelwert der zweiten Minute gespeichert werden und somit eventuelle Verfälschungen während der Spülung eliminiert werden. Die gleiche Prozedur wird für das CO_2-Gas (synth. Luft, 408,15 ppm) angewendet, wiederum mit der Speicherung des Mittelwerts. Diese Mittelwerte können nun zur Berechnung der Slope und Offset-Werte genutzt werden wie in Absatz **3.4.2** beschrieben, im Programm dargestellt als einfache Rechenbefehle. Ab Minute 4 der Kalibrierung kommt wieder die Standard-Konfiguration der Control Ports zum Tragen und nach einer Minute Spülung der Samplezelle werden die Messwerte wieder kontinuierlich bestimmt. Die Slope und Offset-Werte der Kalibrierung werden nun durch einfache Rechenbefehle benutzt um den korrigierten CO_2-Wert darzustellen, nach dem beschriebenen Rechenweg in Kapitel **3.4.2**.

Die finale Ausgabe an die DAT-Datei besteht nun aus den üblichen Variablen ID, Jahr, Tag, Stunde und Minuten sowie den zugeteilten Werten aus der Final Storage Area, der echte gemessene CO_2-Wert, der korrigierte CO_2-Wert, die Slope- und Offset-Werte und der Massendurchfluss.

3.4.2 Kalibrier-Zyklus

In diesem Aufbau wird eine Kalibrierung einmal pro Tag um 24:00 Uhr unter Verwendung der beiden Kalibriergase mit CO_2-Konzentrationen von 0 ppm (N_2) und 408,15 ppm durchgeführt. Dies ist keine direkte Kalibrierung des Gas-Analysators LI-6262, dieser unterläuft einer internen Kalibrierung (**3.2.2**) und kann auch manuell über die Potentiometer kalibriert werden. Bei der täglichen Kalibrierung handelt es sich um eine Funktion des Datenloggers, der das gespeicherte Programm ausführt, bestimmte Korrekturwerte erhält und damit eine Korrektur an den einzelnen Messwerten vornimmt, die wiederum dann auf der Website einzulesen sind.

Da die Mittelungsintervalle auf 10 Minuten eingestellt sind, kann um 24:00 Uhr für 5 Minuten kalibriert werden ohne dass ein Messwert verloren geht. Ein Mittelungsintervall bezieht sich somit auf die restlichen 5 Minuten. Die eigentlichen Messwerte der

Kalibrierung beziehen sich auf jeweils eine Minute mit Stickstoff und eine Minute mit CO_2-Gas mit 408,15 ppm. Die restlichen drei Minuten des Zyklus werden für die Spülung der Samplezelle gebraucht, da ansonsten der Messwert verfälscht wäre. Da man zwei Gase bekannter Konzentration betrachtet, kann man eine lineare Funktion erstellen, wo der Messwert (auch Istwert) die Funktion von bekannter Konzentration (auch Sollwert) ist: In graphischer Form wird die y-Achse zum Istwert und die x-Achse zum Sollwert. Die gemessenen Werte der beiden Kalibriergase ergeben nun eine lineare Funktion mit einer bestimmten Steigung m (Slope) und einem bestimmten Achsenabschnitts c (Offset). Dabei handelt es sich Korrekturwerte, die von dem Programm verwendet werden um jeden einzelnen gemessenen CO2-Wert der Außenluft zu korrigieren. Ein solcher gemessener Wert wäre in dieser Funktion ein Istwert und kann in die Gleichung eingesetzt werden. Der Sollwert (x) kann nun errechnet werden und ergibt den tatsächlichen CO2-Gehalt der Außenluft. Da die Kalibrierung täglich erfolgt, sollten sich nur geringfügige Unterschiede in den Korrekturwerten ergeben und die Funktionalität kann somit leicht kontrolliert werden.

Auf Abbildung 13 ist die lineare Funktion dargestellt, die sich aus den Messwerten der zwei Kalibriergase ergibt. Der Sollwert beträt für Stickstoff 0 ppm und für das zweite Kalibriergas die bekannte CO_2-Konzentration (CO_2_soll). Der Istwert von Stickstoff ist der sogenannte gemessene „Offset“ von 0 abweichend (Offset), der Istwert des zweiten Kalibriergas ist die gemessene CO_2-Konzentration des Gases (CO_2_ist).

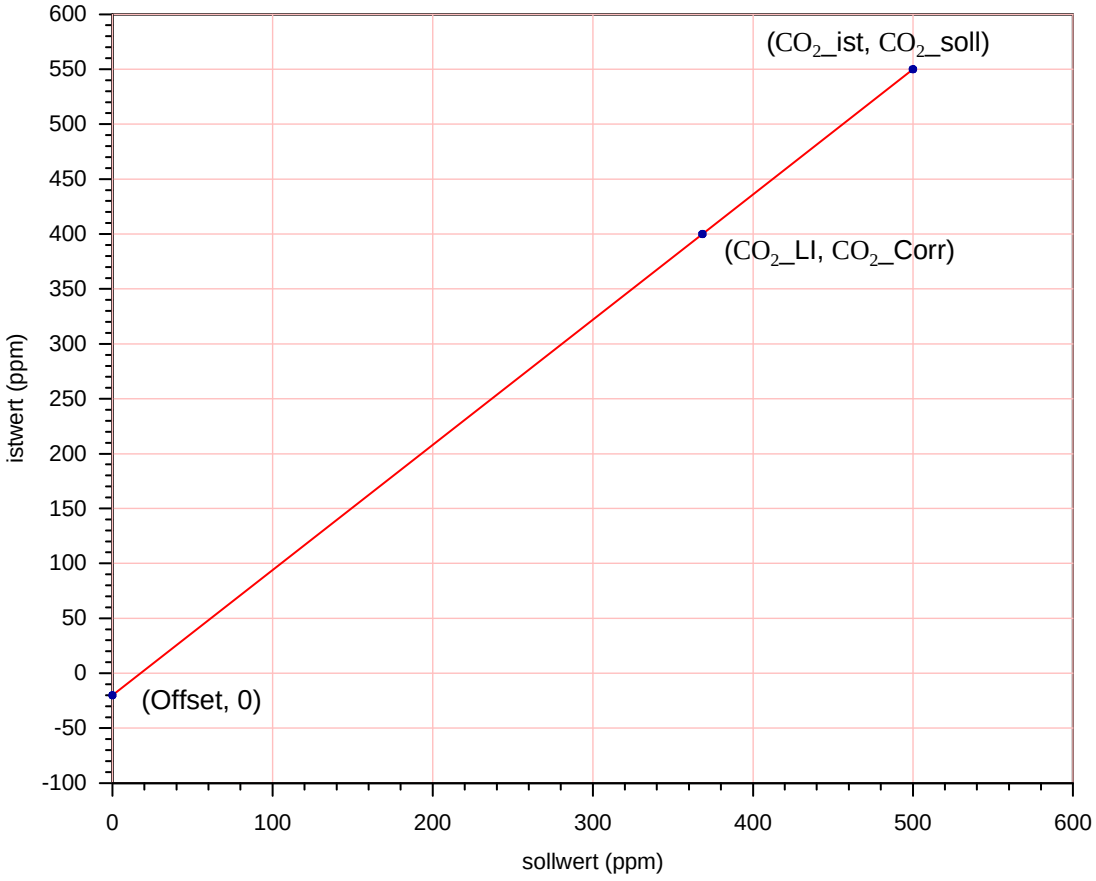


Abb. 13: Darstellung der linearen Funktion ausgehend von den Messwerten der beiden Kalibriergase

Da man 4 bekannte Werte der linearen Funktion bestimmt hat, kann man die Steigung m errechnen:

$$(2) \qquad m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{(CO_2_ist) - (offset)}{(CO_2_soll) - 0}$$

Die lineare Funktion f(x)=y heißt daher:

$$(3) \qquad y = mx + c = (\frac{(CO_2_ist) - (offset)}{(CO_2_soll)})x + (offset)$$

Folglich ergeben sich aus den Messungen mit den beiden Kalibriergasen sogenannte Korrekturwerte als [Offset] und [Slope] mit denen die lineare Funktion definiert ist. Anhand dieser Werte kann nun für jeden gemessenen Wert (CO_2_LI) der Außenluft ein korrigierter Wert (CO_2_corr) errechnet werden, indem man einfach in die Funktion einsetzt. Für [CO_2_corr] ergibt sich also:

$$(4) \qquad CO_2_LI = m(CO_2_corr) + c \rightarrow CO_2_corr = \frac{(CO_2_LI) - c}{m},$$

wobei c=[offset] und m nach (2) berechnet wird.

3.5 Der Weg zur Website

Der Abruf der Daten des Datenloggers CR10X passiert über ein Modem, das mit einem Computer in der Freilandabteilung des MPIs kommuniziert. Dieses geschieht in einem 10-minütigem Intervall um möglichst aktuelle Daten auf der Website darzustellen. Der Logger übermittelt die Daten aus seiner Final Storage Area via dem Programm PC208W in einen DAT-File, welcher aus einer einfachen Auflistung der Daten von jedem Zeitschritt besteht, in chronologischer Abfolge. Wichtig ist, dass der Logger vor Inbetriebnahme so konfiguriert ist, dass jede Zeile die Reihenfolge Jahr, Tag, Stunden, Minuten, Sekunden und die Daten aus der jeweiligen zugeteilten Final Storage Location enthält. Diese Rohdaten in Form eines DAT-Files können nun mit einem Control-File (Endung: CTL) konvertiert werden, der reale Einheiten enthält, additionale Variablen berechnet und bestimmte Limits setzen kann. Man benutzt dafür das Konvertierungs-Programm CSLOGGEN mit folgender Benutzeroberfläche.

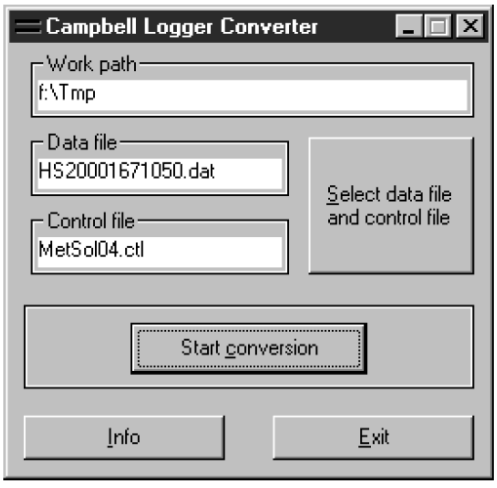


Abb. 14: Benutzeroberfläche von des Konvertierungs-Programms CSLOGGEN (KOLLE 2007)

Der Control-File besteht aus verschiedenen Sektionen, in denen Angaben zur Handhabung der Daten gemacht werden, die dann in einem Output-File einzulesen sind. Diese Sektionen belaufen sich auf [Number of Variables], [Missing Value], [Headers Line], [Declarations], [Functions] und [Formats]:

> [Number of Variables]: wie viele Variablen des Datensatzes in dem Output-File enthalten sind
>
> [Missing Value]: welchen Wert fehlende Messwerte zugeteilt bekommen
>
> [Headers Line]: die Überschrift des neuen Files
>
> [Declarations]: die namentliche Einordnung der Variablen üblich in der Reihenfolge wie zu jedem Zeitschritt
>
> [Functions]: Durchführung von bestimmten Rechenschritten mit den Variablen, Setzen von Minima und Maxima, Bestimmung von Mean-Werten
>
> [Formats]: Allgemeine Format des neuen Files: Festlegung der Dezimalstellen einer Variable, Darstellung von Zeitvariablen

Der Output-File ist in diesem Fall ein CSV-File, da er von allen gängigen Computer-Geräten eingelesen werden kann. Als letzter Schritt wird dieser alle 10 Minuten aktualisiert auf der Website zum Download platziert.

Die graphische Darstellung erfolgt über das RTDM-Programm, was für Echtzeit-Monitoring steht. Es liest direkt die Rohdaten vom DAT-File und stellt diese graphisch dar, durch die ständige Überprüfung des zugeteilten DAT-Files wird eine Aktualisierung sofort wahrgenommen und dargestellt. Die Grafik zeigt zwei Werte, einmal der Linien-Wert, welcher als Kurve für die vorangegangen 24 Stunden erscheint, und einmal das „Dynamic Label“, was den aktuellen CO_2-Wert darstellt. Im Programm eingestellt ist eine Snapshot-Funktion, dadurch kann alle 10 Minuten ein digitales Foto entstehen, das dann auf die Website hochgeladen wird.

3.6 Charakterisierung des Standorts

Die Wetterstation ist auf dem Dach des Max-Planck-Instituts (Höhe ca. 20 m) für Biogeochemie in Jena angebracht. Der eigentliche Einlass der Außenluft ist auf einem 10 Meter hohen Turm auf dem Dach installiert. Ein Photo des Hauptstücks auf drei Schubfächern im Schrank auf dem Dach angebracht findet sich auf Abbildung 15. Jena befindet sich im Tal des Flusses Saale umringt von den typischen Muschelkalkhängen (z.B. Kernberge), dadurch entsteht eine sogenannte Kessellage. Am oberen Ende von einem dieser Hänge befindet sich das MPI Biogeochemie im Stadtteil Winzerla. Jena hat 102.494 Einwohner (Stand Dezember 2006), im näheren Umkreis (bis ca. 50 km) befinden sich die thüringischen Städte Gera, Weimar und Erfurt.

Das Klima von Jena kann als gemäßigt humides Klima bezeichnet werden. Die Kessellage des Saaletals von Jena führt zu einer 1-2 °C wärmeren Temperatur als im Umland. Der Kalkstein der Muschelkalkhänge fungiert hierbei als Wärmespeicher. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9,8 °C, in den letzten 3 Jahren lag sie allerdings nie unter 10 °C. Die Durchschnittstemperatur des Jahres 2007 lag bei sehr warmen 11,4 °C. Jena gilt als eine der wärmsten, aber auch trockensten Städte in Thüringen.

Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt in Jena durchschnittlich 587 mm. Trockenster Monat ist der Februar mit 34 mm. Obwohl die Zahl der Regentage im Dezember am größten ist (20 Tage mit mehr als 0,1 mm Niederschlag), gibt es im Juni mit 75 mm die meisten Niederschläge. Vorherrschende Windrichtung für Jena ist Südwest mit einer Häufigkeit von 28 Prozent und einer mittleren Stärke von 2 m/s (entspricht 1,6–3,3 m/s), (Klimadaten von: SCHULZ 2005, www.tlug-jena.de, http://mechatronik.mb.fh-jena.de/station, www.wikipedia.de/wiki/jena).

Abb. 15: Photo des „Herzstücks“ der CO_2-Messstation auf drei Platinen angebracht

4 Ergebnisse

Grundlage für die Auswertung der Ergebnisse ist die Datenerfassung über den Zeitraum vom 27.02.2008, 16:00 Uhr bis zum 18.05.2008, 24:00 Uhr. Die für diese Arbeit relevanten Daten umfassen die folgenden Werte:

- CO_2 (ppm)
- Temperatur (ºC)
- potentielle Temperatur (K)
- relative Luftfeuchte (%)
- photosynthetisch aktive Strahlung (µmol/m²/s)
- Windgeschwindigkeit (m/s)
- Windrichtung (º)
- Niederschlag (mm) an der Wetterstation MPI Biogeochemie, Jena
- die Werte von CO_2 (ppm) an der Station Gebesee
- CO_2 (ppm) an der Station Hainich
- potentielle Temperatur (K) im Versuchsfeld Saaleaue, Jena.

Alle Daten sind auf Nachfrage einzusehen am MPI Biogeochemie, Jena und stehen teilweise zum Download bereit unter www.bgc-jena.mpg.de/wetter.

In der Auswertung liegt der Fokus auf der Bedeutung der in **2.6** beschriebenen Einflussgrößen an unserem Standort sowie dem Vergleich zu den in der Theorie vorgestellten Jahres- und Tagesgängen für rurale und urbane Flächen. Ebenfalls sollen die Ergebnisse mit den Umlandstationen Hainich (Waldfläche) und Gebesee (landwirtschaftliche Fläche) verglichen werden.

4.1 Überblick über Gesamtsatz der erfassten Daten

Der Zeitraum der relevanten Datenerfassung erstreckt sich über knapp drei Monate, in denen der Beginn des Frühlings das auffallendste jahreszeitliche Merkmal ist. In Abbildung 16 ist der Gesamtsatz der erfassten CO_2-Daten ersichtlich, und man kann schon auf dieser groben Übersicht gewisse Veränderungen erkennen.

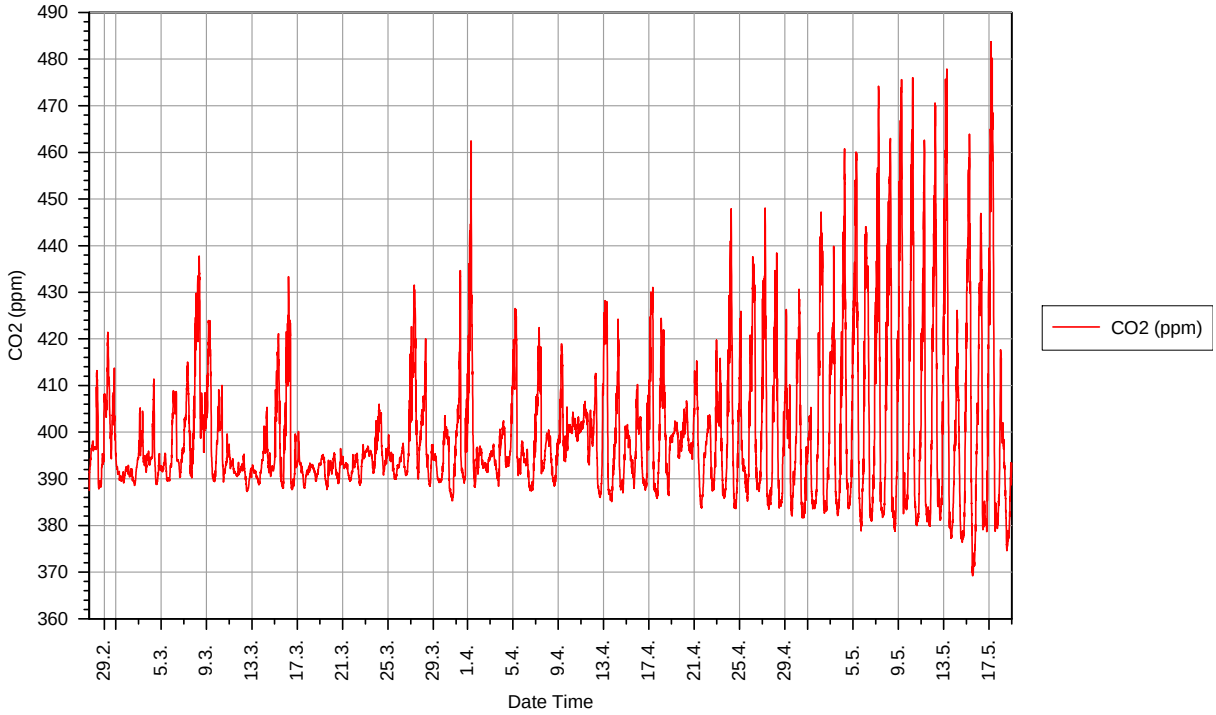


Abb. 16: Verlauf der CO_2-Konzentration am Standort MPI Biogeochemie, Jena über den gesamten Messzeitraum (27.2.08-18.5.08)

Sehr deutlich zeigt sich an den meisten Tagen der Wechsel zwischen Tag und Nacht mit erhöhten CO_2-Konzentrationen während der Nachtzeit. Weiterhin lassen sich sehr leicht größer werdende Amplituden mit fortschreitender Zeit beobachten mit den größten Unterschieden am Ende der Messreihe. In den folgenden Kapiteln sollen diese an einen Tagesgang oder einen Jahresgang (mit Zeitraum: 3 Monate) gekoppelten Veränderungen der CO_2-Konzentration analysiert werden.

4.2 Saisonale Variationen des CO_2-Gehalts (bezogen auf einen Zeitraum von 3 Monaten)

Die Beurteilung von saisonalen Variationen in den Messergebnissen kann leider nur bedingt durchgeführt werden, da sich die Ergebnisse auf den Zeitraum Ende Februar bis Ende Mai beziehen. Allerdings sind schon in einem Zeitraum von drei Monaten gewisse Trends zu erwarten, besonders da in diesem Fall der Beginn des Frühlings eingehend mit einer erhöhten Photosynthese-Leistung in den Zeitraum fällt. Ergebnisse zahlreicher Studien (z.B. LEVIN et al. 1995, KEELING et al. 1995, BERRY & COLLS 1990a&b) belegen ein Absinken des durchschnittlichen CO_2-Gehalts mit Beginn des Frühlings sowohl in ruralen Gebieten als auch in urbanen Gebieten. Mit Hilfe einer Mittelwertanalyse ist es das Bestreben, auch in dieser Messreihe einen solchen Verlauf zu identifizieren. Gemittelt werden alle CO_2-Werte eines Tages, was bei diesem Zeitraum von knapp drei Monaten zu einer Gesamtzahl von 82 Werten führt. Der maximale Wert einer solchen Reihe liegt bei 412,8 ppm (07.05.2008) während der niedrigste Wert 391,2 ppm (02.03.2008) annimmt. In Abbildung 17 sieht man den zeitlichen Verlauf dieser Mittelwerte. Es lässt sich ableiten, dass ein Absinken des CO_2-Mittelwerts eines Tages mit Beginn des Frühlings nicht zu

erkennen ist. Vielmehr erfährt die Kurve eine leichte Steigung und erreicht sein Maximum Anfang Mai am 07.05.2008.

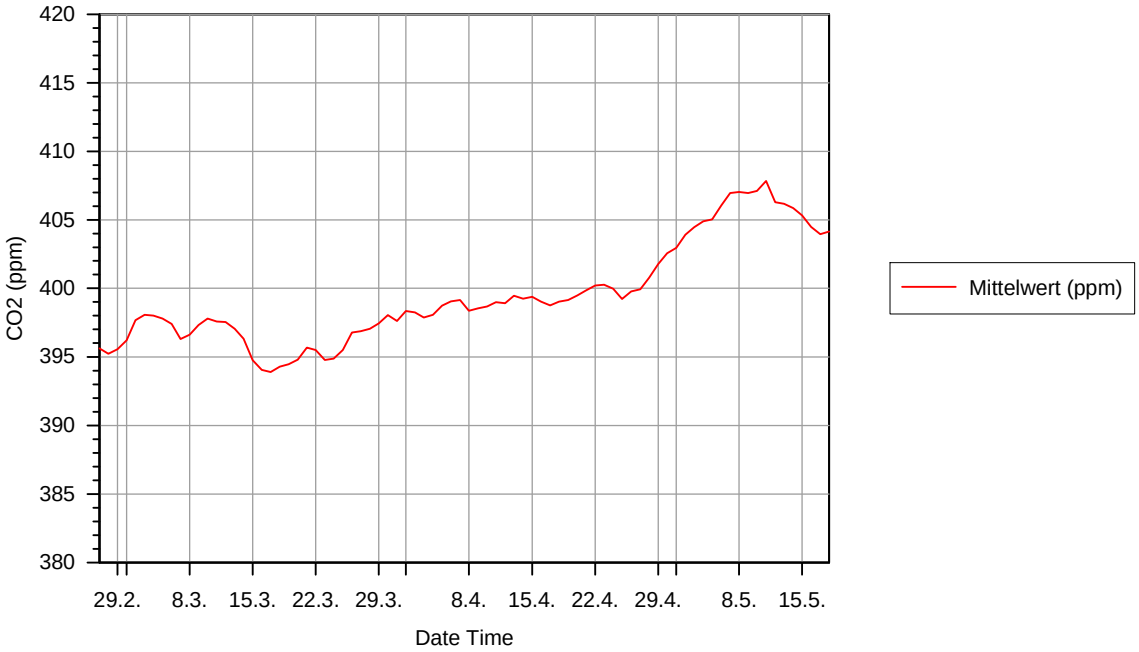


Abb. 17: Täglicher Mittelwert über den gesamten Messzeitraum, mit Approximation, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Um zu aufschlussreicheren Ergebnissen zu gelangen, wäre eine Messung über einen längeren Zeitraum als drei Monate von Vorteil. Für diesen dennoch unerwarteten Anstieg sind mögliche Gründe annehmbar. Man hat auf Abbildung 16 erkennen können, dass die Amplituden wesentlich ausgeprägter mit fortschreitender Jahreszeit werden, allerdings betrifft das zum großen Teil den nächtlichen Anstieg und nur zum geringen Maße das Minimum zur Tageszeit (siehe Abb. 18). Dies kommt in Zusammenhang mit verschiedenen meteorologischen Faktoren zustande und wird unter Kapitel **4.4** näher erläutert. Da die Ausweitung der positiven Amplitude wesentlich stärker in Gewicht fällt, kann dies bei lang anhaltender erhöhter Konzentration zu einem höheren Mittelwert führen. STURM et al. (2006) und LEVIN et al. (1995) bestätigen diese Annahme, dass lokale meteorologische Effekte den repräsentativen CO_2-Mittelwert für das Gebiet zu einer Jahreszeit verfälschen können. Sie grenzen daher die Datenerfassung ein, über Festlegung einer Variablen, in deren Falle die Windgeschwindigkeit, und verwenden nur die bei einer hohen Durchmischung erhobenen Daten. Allerdings gestaltet sich auch diese Methode für unsere Messreihe als schwierig, da man besonders in dem Monat Mai durchweg zu den Nachtzeiten niedrige Windgeschwindigkeiten vorfindet. Diese Methode würde folglich nicht zu einer repräsentativen Datenerfassung führen. Es ist allerdings auch möglich, dass nach unserer Mittelwertberechnung der Verlauf mit zunehmender Jahreszeit wieder abnimmt und bei Betrachtung eines ganzes Jahres das Maximum Anfang Mai beobachtet werden konnte, was in manchen Publikationen ähnlich nachgewiesen wurde (DETTINGER & GHIL 1998).

Vergleicht man wie auf Abbildung 18 einen Wochenverlauf Anfang März mit einem Verlauf Anfang Mai, wird deutlich wie sehr sich die jeweiligen Amplituden vergrößern.

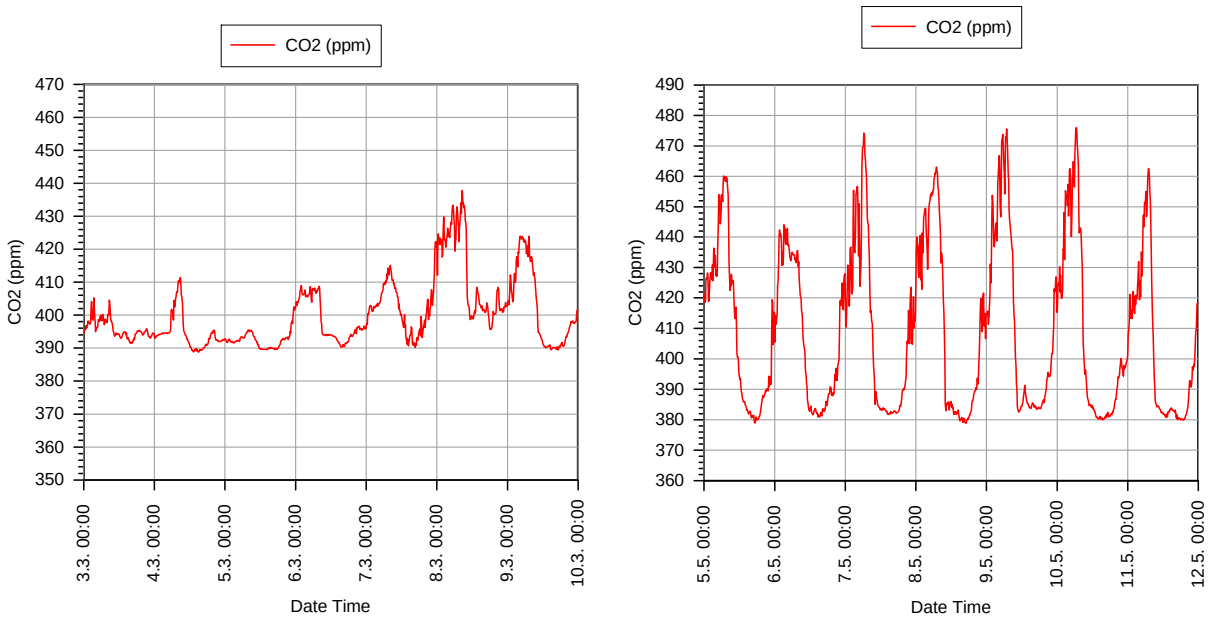


Abb. 18: Vergleich eines Wochenlaufs von CO_2 im Anfang März mit Anfang Mai, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Während der Woche Anfang Mai sind Unterschiede von bis zu 100 ppm zwischen Tag und Nacht zu erkennen, während sich im Zeitraum Anfang März maximal um 50 ppm differenzieren lässt. Natürlich spielt hierbei eine große Rolle, dass der Frühling zu der Zeit Anfang Mai schon eingesetzt hat und eine erhöhte Photosynthese in der Natur vonstatten geht, was man an niedrigeren CO_2-Werten zur Tageszeit identifizieren kann. Allerdings wird schnell deutlich, dass in der Nacht neben der einsetzenden zugehörigen Respiration der Pflanzen noch andere Variablen einen Effekt auf die CO_2-Konzentration haben. Nicht unerheblich ist dabei die Bodenatmung, da sie in diesem gemäßigt humiden Klima hauptsächlich temperaturabhängig ist (siehe **2.6.2**) und in der nächtlichen Temperatur ein Anstieg zu verzeichnen ist. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Ausbildung von Schichtungsverhältnissen, insbesondere im Hinblick auf Inversionslagen, da sich zu diesen Gegebenheiten CO_2 und andere Spurengase anreichern können. Es zeigt sich, dass die Häufigkeit und Ausprägung solcher Inversionslagen mit fortschreitender Jahreszeit in der Messreihe zunimmt und damit einen großen Einfluss auf die sehr ausgeprägte nächtliche Amplitude hat. Eine detaillierte Analyse dieser Inversionslagen wird unter Abschnitt **4.4.1** beschrieben. Nimmt man die maximalen und minimalen Werte eines jeden Tages und unterzieht der Darstellung eine gewisse Approximation, wird sehr schön ersichtlich wie sich die Amplituden mit fortschreitender Zeit auseinanderentwickeln (Abb. 19).

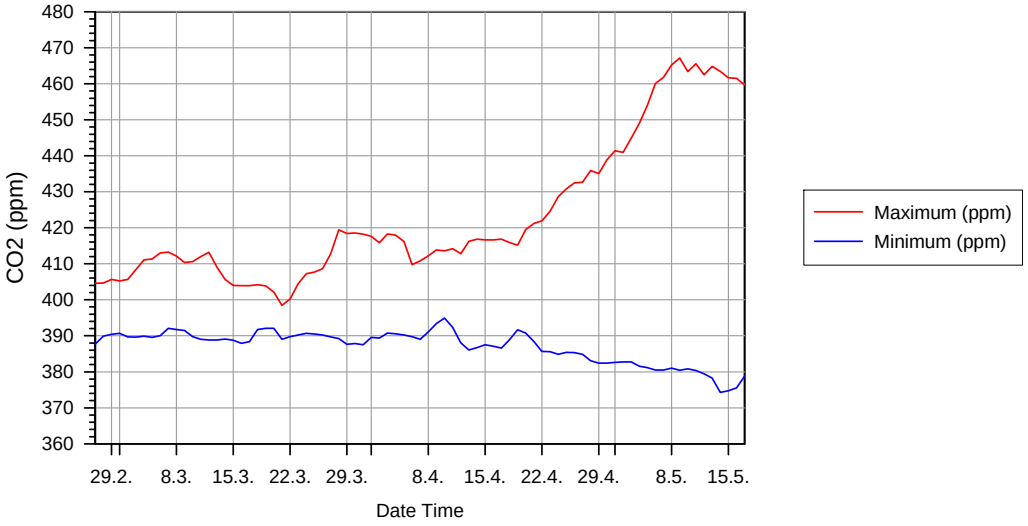


Abb. 19: Vergleich der Minima und Maxima der CO_2-Konzentrationen pro Tag, Standort MPI Biogeochemie, Jena

4.3 Diurnale Variationen des CO_2-Gehalts

Es wurde schon im vorherigen Abschnitt (**4.2**) gezeigt, dass der Tagesgang abhängig von der Jahreszeit sehr unterschiedlich ausfallen kann. In unserer Messreihe ist ein CO_2-Gefälle von bis zu 100 ppm zu beobachten. Allerdings soll in diesem Abschnitt erfragt werden, inwiefern sich die gemessenen Tagesgänge den in der Theorie vorgestellten Tagesgängen für urbane und rurale Gebiete gleichen. Das wohl eingängigste Merkmal ist die Ausbildung von einem Maximum am frühen Morgen und ein Minimum am frühen Nachmittag, welches die theoretischen Tagesgänge einer ruralen Umlandsstation bestätigt. Dies bedeutet, dass Photosynthese am Tag und der respiratorische Gaswechsel der Pflanzen sowie Bodenatmung in der Nacht auftritt. Die oftmals stabilen atmosphärischen Austauschverhältnisse in der Nacht führen zu einer Anreicherung des CO_2, bis die eintreffende Strahlung die Atmosphäre wieder durchmischt.

In den meisten Fällen lässt sich das Maximum in der Tageszeit zwischen 6-9 Uhr einordnen, je nach Jahreszeit kurz bevor photosynthetisch aktive Strahlung auftritt. Allerdings sind in unserer Messreihe sehr wohl Tagesgänge zu finden, wo dieses Maximum sehr viel früher vorkommt oder sich eine stabile CO_2-Konzentration früher bildet. Oftmals ist der Grund hierbei in sich nicht ausbildenden stabilen Schichtungsverhältnisse zu finden oder auch in der Auflösung solcher durch andere Effekte als die PA-Strahlung. Es gibt Beispiele (Abb. 20), in denen die Windgeschwindigkeit schon in der Nacht zunimmt und einhergehend die CO_2-Konzentration wieder sinkt (siehe auch Abb. 28).

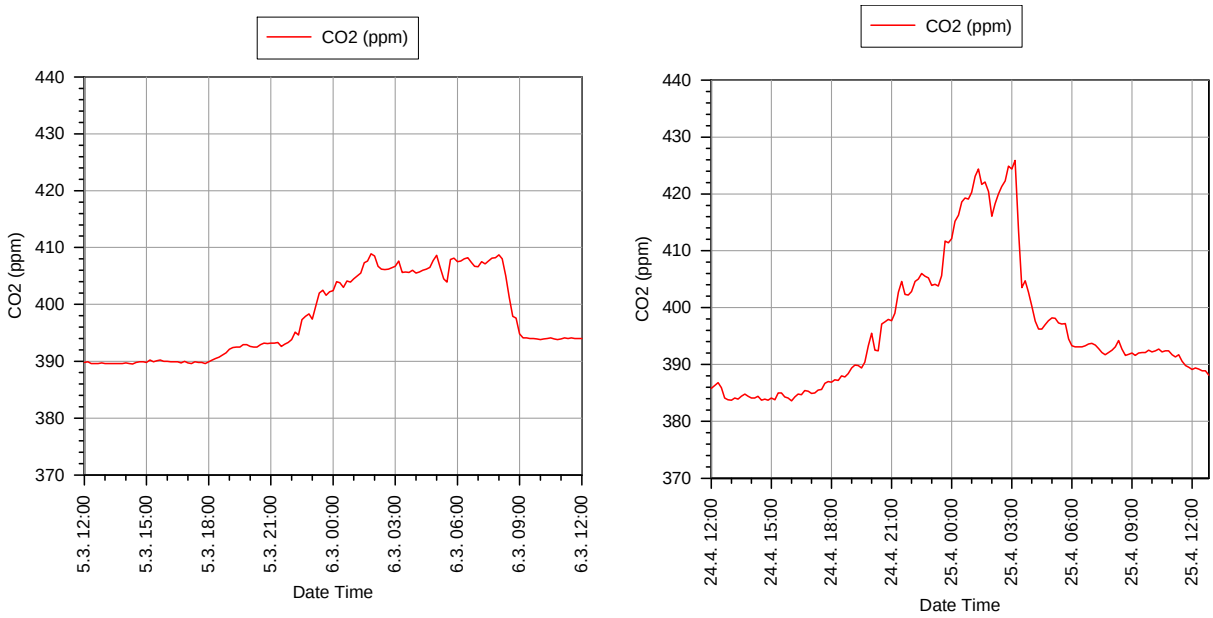


Abb. 20: Beispiele von relativ früh einsetzender konstanter CO_2-Konzentration in der Nacht und verfrühter Abnahme des CO_2-Gehalts, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Solche Effekte wurden auch in urbanen Gebieten von IDSO et al. (2002) und AIKAWA et al. (1995) beobachtet mit maximalen Konzentrationen vor Mitternacht, wo diese auf darauffolgende instabile Verhältnisse zurückgeführt wurden. Allerdings beschreiben diese Publikationen jeweils ein zweites Maximum aufgrund des morgendlichen Berufsverkehrs, dessen Identifizierung sich bei unseren Ergebnissen schwierig gestaltet. Nach intensiver Analyse der vorhandenen Ergebnisse treten manchmal Tagesgänge mit zwei Maxima auf, allerdings ist die exakte Erschließung nicht immer möglich. Die frühere Abnahme des ersten Maximums ist oft auf erhöhte Windgeschwindigkeit zurückzuführen (siehe auch **4.4.2**). Das zweite Maximum kann jedoch nicht ohne Zweifel dem Berufsverkehr zugeordnet werden. Vielmehr ist auch möglich, dass sich wieder stabile Schichtungsverhältnisse eingestellt haben, die dann mit eintreffender PA-Strahlung abnehmen. Bei den meisten Tagesgängen ist es also der Fall, dass zwei ausgeprägte Maxima nicht gemessen wurden, bei verfrühten Maxima ist eine stetige Abnahme hin zum täglichen Tiefstwert zu verzeichnen. Allerdings kann der Berufsverkehr sehr wohl als zusätzliche Quelle zu dem auftretenden Zeitpunkt betrachtet werden. Die Suche nach einem zweiten frühabendlichen Maximum, wie von z.B. GRIMMOND (2002) beschreiben, gestaltet sich für diesen Datensatz als erfolglos, der Effekt des abendlichen Berufsverkehrs ist nur schwerlich zu identifizieren. Eine detailliertere Analyse findet sich im Kapitel **4.4.7** zu den Anthropogenen Emissionen.

Besonders im Monat Mai, wo eine Vielzahl von Hochdruckwetterlagen zu beobachten war, zeigten sich die ausgeprägtesten Tagesgänge. Interessant ist hierbei der Verlauf der spätabendlichen und nächtlichen Anreicherung von CO_2 in stabilen Austauschverhältnissen. Exemplarisch dargestellt in Abbildung 21, kann man einen solchen Verlauf für die meisten Tage konstruieren, an denen ebenfalls die so genannten nächtlichen Fluktuationen („Nocturnal Fluctuations“) für Aufsehen sorgen. Ähnliche Verläufe ließen sich bei CLARKE (1965), STURM et al. (2006) und HASZPRA (1992) finden, allerdings ist es schwierig, auf eine einheitliche Erklärung zu stoßen. CLARKE (1965)

nimmt an, dass diese Fluktuationen von kleinen Turbulenzen in an sich stabilen atmosphärischen Bedingungen kommen, auch abrupte Fluktuationen in der überwiegend geringen Windgeschwindigkeit können ein möglicher Grund sein. Es lässt also nicht definitiv aufklären, warum diese Fluktuationen in dieser Messreihe auftreten, sie sind aber Bestandteil der Analyse von CO_2 in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung (**4.4.2** und **4.4.3**). Am wahrscheinlichsten ist das Auftreten von kleinen Turbulenzen oder Böen in grundlegend stabilen Schichtungsverhältnissen, da bei solchen Ereignissen kleine Schwankungen bei Windrichtung und im geringen Maße bei Windgeschwindigkeit identifiziert werden können. Ein Vergleich der CO_2-Konzentration in einer Hochdruckwetterlage mit der Windrichtung am selbigen Tag in Abbildung 21 stützt diese Annahme.

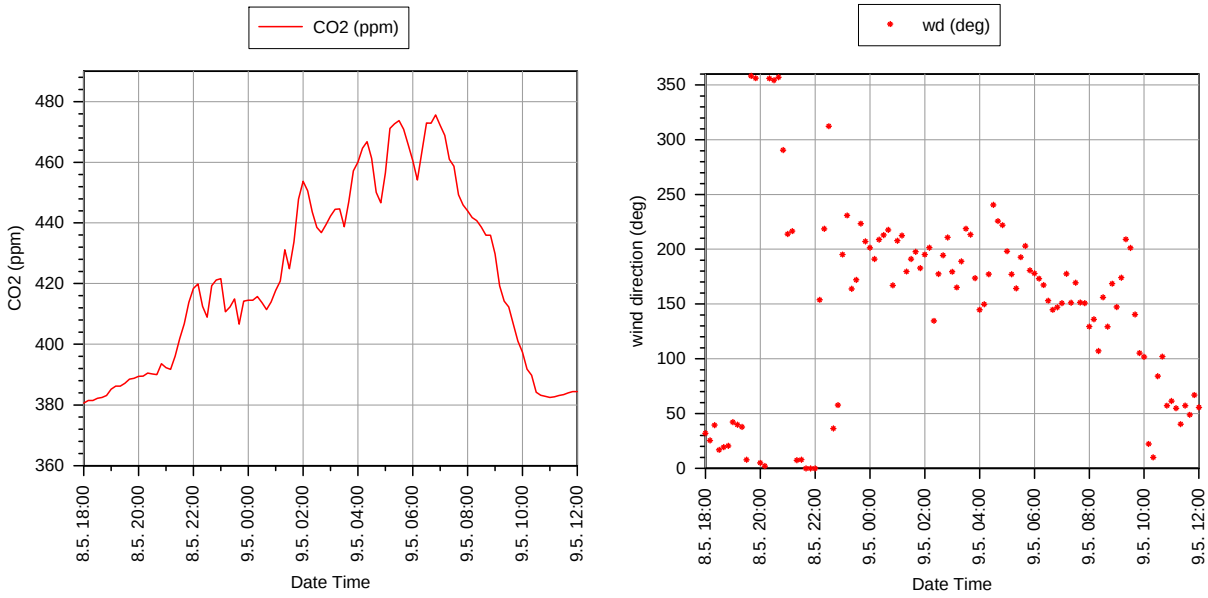


Abb. 21: Nächtliche Fluktuationen am Beispiel des CO_2-Verlaufs von 8.5.2008 18:00 bis 9.5.2008 12:00, sowie die Fluktuationen in der Windrichtung im gleichen Zeitraum, Standort MPI Biogeochemie, Jena

4.4 CO_2 in Abhängigkeit von verschiedenen Variablen

4.4.1 Atmosphärische Schichtungsverhältnisse

Die Ausbildung von stabilen bzw. labilen Schichtungsverhältnissen in der Atmosphäre hat einen großen Einfluss auf die gemessene CO_2-Konzentration. Wie in der Theorie (**2.6.4.1)** beschrieben, kommt es besonders zu Hochdruckwetterlagen aufgrund einer negativen Strahlungsbilanz der Erdoberfläche zu so genannten Inversionslagen, in denen sich bestimmte Spurengase wie Kohlendioxid anreichern können. Sowohl in Publikationen (z.B. EUGSTER & SIGRIST 2000, AIKAWA et al. 1995) zu urbanen Flächen wie auch ruralen Flächen sind diese Verhältnisse als Hauptgrund für den nächtlichen Anstieg der CO_2-Konzentration definiert, in denen sich natürliche als auch anthropogenen Emissionen sammeln können.

Die geographische Lage von Jena bietet gute Voraussetzungen für solche Anreicherungen infolge stabiler atmosphärischer Schichtung. An den Hängen gleitet die Kaltluft in das Saaletal und es kann sich ein umgekehrter Temperaturgradient herausbilden (T steigt mit

Höhe an). Aus diesem Grund werden zur Analyse die Messdaten der Station Saaleaue, die sich direkt auf Höhe der Saale befindet, zur Hilfe genommen. Mit der Wetterstation am MPI Jena hat man nun zwei verschiedene Standorte in unterschiedlichen Höhen repräsentativ für das Tal, und kann anhand der potentiellen Temperatur den Temperaturgradienten analysieren. Die potenzielle Temperatur T_{pot} kann als Maß für die Summe aus innerer Energie (örtliche Temperatur) und potentieller Energie (Höhe) gesehen werden. Wie auf einer Tagesübersicht in Abbildung 22 zu sehen, kann man nun nächtliche tiefere Temperaturen im Tal erkennen und auf Ausbildungen von Inversionslagen schließen.

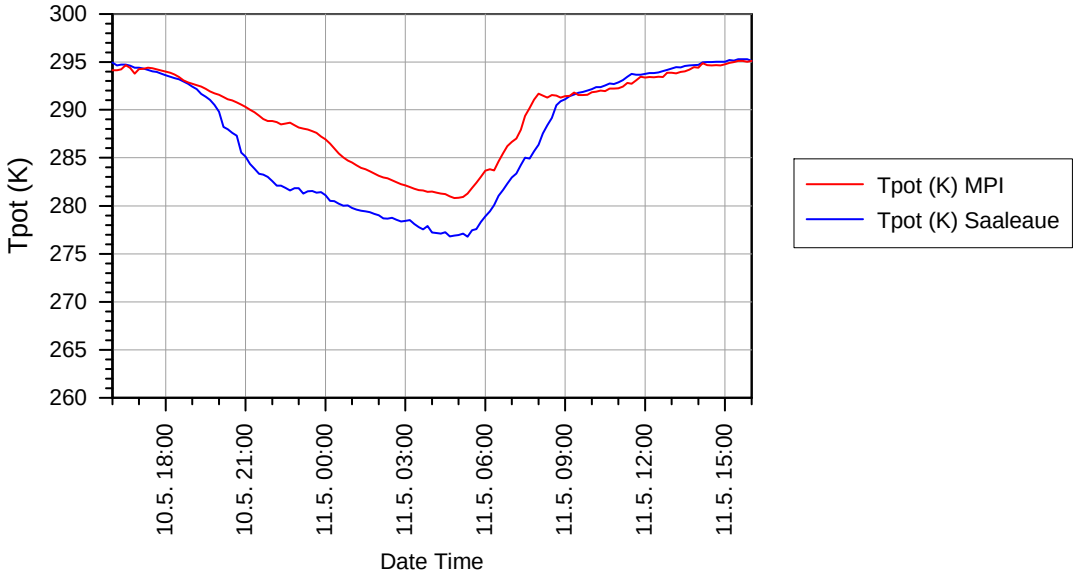


Abb. 22: Ausbildung einer Inversionslage in der Nacht vom 10.05.2008 zum 11.05.2008, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Definiert man die Ausbildung einer Inversion für eine bestimmte Differenz zwischen der potentiellen Temperatur in der Nacht an beiden Standorten, so lassen sich beeindruckende Korrelationen zwischen Inversionslagen und CO_2-Tagesgängen bestimmen. Es ist zu erwarten, dass sich bei stabiler Schichtung der Atmosphäre höhere Mengen von CO_2 in der Atmosphäre ansammeln können und somit die Tagesgänge mit den höchsten Amplituden zu diesen Wetterlagen vorkommen. Die CO_2-Tagesgänge mit den zehn höchsten Differenzen zwischen den jeweiligen Minima und Maxima treten allesamt zu Inversionslagen nach unserer Definition auf. Exemplarisch kann dafür die Woche vom 5.5.2008 bis 11.5.2008 gelten, in der es durchweg zu Hochdruckwetterlagen mit hohen Temperaturen kam. Höchstwahrscheinlich bildeten sich an jedem Tag dieser Woche sehr deutliche Inversionslagen, und es kommt mit zu den ausgeprägtesten Tagesgängen in der gesamten Messreihe (Abb.23).

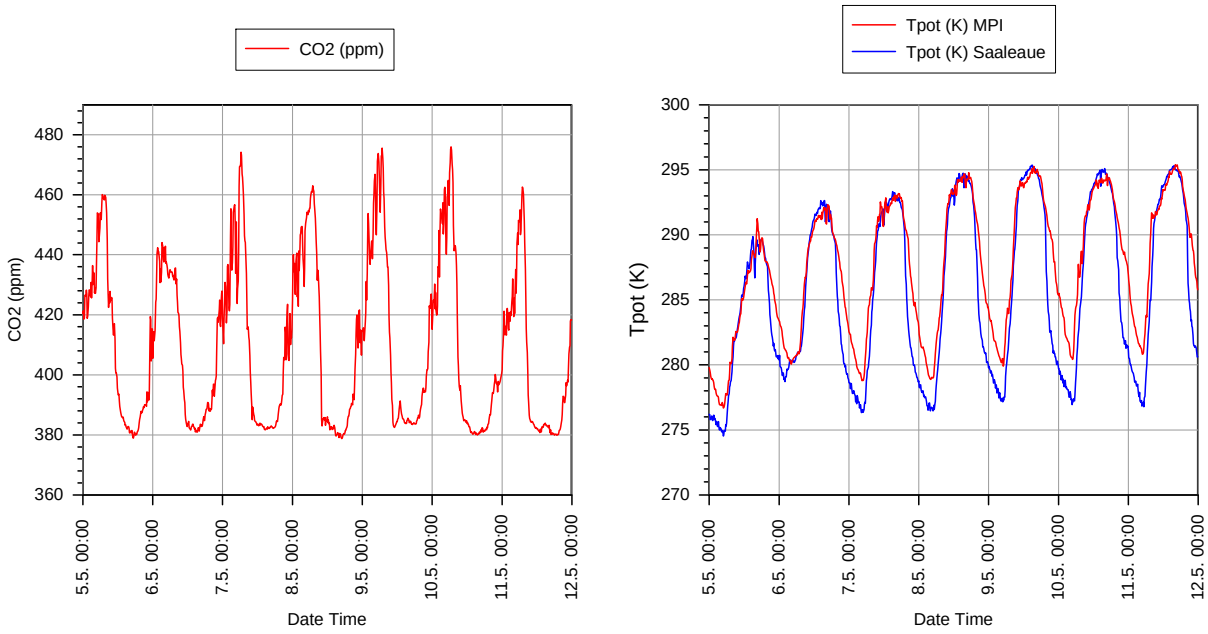


Abb. 23: Vergleich der CO_2-Tagesgänge mit Ausbildung von Inversionen in Woche 11 (5.5.2008-11.05.2008), Standort MPI Biogeochemie, Jena

Wie bereits in Kapitel **4.3** angesprochen, kommt es manchen Tagen zu einer verfrühten Abnahme der CO_2-Konzentration mehrere Stunden vor der einsetzenden Globalstrahlung. Diese Ereignisse können zum Teil dem verfrühten Auflösen einer Inversionslage zugeschrieben werden. Dieses kann durch verschiedene meteorologische Ursachen wie Änderung der Windgeschwindigkeit, Windrichtung oder auch des Luftdrucks hervorgerufen werden. Infolge der zunehmenden Instabilität der Atmosphäre kommt es daher zu einer besseren vertikalen Durchmischung und die CO_2-Konzentration an dem Standort beginnt zu sinken. Abbildung 24 zeigt ein solches Beispiel der verfrühten Auflösung einer Inversionslage mit folgender Abnahme des CO_2-Gehalts zum gleichen Zeitpunkt. Hier gleichen sich die potentiellen Temperaturen zwischen 0:00 und 2:00 Uhr an, was zu einer Abnahme des CO_2-Gehalts nach 1:00 Uhr führt. Allerdings ist eine Zunahme des CO_2-Werts zwischen 2:00 und 3:30 Uhr zu notieren. Der Grund hierfür liegt in der sich entwickelnden leicht stabileren Schichtung zu dieser Zeit in Folge der vergrößerten Differenz der T_{pot} zwischen den Stationen Saaleaue und MPI Jena. Um 3:30 Uhr kommt es dann zur vollständigen Auflösung der stabilen atmosphärischen Verhältnisse und der CO_2-Gehalt sinkt rapide aufgrund einer besseren vertikalen Durchmischung. Dies lässt auch zeigen im zweiten Diagramm der Abbildung 24, da zu diesem Zeitpunkt die potenzielle Temperatur an der Station Saaleaue die T_{pot} der Station MPI Jena übertrifft und sich somit labile Bedingungen einstellen.

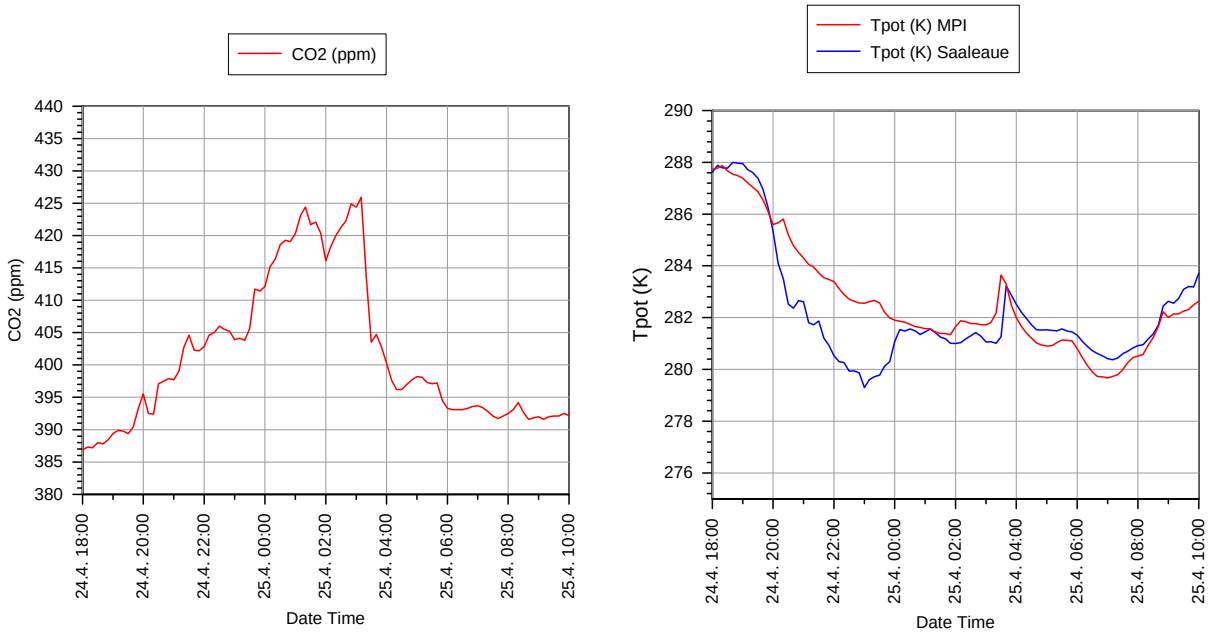


Abb. 24: Effekt des verfrühten Auflösens einer Inversionslage auf die CO_2-Konzentration in der Nacht vom 24.4.2008 zum 25.4.2008, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Ebenfalls kann man die jeweilige Ausprägung der Inversionslagen als zusätzlichen Faktor für die mit fortschreitender Zeit größeren Amplituden des CO_2-Tagesgangs gelten lassen. Eine Quantifizierung ist nicht einfach, gewiss haben die erhöhte Bodenatmung und der erhöhte respiratorische Gaswechsel ebenfalls einen nicht unerheblichen Effekt. Allerdings kann man auf Abbildung 19 beobachten, dass die Maxima eine weitaus größere Steigung als die Minima (negative Steigung) der jeweiligen Tagesgänge erfahren und dies lässt sich nicht allein durch eine erhöhte Bodenatmung (Temperaturanstieg in der Nacht im Zeitraum März-Mai) erklären. In ausgeprägten Inversionslagen bilden sich sehr stabile atmosphärische Bedingungen, unter denen der vertikale Austausch von Luftpaketen stark reduziert wird. Die Anreicherung des CO_2 in einem sogenannten „See“ im Saaletal von Jena hängt also auch vom Grad der stabilen Schichtung der Atmosphäre ab.

Darüberhinaus gibt es auch genügend Beispiele, bei denen sich stabile atmosphärische Bedingungen im Laufe eines Tages in der Messreihe überhaupt nicht bilden konnten und der CO_2-Tagesgang nur sehr schwach ausgeprägt erscheint. In dem dreimonatigen Messzeitraum traten solche Bedingungen vor allen Dingen in den ersten Wochen häufiger auf. Beispielsweise treten in der Woche vom 17.3.2008-23.3.2008 konstant labile Schichtungsverhältnisse auf, wodurch die Tagesgänge der CO_2-Konzentration stark „dezimiert“ erscheinen und sich der CO_2-Gehalt in der gesamtem Woche zwischen 390 und 400 ppm bewegt. Sicherlich traten zu dieser Jahreszeit die natürlichen Quellen und Senken nicht so dominant auf, allerdings wurden schon in den vorherigen Wochen Werte bis 435 ppm in der Nacht gemessen. Abbildung 25 zeigt den Wochenverlauf der CO_2-Konzentrationen sowie die vorherrschenden labilen atmosphärischen Bedingungen anhand der Differenz der potentiellen Temperatur.

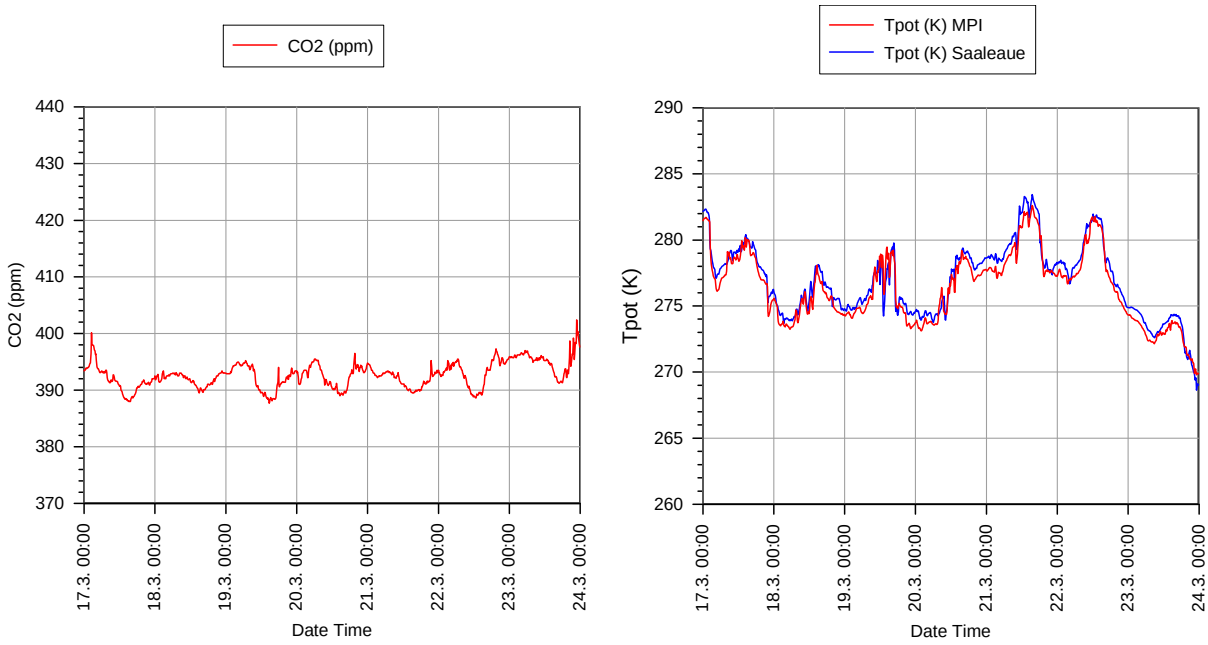


Abb. 25: Darstellung eines CO_2-Wochenverlaufs während labiler Schichtungsverhältnisse, Standort MPI Biogeochemie, Jena

4.4.2 Windgeschwindigkeit

In der Theorie (**2.6.4.2**) verweisen mehrere Arbeiten auf eine negative Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und CO_2-Konzentration. Verstärkte horizontale Windbewegungen sind eine Folge von erhöhtem vertikalem Austausch, was auf eine gute Durchmischung in der Atmosphäre hinweist. In unserem Datensatz wurden Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s gemessen. Diese traten während des Orkan-Ereignisses „Emma“ (29.2.-2.3.) auf. Bei grober Betrachtung der verschiedenen Windstärken kann man auch in diesen Ergebnissen einen Tagesgang des Windes feststellen, ähnlich wie in NASRALLAH et al. (2003). Gut zu erkennen sind hierbei niedrige Windgeschwindigkeiten in der Nacht und erhöhte Geschwindigkeiten am Tage (Abb.26) infolge der atmosphärischen Schichtung bzw. der Globalstrahlung.

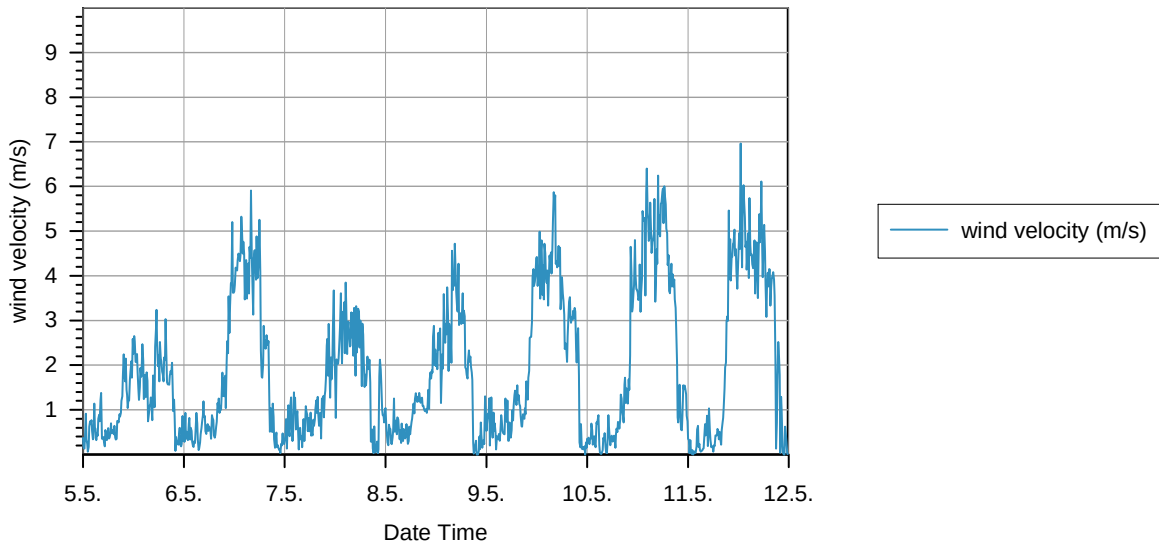


Abb. 26: Typische Tagesgänge der Windgeschwindigkeit zu Hochdruckwetterlagen in der Woche vom 5.5.2008-11.5.2008, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Hierbei sei gesagt, dass dieser typische Tagesgang am ehesten zu Hochdruckwetterlagen auftritt und durchaus auch sehr unterschiedliche Tagesgänge der Windgeschwindigkeit zu verzeichnen waren. Vergleicht man aber die Werte der Woche 11 vom 5.5.08-11.5.08 (Abb.26) mit der CO_2-Konzentration im gleichen Zeitraum (Abb.23) passt die Theorie der negativen Korrelation nahezu perfekt. Sobald die Globalstrahlung einfällt, sinkt die CO_2-Konzentration und die Windstärke nimmt zu. Einzelne Beispiele des Datensatzes verdeutlichen auf mikroskaliger Ebene das Verhältnis vom Wind zu CO_2 sehr anschaulich.

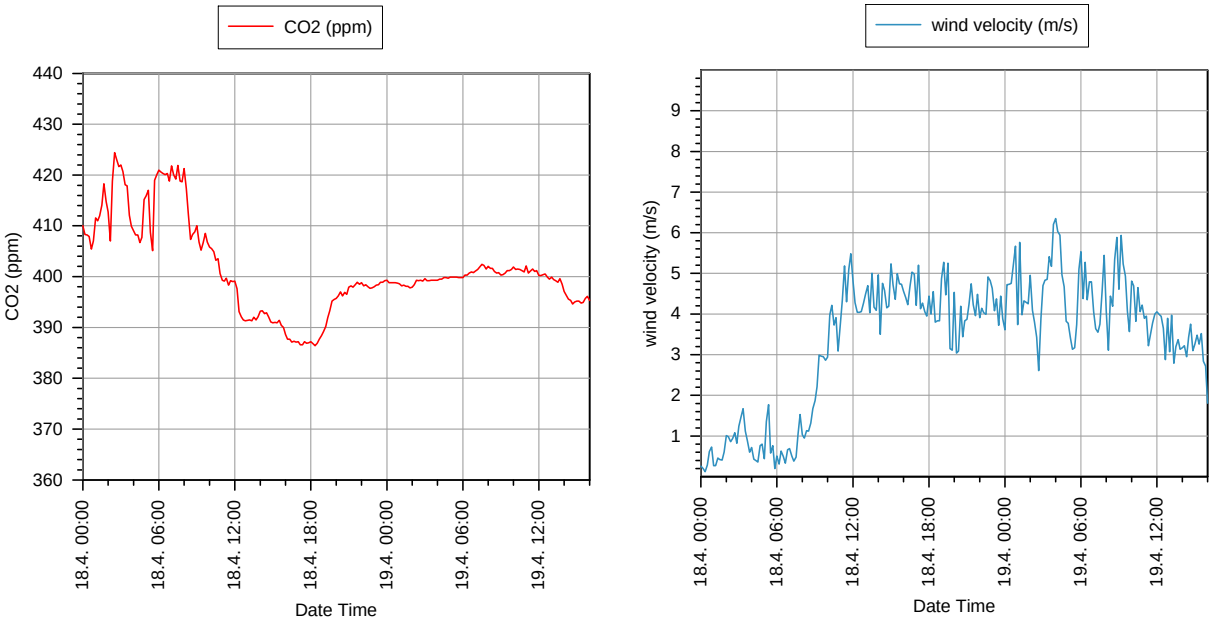


Abb. 27: Verlauf der CO_2-Konzentration und der Windgeschwindigkeit für den Zeitraum 18.4.08 0:00 Uhr bis 19.4.08 16.00 Uhr, MPI Biogeochemie, Jena

Man sieht auf Abbildung 27 sehr gut, wie eine Zunahme der Windstärke (ausgelöst durch die eintreffende Globalstrahlung) am 18.4.08 um 7:00 Uhr zu einem stetigen Absinken der CO_2-Konzentration zum gleichen Zeitpunkt führt bis diese sich auf einen relativ konstanten Wert eingependelt hat. Der Anstieg um 10 ppm mit Beginn des Abends (nach 18:00 Uhr) wird hervorgerufen durch den Wechsel von Photosynthese zu respiratorischen Prozessen, eine Anreicherung kann allerdings aufgrund der weiterhin relativ hohen Windgeschwindigkeit nicht geschehen und so bleibt der CO_2-Wert relativ konstant über die Nacht.

Abbildung 28 zeigt wechselnde Windbedingungen während der Nacht vom 22.3.08 zum 23.3.08. Die Windrichtung zeigt ebenfalls kleinere Fluktuationen in dieser Zeitspanne auf. Bei diesen böigen Bedingungen, die ungefähr zu Mitternacht beginnen, stoppt die stetige Anreicherung von CO_2 und um 0:00 Uhr ist ein Absinken um ca. 10 ppm zu verzeichnen. Auch während der Anreicherung sind schon kleinere Fluktuationen zu erkennen. Ab Mitternacht kann man dann Fluktuationen des CO_2-Gehalts beobachten, die stets im Gegensatz zu den Veränderungen in der Windgeschwindigkeit auftreten. Die Windstärke bewegt sich hauptsächlich zwischen 1 m/s bis 3 m/s, und kann zu Veränderungen des CO_2-Gehalts von mehr als 10 ppm führen.

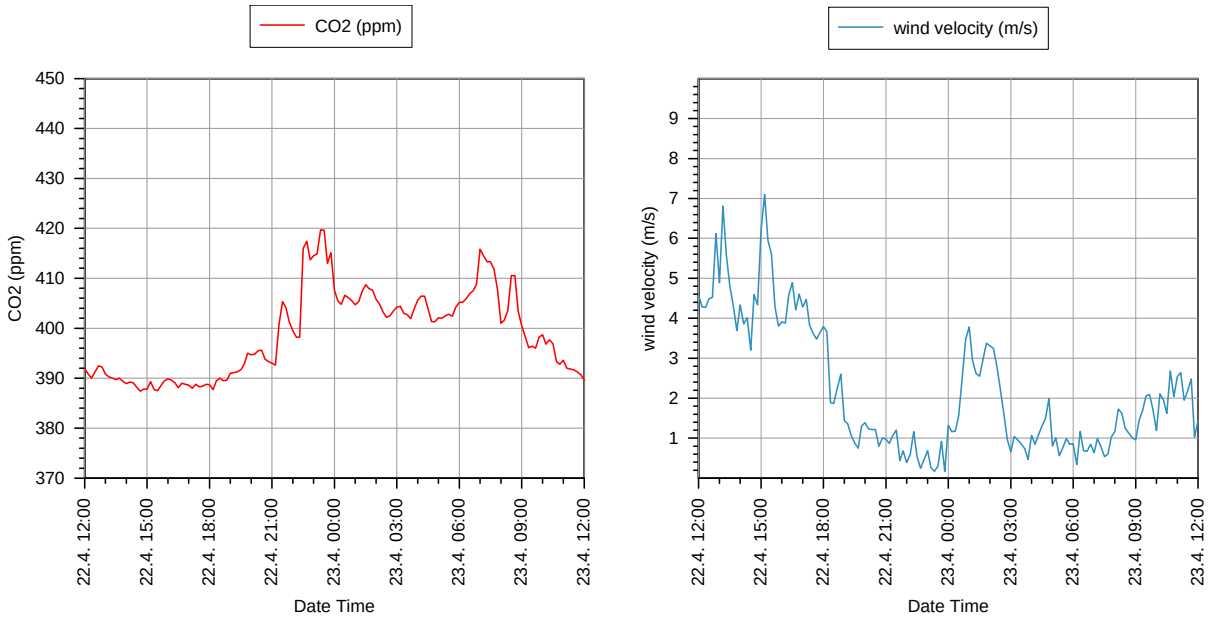


Abb. 28: Vergleich von CO_2-Konzentration und Windstärke in der Zeit von 22.4.08 12:00 Uhr bis 23.4.08 12:00Uhr, MPI Biogeochemie, Jena

Beobachtet man den Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Windstärke auf solch mikroskaliger Ebene, ist es sehr wichtig zu beachten, dass es sich um eine Betrachtung von Mittelwerten über ein Intervall von 10 Minuten handelt. Die maximal gemessen Geschwindigkeiten in solch Intervallen können teils sehr stark abweichen von den resultierenden Mittelwerten, besonders wenn vereinzelte Böen auftreten. Zum Beispiel sieht man in Abbildung 28, dass um ca. 8:00 Uhr die CO_2-Konzentration rapide um 10 ppm absinkt. Zur gleichen Zeit nimmt die Windgeschwindigkeit zwar zu, jedoch erreicht sie nur eine relativ geringe Geschwindigkeit von ca. 1,75 m/s. In diesem Fall ist es wahrscheinlich, dass die maximale Windgeschwindigkeit weitaus höher gelegen hat und vereinzelte starke Böen zum rapiden Absinken des CO_2-Gehalt führten.

Ein ähnlicher Effekt kann durchaus im Zusammenhang mit den in Abbildung 21 aufgezeigten nächtlichen Fluktuationen der CO_2-Konzentration stehen. Dieses „Phänomen“ tritt häufig in sehr stabilen atmosphärischen Schichtungsverhältnissen auf, in welchen sich die Windgeschwindigkeit typischerweise auf einem sehr niedrigen Niveau bewegt. Allerdings kann es durchaus sein, dass immer wieder kleine vereinzelte Böen auftreten, die nicht direkt in der Mittelwert-Berechnung ersichtlich werden, und zu einem kurzfristigen Absinken der CO_2-Konzentration führen. Kleine Variationen in der Windrichtung spielen dabei auch eine Rolle und werden im Abschnitt **4.4.6** diskutiert.

4.4.3 Photosynthetisch Aktive Strahlung

Die photosynthetisch aktive Strahlung gilt als der für Pflanzen nutzbare Anteil der Globalstrahlung und wird auf einen 30%-igen Anteil beziffert (HÄCKEL 1990). Offensichtlich gleichen sich deshalb die Verläufe der PA-Strahlung sowie der Globalstrahlung an unserer Messstation. Bei einem Überblick bezüglich der jeweiligen Tagesgänge im Verlauf unserer Messung lässt sich feststellen, dass sich die Länge der detektierten Strahlung aufgrund von verlängerter Sonnenscheindauer mit fortschreitender Jahreszeit stetig erhöht. Ein weiteres Merkmal ist der Anstieg der jeweiligen Maxima pro

Tag. So wurden Anfang März noch maximal ca. 900 µmol/m²/s gemessen, während Mitte Mai die Strahlung Werte um 1800 µmol/m²/s erreichte. Die PA-Strahlung nimmt über zwei Wege Einfluss auf den Tageslauf der CO_2-Konzentration. Zum einen ist das Strahlungsangebot essentiell für den Vorgang der Photosynthese am Tag, zum anderen zeigt sie sich für die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche verantwortlich und kann erheblichen Einfluss auf die atmosphärische Schichtung nehmen. Daher sollten in den Ergebnissen die Zusammenhänge zwischen PA-Strahlung und CO_2-Konzentration sehr gut zu beobachten sein.

Allerdings trifft dies auf den Vorgang der Photosynthese in diesem Datensatz nur bedingt zu. Der Großteil der minimalen CO_2-Konzentrationen am Tag (um 380 ppm) wurde zwar in Hochdruckwetterlagen bei maximaler PA-Strahlung gemessen, es existieren aber auch Beispiele, bei denen einen weitaus geringere Strahlung ausreichte (ca. 1000 µmol/m²/s) um eine ähnliche Konzentration zu erreichen. Dies liegt daran, dass die Pflanzen nur einen gewissen Anteil der Strahlung effektiv nutzen können und sich in Abhängigkeit von der Pflanzenart zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Sättigung einstellen kann. LARCHER (2001) beziffert den eigentlichen Anteil der PA-Strahlung, der in Kohlenhydrate umgewandelt wird, auf höchstens 2 bis 3 %. Es kann aber sehr wohl zu verringerter Photosynthese-Leistung bei stark dezimierter Strahlung kommen, bezogen auf Dauer und Intensität der Strahlung. Ein Beispiel ist in Abbildung 29 zu sehen. An zwei aufeinander folgenden Tagen war ein hoher Bewölkungsgrad sowie eine hohe relative Luftfeuchte zu verzeichnen und die PA-Strahlung nahm sehr geringe Werte an. Hier erreicht die minimale Konzentration nur 395 ppm, während in der darauffolgenden Woche CO_2-Gehalte um die 385 ppm aufgenommen wurden. Dies ist ein Hinweis auf verminderte Photosynthese-Leistung zu einer strahlungsarmen Phase.

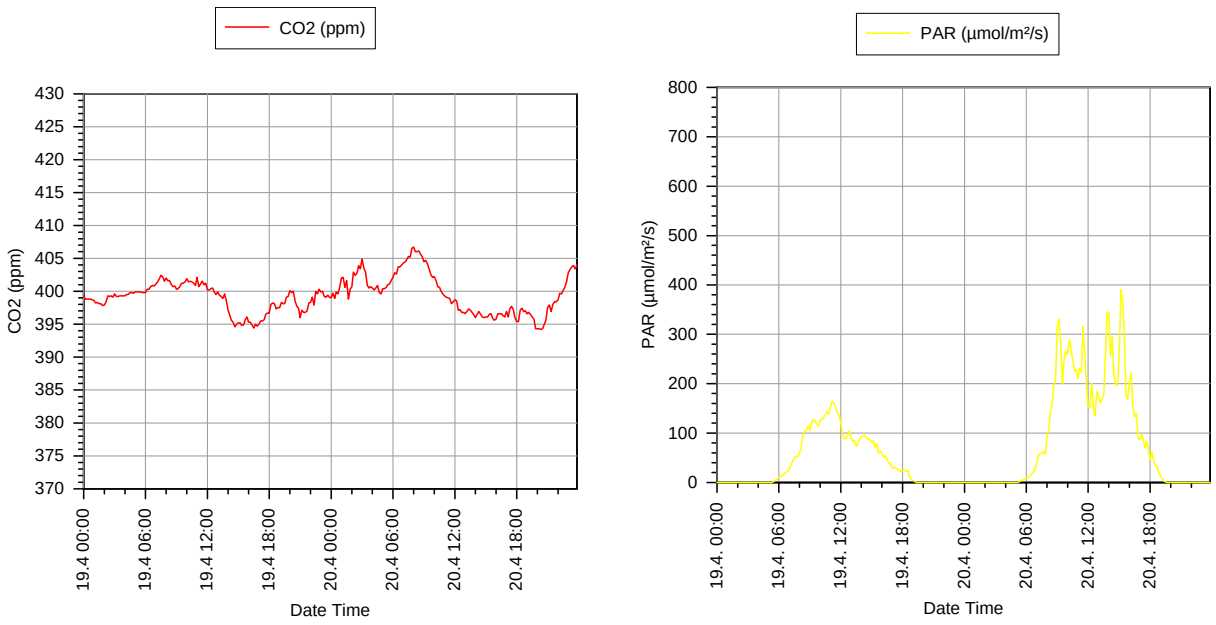


Abb. 29: Verlauf der CO_2-Konzentration über zwei Tage (19.4.08-21.4.08) zu strahlungsarmen Bedingungen, MPI Biogeochemie, Jena

Der Effekt der eintreffenden Strahlung auf die atmosphärischen Austauschbedingungen lässt sich anhand der Ergebnisse sehr gut nachvollziehen. Typisch ist ein stark negativer

Gradient des Verlaufs der CO_2-Konzentration sobald Globalstrahlung am Morgen auftritt, da es zur konvektiven Durchmischung kommt und vertikale Austauschprozesse stattfinden. Oftmals besteht ein starker Zusammenhang zwischen dem positiven Gradienten der Globalstrahlung und dem negativen Gradienten der CO_2-Konzentration am Morgen (Abb. 30). Dies hängt natürlich auch davon ab, welche Werte der CO_2-Gehalt in der Nacht angenommen hat. Abbildung 30 zeigt auch, wie die PA-Strahlung am Tage Einfluss auf die Bildung von stabilen atmosphärischen Bedingungen nimmt, in denen sich das Kohlendioxid in der Nacht kontinuierlich anreichern kann. Durch diesen in einer Hochdruckwetterlage im Frühling typischen Verlauf der Strahlung verzeichnet die Erdoberfläche eine stark negative Strahlungsbilanz und es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Ausbildung einer Inversionslage.

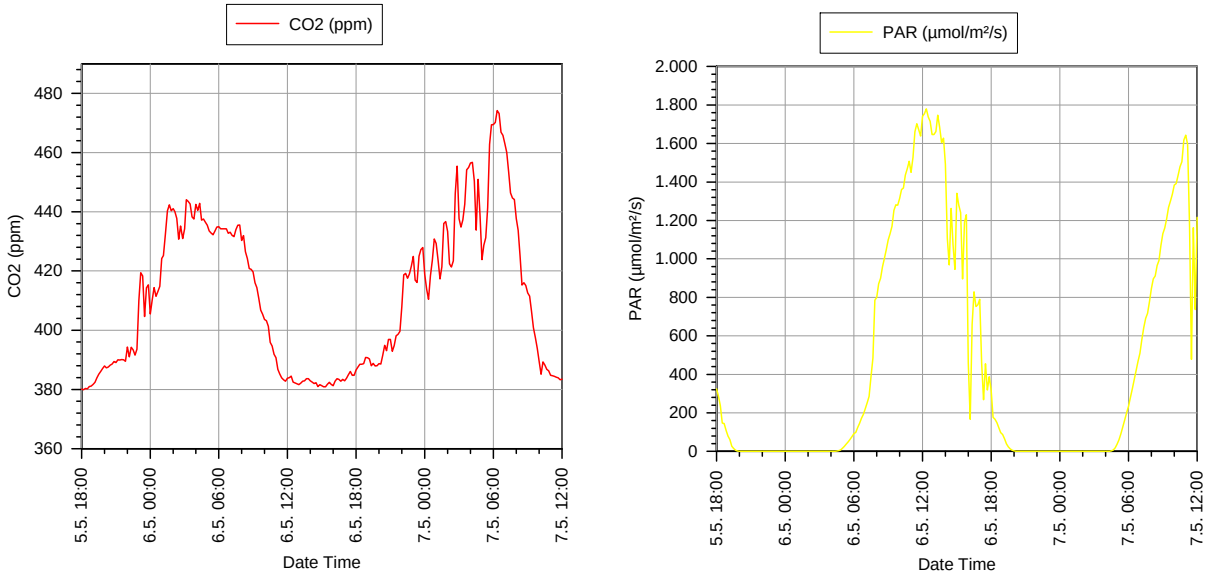


Abb. 30: Verlauf der CO_2-Konzentration zu strahlungsreichen Bedingungen (5.5.08 18:00 Uhr – 7.5.08 12:00 Uhr), MPI Biogeochemie, Jena

4.4.4 Relative Luftfeuchte

Ähnlich dem Verlauf der photosynthetischen Strahlung lässt sich auch bei der relativen Luftfeuchte ein gewisser Zusammenhang mit der CO_2-Konzentration feststellen. In der Nacht erreicht die Luftfeuchte konstant hohe Werte, daher lassen nur schwerlich Rückschlüsse auf den CO_2-Gehalt ziehen. Es zeigt sich allerdings, dass sich bei verhältnismäßig hoher Luftfeuchte zur Tageszeit, die Amplituden des typischen CO_2-Tagesgangs sehr viel geringer ausbilden. Die relative Luftfeuchte hat dabei keinen direkten Effekt auf die CO_2-Konzentration, sondern dient vielmehr als Indikator für die vorherrschenden Wetterbedingungen. So kommt es zu relativ hoher Luftfeuchte am Tag eher bei Tiefdruckwetterlagen, in der die Globalstrahlung nicht so dominant auftritt und sich eher labile atmosphärische Austauschbedingungen bilden. Auch sind höhere Windgeschwindigkeiten zur Tageszeit wie auch in der Nacht möglich, dabei ist eine Anreicherung von CO_2 oftmals nur bedingt möglich, wenn überhaupt. In Abbildung 31 zeigt das Beispiel eines Wochenverlaufs der relativen Luftfeuchte den indirekten Zusammenhang mit der CO_2-Konzentration. An zwei Tagen mit konstant hoher relativer

Luftfeuchte (15.4.08 und 19.4.08) fällt der nächtliche Anstieg der CO_2-Konzentration relativ gering aus.

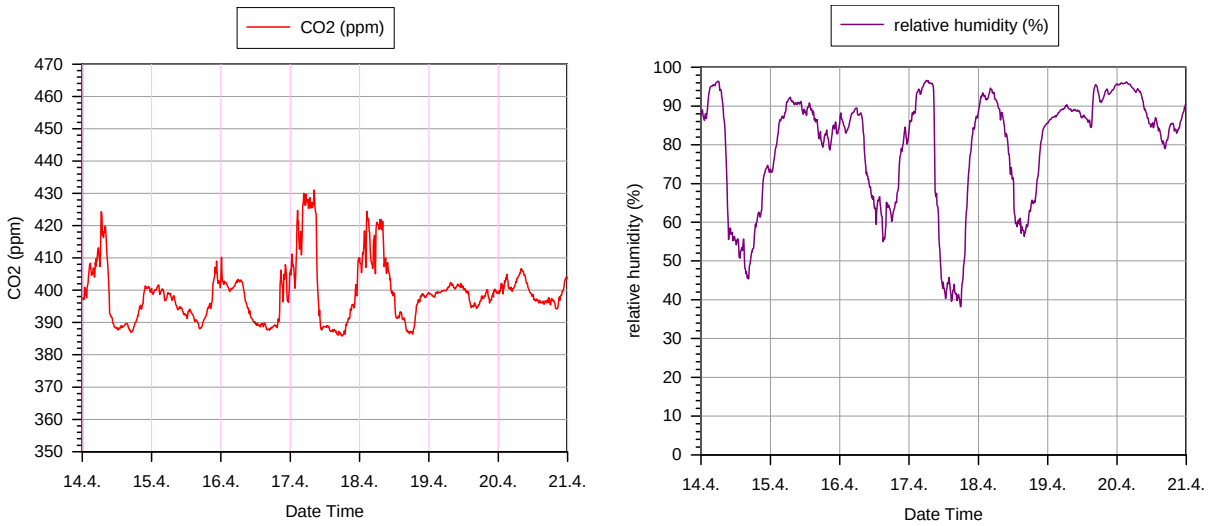


Abb. 31: Wochenverlauf der relativen Luftfeuchte verglichen mit der CO_2-Konzentration im gleichen Zeitraum (14.4.08 – 20.04.08), MPI Biogeochemie, Jena

4.4.5 Niederschlagsereignisse

Eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung der CO_2-Werte kann durch den Niederschlag erfolgen. Hierbei wurde eine Art „Rainout"- oder „Washout-Effekt" beobachtet, wodurch der CO_2-Wert infolge eines Niederschlagsereignisses absinkt (JÄSCHKE & UHSE 2000). Solche Ergebnisse sind allerdings mir Vorsicht zu genießen, da Niederschlagsereignisse oftmals mit veränderten Wetterbedingungen eintreten, welche ebenfalls einen Effekt auf die CO_2-Konzentration haben können. Typisch wäre eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit, welche bereits im Kapitel **4.4.2** als in negativer Korrelation zum CO_2-Gehalt bestimmt wurde. Dies macht eine Quantifizierung eines „Rainout-Effekts" schwierig, bzw. die Bestimmung eines Einflusses des Niederschlags. Betrachtet man die Ergebnisse dieses Datensatzes, so zeigt sich bei ausgeprägten Niederschlagereignissen sehr wohl ein Absinken der CO_2-Konzentration. Abbildung 32 zeigt nach dem jeweiligen Eintreten des Niederschlagsereignisses um ca. 18:00 Uhr, 9.4.08 und um 21:00, 11.4.08 ein kurzfristiges Absinken der CO_2-Konzentration zum etwa gleichen Zeitpunkt. Allerdings steigt der CO_2-Wert beim ersten gezeigten Ereignis wieder leicht um ca. 5 ppm an noch während Niederschlag gemessen wurde. Nichtsdestotrotz lässt sich das Vorkommen eines solchen „Rainout"-Effekts nicht gänzlich ausschließen, es könnte auch ein geringer zusätzlicher Einfluss sein, zu den stärker ins Gewicht fallenden Änderungen in der Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

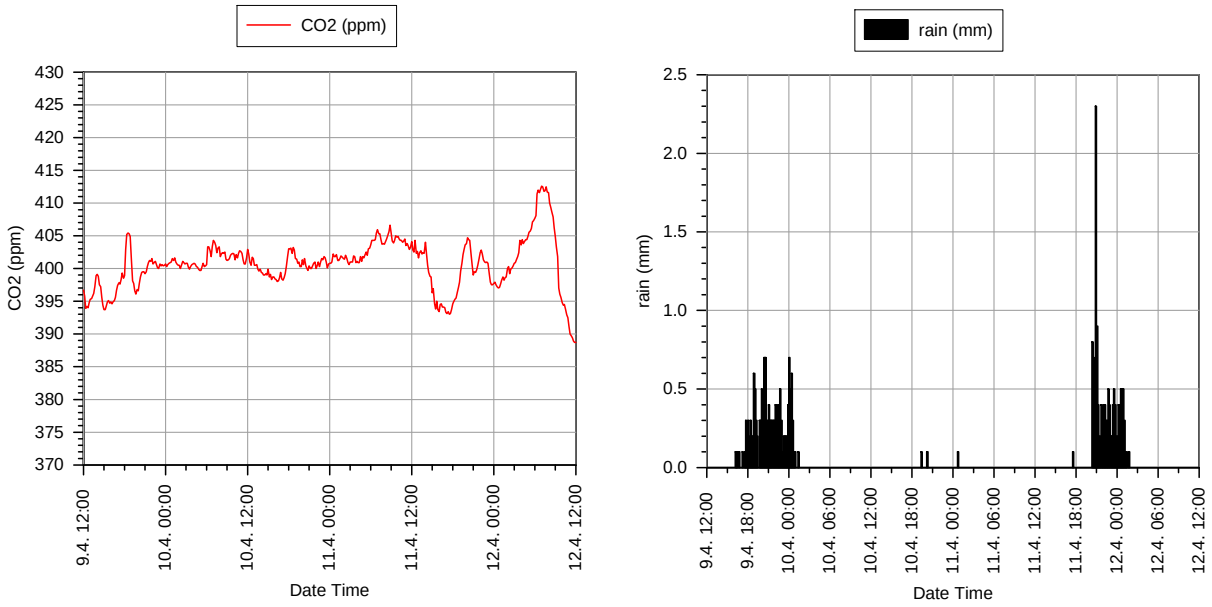


Abb. 32: Möglicher Einfluss von zwei Niederschlagsereignissen auf die CO_2-Konzentration in dem Zeitraum 9.4.08 12:00 Uhr bis 12.4.08 12:00 Uhr, MPI Biogeochemie, Jena

4.4.6 Windrichtung

Es konnte angenommen werden, dass deutliche Effekte der Windrichtung in den Ergebnissen sichtbar werden, da man schon auf relativ kurzer Distanz zwischen Emissionen aus der Stadt und den Emission aus ländlicher Richtung differenzieren kann. Eine grobe Eingrenzung für die Windrichtung aus der Stadt wäre für den Standort MPI Biogeochemie, Jena die Spanne NNO (30º) bis SSO (150º). Die Ergebnisse zeigen allerdings, dass es relativ schwierig ist, eine kurzfristige Veränderung der CO_2-Konzentration anhand von Variationen in der Windrichtung festzumachen.

Über den gesamten Messzeitraum kam man die vorherrschende Windrichtung als südwestlich bezeichnen. Der Wert pendelte sehr oft in dem Bereich zwischen 200º und 250º, was eher einem Einzugsgebiet aus ländlicher Richtung entspricht. Allerdings ist es schwierig bei Richtungsänderungen mehr zu der Stadt hin eine direkte Abhängigkeit der CO_2-Konzentration zu finden. Es treten über den gesamten Zeitraum zwei Perioden über 2-3 Tage auf, an welchen infolge einer Tiefdruckwetterlage die dominante Windrichtung in Nordost-Wind wechselt. Aufgrund sehr labiler atmosphärischer Bedingungen mit hohen Windgeschwindigkeiten bleibt der CO_2-Wert in diesen Zeiträumen relativ konstant. Auffällig ist, dass im Vergleich zu ähnlichen Bedingungen bei Südwest-Wind, die durchschnittliche CO_2-Konzentration rund 10 ppm höher angesiedelt ist. Dies deutet auf ein emissionsreicheres Einzugsgebiet hin, welche in diesem Fall die Stadt Jena, aber auch Ballungsgebiete Erfurt, Weimar oder Halle sein könnten, da diese Windtrajektorien durch das Tal transportiert würden und aus der Sicht von unserem Standort aus nordöstlicher Richtung kommen würden. Eine dieser Perioden ist auf Abbildung 33 zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass in den tageszeitlichen Variationen kleinere Peaks (im Bereich von 2-4 ppm) auftreten, ungefähr zu den Tageszeiten um 7:00 und 18:00 Uhr. Ob sich diese kleinen Maxima eindeutig dem Berufsverkehr in der Stadt zuordnen lassen, bleibt zumindest fraglich, da bei ähnlichen Bedingungen bezüglich der Windrichtung auch öfters keine solchen Peaks notiert werden konnten.

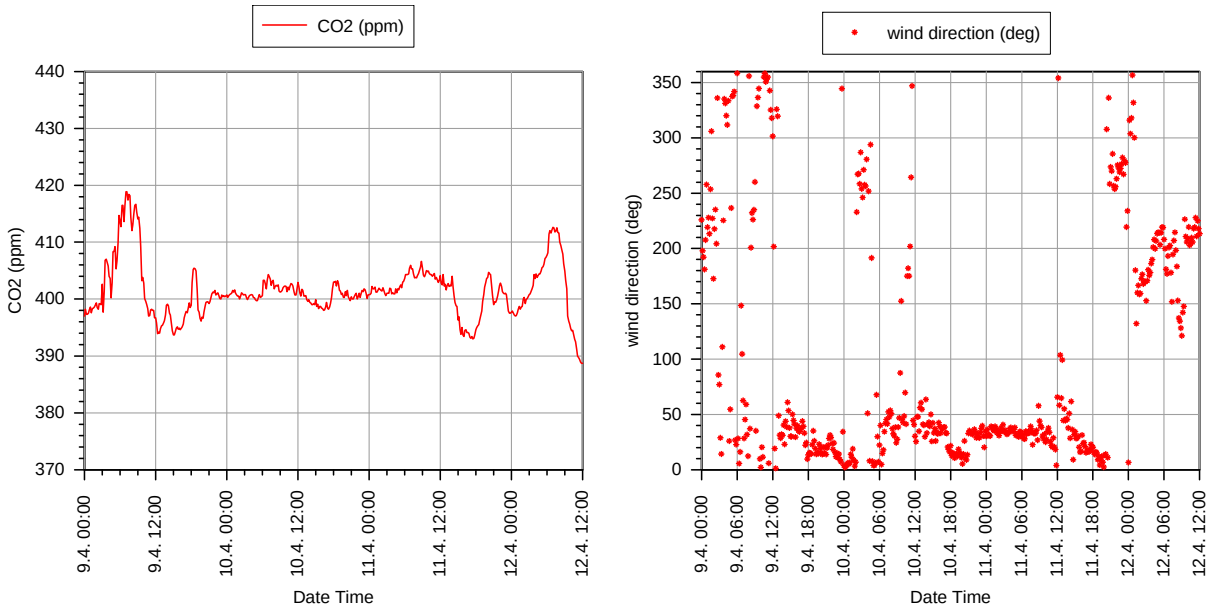


Abb. 33: CO_2-Konzentration bei relativ konstanter nordöstlicher Windrichtung (9.4.08 0:00 – 12.4.08 12:00), MPI Biogeochemie, Jena

Es gibt allerdings auch Beispiele, bei denen eine Windrichtung aus dem emissionsreichen Gebiet Stadt Jena nicht zu einer Zunahme der CO_2-Konzentration geführt hat. Das Problem besteht darin, dass oftmals keine genaue Zuordnung möglich ist. Bei dem morgendlichen Peak kann es sich um ein Resultat des morgendlichen Automobilverkehrs oder der Beendigung der nächtlichen CO_2-Anreicherung aufgrund der einfallenden Globalstrahlung handeln. Wahrscheinlich ist, dass der Effekt des Berufsverkehrs in Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren zu dem eigentlichen Maximum im bestimmten Maße addiert werden kann. Zusammenfassend gesagt, ist es nicht leicht, das Auftreten von Emissionen aus dem morgendlichen Berufsverkehr direkt zu identifizieren, jedoch gibt es sehr wohl vereinzelte Beispiele eines signifikanten Peaks. Abbildung 34 zeigt sehr gut die Veränderung der Windrichtung ab 6:00 Uhr in Richtung Südosten (später am Tage nordöstliche Richtung). Damit werden günstige Bedingungen für den Transport von Emissionen aus dem morgendlichen Berufsverkehr geschaffen. Der zugehörige Peak fällt in diesem Diagramm sehr ausgeprägt aus und erreicht eine Differenz von fast 20 ppm. Allerdings zeigt dieses Beispiel auch, dass eine günstige Windrichtung nicht mit Sicherheit zum Auftreten eines Peaks führt, der abendliche verstärkte Automobilverkehr lässt sich nur erahnen, die kleineren auftretenden Peaks sind wohl eher der beginnenden nächtlichen Anreicherung von Kohlendioxid zuzuordnen.

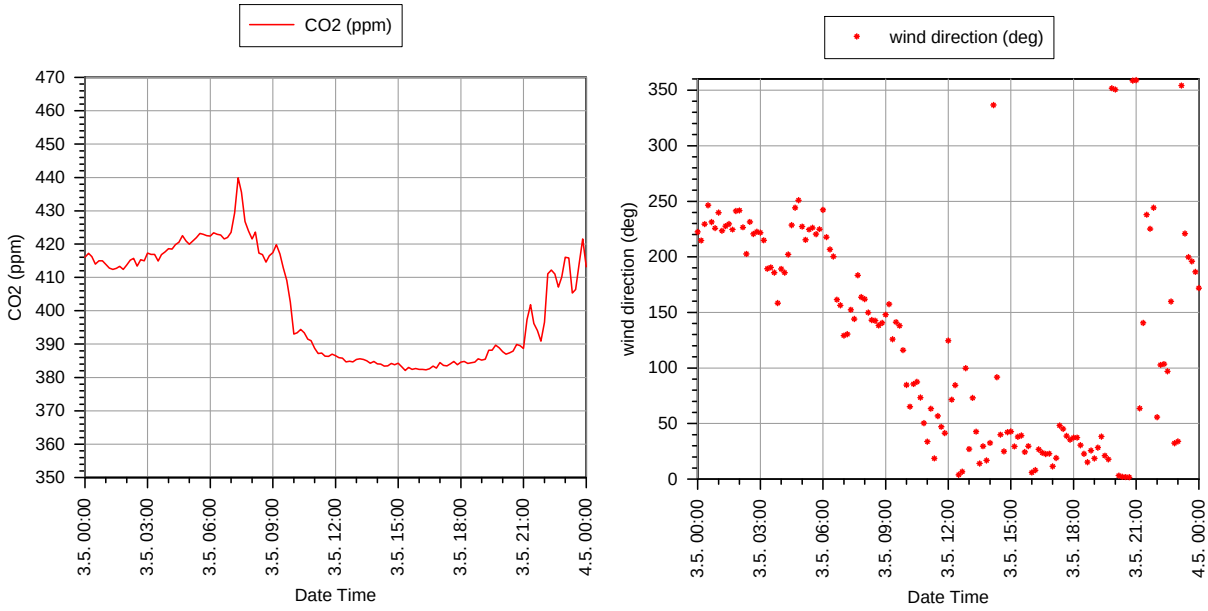


Abb. 34: Auftreten des Berufsverkehrs in der CO_2-Konzentration anhand günstiger Windrichtung am 3.5.08, MPI Biogeochemie, Jena

Den wohl größten und entscheidendsten Effekt in unserer Messreihe haben variierende Windrichtungen auf den Ablauf der CO_2-Anreicherung während stabiler atmosphärischer Schichtungsverhältnissen. Die in vorherigen Kapiteln beschriebenen nächtlichen Fluktuationen treten wohl in Abhängigkeit von variierender Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf. Besonders beim Auftreten von Inversionslagen kommt es bei niedriger Windstärke zu einem fluktuierenden Verlauf der Windrichtung. Ein Einzelbeispiel ist bereits in Abbildung 21 gegeben, auf Abbildung 35 sieht man den gleichen Effekt über einen Zeitraum von drei Tagen, in dem sich jede Nacht Inversionslagen ausgebildet haben. Die nächtlichen Variationen in der Windrichtung betragen ca. 90°, die Fluktuationen während des CO_2-Anstiegs können bis zu 15 ppm erreichen.

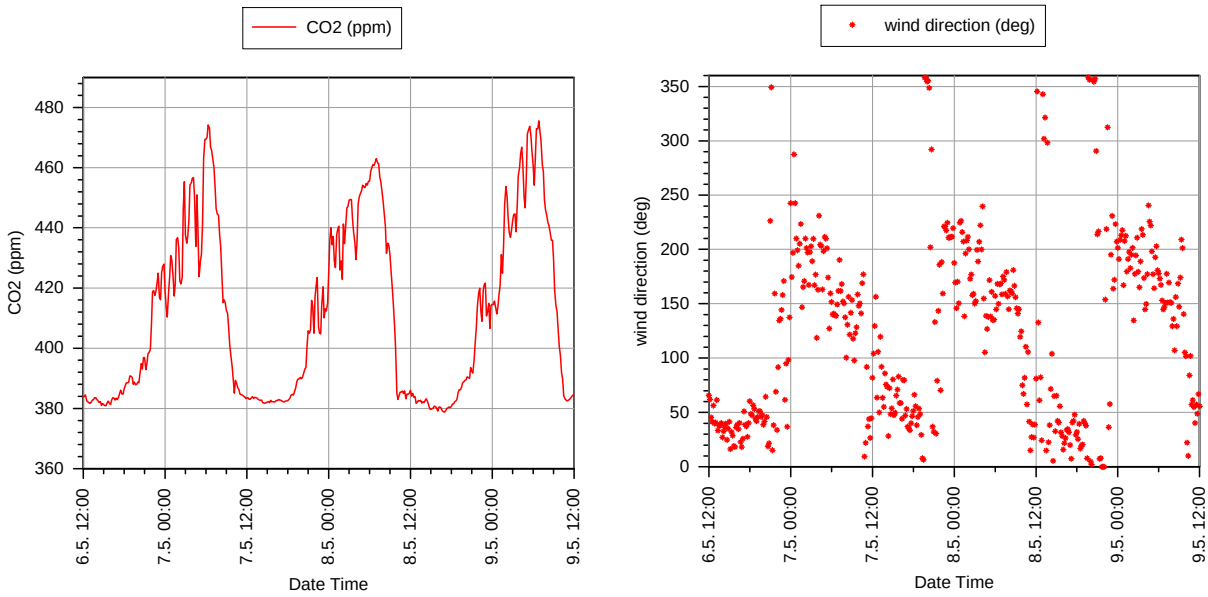


Abb. 35: Nächtliche Fluktuationen in CO_2-Konzentration und Windrichtung im Zeitraum 6.5.08 12:00 Uhr – 9.5.08 12:00 Uhr, MPI Biogeochemie, Jena

4.4.7 Anthropogene Emissionen

Es wurde schon im Abschnitt **4.1** gezeigt, dass jahreszeitabhängige Emissionen wie der Hausbrand bzw. Heizkraftwerke nur schwerlich in diesem Datensatz zu identifizieren sind. Der Messzeitraum der Datenreihe ist mit drei Monaten relativ kurz und der Verlauf der Tagesmittelwerte steigt bis Mitte Mai noch leicht an (Abb. 17), wodurch diese Emissionen in dieser Datenreihe nicht ersichtlich werden. Es ist allerdings zu erwarten, dass bei einem Zeitraum über ein Jahr, gewisse Effekte zu erkennen sind, besonders würde man dies bei winterlichen Tagesgängen sehen, wo bei Inversionslagen selbst im Winter immer noch relativ hohe CO_2-Werte erzielt werden könnten.

Konstante Emissionsquellen beispielsweise aus der Industrie in der Umgebung wurden möglicherweise zum Teil identifiziert. Es ist wahrscheinlich, dass die leicht höheren CO_2-Konzentrationen (im Bereich von 10 ppm) zu zwei Perioden mit nordöstlicher Windrichtung in Verbindung mit den Emissionen aus Jena, aber auch möglicherweise aus den Städten Weimar, Erfurt und Halle, gebracht werden können (Abb. 33).

Bei die tageszeitabhängigen Emissionen konnte das morgendliche Maximum an Emissionen durch den Berufsverkehr nur bedingt identifiziert werden konnte, ein Beispiel wäre Abbildung 34. Besonders in den Monaten April und Mai steigt die Konzentration während des morgendlichen Berufsverkehrs ungefähr auf das Maximum der nächtlichen CO_2-Anreicherung, Es ist denkbar, dass in dem Zeitraum diese zusätzliche CO_2-Quelle das Maximum etwas stärker ausbildet bzw. den Grad der Abnahme des CO_2-Gehalts nach Sonneneinwirkung etwas schwächt. Auffällig ist, dass in der Woche mit den ausgeprägtesten Maxima am Morgen die Windrichtung günstig lag in Hinblick auf Emissionen aus der Stadt Jena. Eine Quantifizierung kann jedoch nicht so leicht erstellt werden, es wird aber in verschiedenen Publikationen die Möglichkeit einer Isotopen-Analyse (z.B. WIDORY & JAVOY 2003) beschrieben.

Der abendliche Berufsverkehr ist schwieriger zu identifizieren, oftmals ist eine eindeutige Zuordnung nicht möglich, da in Frage kommende Peaks sehr gering ausfallen und nicht immer zum gleichen Zeitpunkt auftreten. Es ist eher wahrscheinlich, dass der in die Länge gezogene abendliche Automobilverkehr zu den hohen nächtlichen CO_2-Konzentrationen beiträgt. Die Windrichtung ist hierbei weniger relevant, da die Anreicherung sich wie ein ansteigender See im Saaletal verhält. Von Bedeutung ist die Windrichtung eher in Bezug auf die auftretenden nächtlichen Fluktuationen. Es bleibt festzuhalten, dass die Wahl des Standorts einen erheblichen Einfluss auf die nur teilweise auftretenden Emissionen in der gemessenen CO_2-Konzentration nimmt. Direkt im Stadtgebiet sind deutlich höhere CO_2-Werte zu erwarten. Ferner könnten die Auswirkungen des Automobilverkehrs klarer nachgewiesen werden.

Eine Reihe von Autoren (z.B.: IDSO et al. 2002, NASRALLAH et al. 2003) beschreiben eine niedrigere CO_2-Konzentration an einem Wochenende bzw. Feiertagen einem Werktag. Um dies auf unsere Ergebnisse zu übertragen, wurde für jede Woche die CO_2-Gesamtkonzentrationen von den zugehörigen Werktagen bzw. Wochenende gemittelt (Abb.36):

	Werktag (ppm)	Wochenende (ppm)
Woche 1 (27.2.-2.3.)	398,8	391,2
Woche 2 (3.2.-9.3.)	396,6	407,3
Woche 3 (10.3.-16.3.)	393,4	401,2
Woche 4 (17.3.-23.3.)	392,1	394,2
Woche 5 (24.3.-30.3.)	398,2	392,8
Woche 6 (31.3.-6.4.)	398,9	397,6
Woche 7 (7.4.-13.4.)	400,1	399,3
Woche 8 (14.4.-20.4.)	399	399,3
Woche 9 (21.4.-27.4.)	398,8	404,5
Woche 10 (28.4.-4.5.)	398,9	404,5
Woche 11 (5.5.-11.5.)	410,3	405,7
Woche 12 (12.5.-18.5.)	404,5	403,2
Mittelwert	399,13	400,07

Abb. 36: Unterscheidung zwischen CO_2-Konzentration an Werktagen und Wochentagen über den gesamten Messzeitraum, Standort MPI Biogeochemie, Jena

Es wird deutlich, dass ein solcher Trend in diesem Datensatz nicht auszumachen ist. Vielmehr lässt sich an dem Mittelwert über den gesamten Zeitraum erkennen, dass der CO_2-Wert am Wochenende durchschnittlich um 1 ppm höher ausfällt als der Wert an einem Werktag. Es ist also davon auszugehen, dass meteorologische Bedingungen einen weit größeren Effekt haben. Eine Differenzierung der jeweiligen Wetter- und Witterungsverhältnisse wäre sinnvoll, jedoch gestaltet sich dies schwierig, da zum Beispiel die Windrichtung innerhalb einer Woche stark variiert. Folglich ist eine Differenzierung des Automobilverkehrs zwischen Werktag und Wochenende kaum möglich. Ebenfalls fällt es schwer, Ganztagesverhältnisse anhand der Windstärke zu differenzieren, da es sehr oft zu einem ausgeprägten Tagesgang der Windgeschwindigkeit kommt, ähnlich zu Abbildung 26. Für eine Analyse eignet sich die Woche 11 (5.5.-11.5.), in welcher es ausschließlich zu Hochdruckwetterlagen kam. Weiterhin stellten sich während der Tageszeit (ca. 10:00 – 22:00 Uhr) schwache Windverhältnisse ein mit einer zu dieser Zeit dominierenden nordöstlicher Windrichtung. Mit einer solchen Eingrenzung zeigt sich für das Beispiel von Woche 11 ein beträchtlicher Unterschied von ca. 3,3 ppm (Abb. 37). Die Betrachtung bezieht sich lediglich auf eine Woche, folglich kann sie nicht die Grundlage einer repräsentativen Aussage für die gesamte Messreihe darstellen. Geeignet wäre eine Studie über einen längeren Zeitraum mit ähnlichen meteorologischen Bedingungen und günstiger Windrichtung.

Tag (10:00-22:00 Uhr)	Werktag (ppm)	Wochenende (ppm)
05.05.08	389,01	
06.05.08	387,56	
07.05.08	387,25	
08.05.08	384,92	
09.05.08	387,04	
10.05.08		384,59
11.05.08		382,96

Mittelwert	387,16	383,78

Abb. 37: Vergleich der Tagesmittelwerte für die Zeit 10:00-22:00 Uhr in Woche 11 (5.5.08-11.5.08), Standort MPI Biogeochemie, Jena

4.5 Vergleich zur Messstation auf Waldfläche (Hainich)

Der Gesamtüberblick der Ergebnisse der Station am Hainich (auf 42m) zeigt, dass hier der erwartete Jahresgang auch für einen Zeitraum von drei Monaten viel eher zu erkennen ist. Von Anfang März an ist ein kontinuierliches Absinken zu verzeichnen, dies wird auch deutlich wenn man den Verlauf der Tagesmittelwerte zur Geltung kommen lässt.

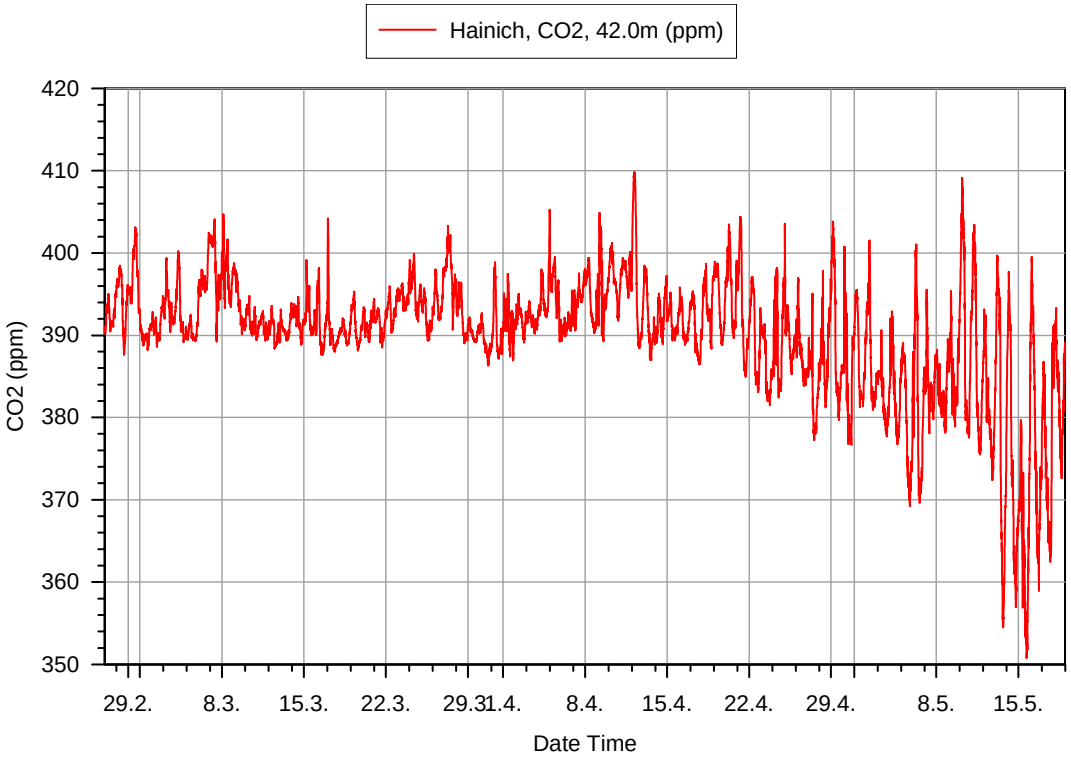


Abb. 38: CO_2-Konzentration an der Station Hainich für den Zeitraum 27.2.08 – 18.5.08

Des Weiteren lässt sich festhalten, dass die maximalen CO_2-Konzentrationen (409,8 ppm) nicht annähernd die maximalen Werte an unserer Station (483,7 ppm) erreichen. Eine noch größere Differenz ergibt sich zu den wesentlich höheren maximalen Konzentrationen an der Station Gebesee (bis ca. 650 ppm) auf landwirtschaftlicher Fläche. Dies ist ein deutliches Indiz dafür, dass im Hainich die anthropogenen Emissionen des Umlands eine eher untergeordnete Rolle einnehmen und wie erwartet die CO_2-Konzentration hauptsächlich von den natürlichen Quellen und Senken abhängt. Nimmt man diesen sehr einfachen Vergleich, könnte man daraus schließen, dass die kurzfristig Einfluss nehmenden (das globale Gesamtbild ausgeschlossen) anthropogenen Emissionen an unser Station bis zu 70 ppm in der Nacht betragen können. Allerdings muss auch in Betracht gezogen werden, dass die erfassten CO_2-Konzentrationen an der Hainich-Station in 42 m Höhe über den Baumkronen genommen wurden. Es ist wahrscheinlich, dass in dieser Höhe die Effekte einer stabilen atmosphärischen Schichtung nicht mehr ganz so deutlich zu spüren sind und dass die Windgeschwindigkeit in der Nacht vergleichsweise höhere Werte

einnimmt. Sozusagen wäre die Anreicherung der natürlichen Quellen (Dunkelatmung, Bodenatmung) in dieser Höhe nicht so effektiv wie bei unserer Messstation. Dazu kommt die unterschiedliche geographische Lage, denn es wurde bereits angesprochen (**4.4.1**), dass die Lage von Jena im Saaletal günstig für die Ausbildung von Inversionen ist. Die Situation an der Station im Hainich muss man differenziert betrachten. Die Station ist in größerer Höhe gelegen, in der generell geringere CO_2-Konzentrationen zu erfassen sind und die Lage ist eher auf einer Erhebung denn im Tal. Dies deutet auf eine kleinere Anzahl von Inversionen im Messzeitraum hin. Auch ist der Grad der stabilen Schichtung der Atmosphäre als ein geringerer einzuschätzen als im Saaletal von Jena. Abbildung 39 zeigt, dass für einen beispielhaften Wochenverlauf (28.4 – 4.5) die Ausprägung der CO_2-Konzentrationen an beiden Standorten sehr unterschiedlich verläuft. Dies weist auf Unterschiede bezüglich der atmosphärischen Bedingungen an beiden Standorten hin.

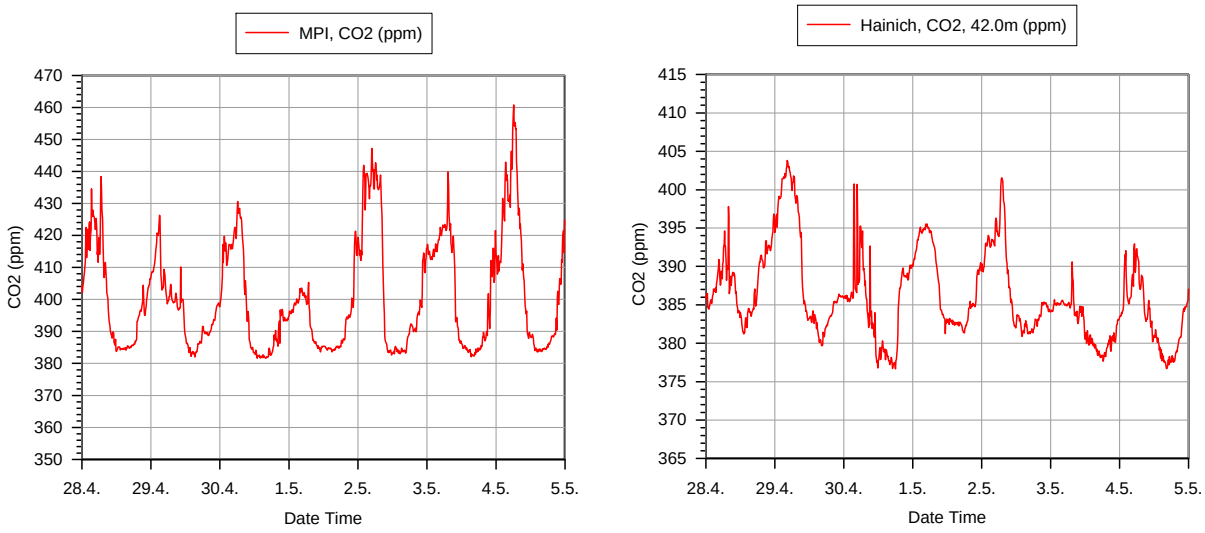


Abb. 39: Vergleich eines Wochenverlaufs (28.4.08 – 4.5.08) der CO_2-Konzentration an den Standorten MPI Biogeochemie, Jena und Hainich.

Auffällig ist im Hainich, dass die Ausprägung der minimalen Amplitude mit fortschreitender Jahreszeit zunimmt, welches eindeutig der ansteigenden Photosynthese zuzuordnen ist. Die minimalen CO_2-Konzentrationen am Tage sinken von ca. 390 ppm Anfang März zu 350 ppm Mitte Mai. Die Ausprägung der maximalen Amplitude zeigt keinen solch klaren Anstieg, obwohl es zum Teil zu erwarten wäre aufgrund erhöhter Dunkelatmung und Bodenatmung. Man erkennt zwar im Gesamtbild, dass die Amplitude an sich leicht vergrößert erscheint, allerdings sinken die maximalen Konzentrationen besonders im Monat Mai leicht ab. Der maximale Wert wurde mit 409,8 ppm am 12.4.08 gemessen. Der Grund liegt darin, dass der Effekt der Photosynthese die nächtliche Respiration und die Bodenatmung bei weitem übertrifft und in diesem Zeitraum des verstärkten Pflanzenwachstums der Wald als deutliche CO_2-Senke fungiert. Ebenfalls könnten die positiven Ausprägungen von bis 10 ppm, die vor Einsetzen des Frühlings auftreten, günstig liegenden Windtrajektorien zugeschrieben werden, die gehobene anthropogene Emissionen transportieren oder auch der vergleichsweise stärkere stabile Schichtungen in der Atmosphäre zum Ende des Winters.

4.6 Vergleich zur Messstation auf landwirtschaftlicher Fläche (Gebesee)

Der Gesamtüberblick der Ergebnisse auf einer landwirtschaftlichen Fläche nördlich von Erfurt gelegen (Gebesee) liefert auf den ersten Blick vergleichsweise sehr hohe CO_2-Konzentrationen mit einem maximalen Wert von 652,99 ppm. Analysiert man den Verlauf der maximalen Konzentration über den Zeitraum von drei Monaten, ist ein deutlich höherer Verlauf zu verzeichnen und der Anstieg verläuft ebenfalls rapider als an unserer Station.

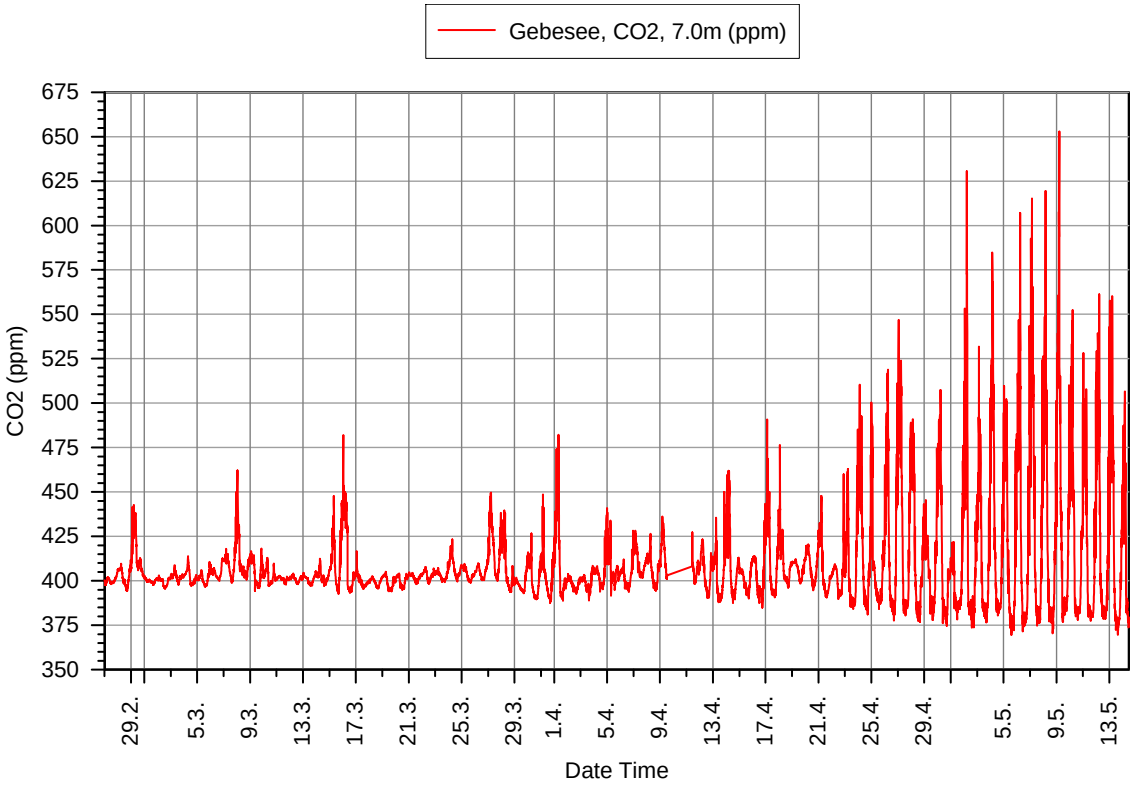


Abb. 40: Verlauf der CO_2-Konzentration an der Station Gebesee, Höhe 7 m, für Zeitraum 27.2.08 – 14.5.08, mit Datenausfall zwischen 9.4.08 -11.4.08.

Ein wesentlicher Grund kann die mit 7m vergleichsweise geringe Höhe der Datenerfassung der CO_2-Konzentration sein. Besonders in der Nacht ist deutlich zu spüren, dass der CO_2-Wert mit sinkender Höhe von der Oberfläche aus zunimmt. Bei unserer Station ist dies in zweierlei Hinsicht wichtig. Erstmal ist die Ansaugung der Außenluft auf 10 m Höhe auf dem Dach des MPI Biogeochemie angebracht, allerdings wird der Effekt der vergleichsweisen hohen Lage durch die starke Hanglage etwas minimiert. Geeigneter ist der Vergleich mit einer möglichen Messstation direkt im Saaletal auf Höhe der Saale. Wie bereits angesprochen reichert sich das Kohlendioxid wie in einem ansteigenden See an, und daher würden direkt im Tal weitaus höhere Konzentrationen in der Nacht gemessen werden vergleichbar zu denen an der Station Gebesee, die sich ebenfalls in einer kleinen Senkung im Vergleich zum Umland befindet.

Sehr wichtig für das Zustandekommen der hohen Konzentrationen an der Station Gebesee ist auch die landwirtschaftliche Nutzung. Besonders in den Monaten April und Mai wird der weitflächige Anbau von Winterweizen deutlich spürbar. Bei diesem verstärkten Pflanzenwachstum nimmt die Dunkelatmung stark zu und lässt sich auf dieser Höhe gut

nachweisen. Hinzu kommt die Bodenatmung, da eingearbeitete Ernterückstände von Mikroorganismen zersetzt werden, und deren Aktivität durch zusätzliches Nährstoffangebot (Düngung) gefördert wird. Ebenfalls könnten bei günstiger Windrichtung die anthropogenen Emissionen aus den Städten Erfurt, Gotha oder Sömmerda einen erheblichen Einfluss auf die CO_2-Konzentration nehmen.

Sieht man von den Differenzen in dem Ausmaß der maximalen Konzentration ab, lässt sich eine sehr gute Korrelation zwischen dem Verlauf der CO_2-Konzentrationen an unserer Station und der Station Gebesee erkennen. Das ist insofern erstaunlich, da niedrigere Tageswerte für Gebesee erwartet wurden, da mit Einsetzen des Frühlings das Pflanzenwachstum der Agrarfläche stark zunimmt und Photosynthese einen erheblichen Effekt zeigen sollte (ähnlich dem Pflanzenwachstums im Hainich), welcher stärker ausfällt als an der Station MPI Biogeochemie, Jena. Man kann annehmen, dass die Bodenatmung auch am Tage durch die erhöhten Temperaturen einen erheblichen Effekt auf die gemessene CO_2-Konzentration hat und besonders auf der landwirtschaftlichen Fläche den Effekt der Photosynthese stark abschwächt (Zersetzung von Ernterückständen + Wurzelatmung). Vielmehr ist jedoch eine direkte Verbindung zwischen Bodenatmung und Photosynthese zu beobachten, da wie im Kohlenstoff-Kreislauf beschrieben (**2.2**), das emittierte Kohlendioxid durch Bodenatmung direkt wieder durch Photosynthese für die Pflanzen nutzbar gemacht wird.

Betrachtet man Wochenverläufe aus dem Messzeitraum, in denen verschiedene Schichtungen der Atmosphäre in der Nacht aufgetreten sind (Inversionsanalyse, **4.4.1)** kann man viele Gemeinsamkeiten mit der Station Gebesee finden (Abb. 41). Ein Grund dafür ist, dass sich auch die Station Gebesee ähnlich wie Jena in einer Senkung befindet. Vergleicht man einen speziellen Wochenverlauf der CO_2-Konzentration mit wechselnden atmosphärischen Bedingungen, erkennt man sehr schön, wie sich die ausgeprägten Tagesgänge an den gleichen Tagen gebildet haben. Dies deutet auf Ausbildung von Inversionen an beiden Standorten hin. Daraus lässt sich schließen, dass sich die geographische Lage der Station MPI, Biogeochemie viel eher dem Standort Gebesee gleicht als der vergleichsbare Standort Hainich, wo solche gemeinsamen Effekte nicht so deutlich zu identifizieren waren.

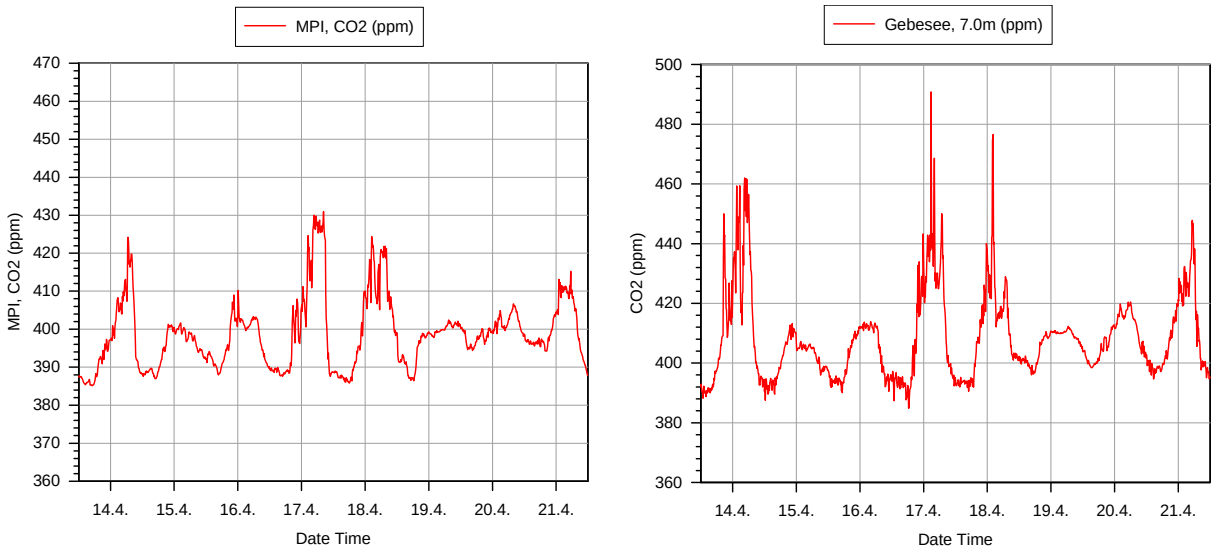


Abb. 41: Vergleich der CO_2-Konzentration über den Zeitraum von 8 Tage (13.4.08, 12 Uhr – 21.4.08, 12 Uhr) an den Standorten MPI Biogeochemie, Jena und Gebesee.

5 Diskussion

Aus dem in den Monaten Januar und Februar realisierten Projekt einer CO_2-Messstation auf dem Dach des MPI Biogeochemie, Jena ergaben sich zeitlich hochauflösende CO_2-Messungen für einen Zeitraum von ca. drei Monaten (27.02.08 – 18.05.08). Eine qualitative Analyse des resultierenden Verlaufs der CO_2-Konzentration führte zu sehr vielseitigen Ergebnissen.

In Kombination mit den Messwerten anderer meteorologischen Größen an der Wetterstation MPI Biogeochemie, Jena sowie den Daten aus zwei Umlandsstation im Hainich und in Gebesee konnte ein Vergleich auf mehreren Ebenen erstellt werden. Dieser konnte ebenfalls für unterschiedliche Zeiträume analysiert werden.

In vielen Fällen ließ sich ein bestimmter Effekt der verschiedenen meteorologischen Einflussgrößen beobachten. Den größten Einfluss auf die positive Veränderung der CO_2-Konzentration haben für dieses Messgebiet die unterschiedlichen atmosphärischen Schichtungsverhältnisse. In stabilen Verhältnissen konnten Werte bis zu 480 ppm in der Nacht gemessen werden. Es konnte eine erhebliche Beeinflussung durch die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung nachgewiesen werden. Beispielsweise wurden solche hohen CO_2-Werte nie bei verhältnismäßig hohen Geschwindigkeiten gemessen. Die Messwerte der photosynthetisch aktiven Strahlung zeigten, dass nicht unbedingt maximale Strahlung für maximale Photosynthese-Leistung benötigt wurde, da sehr niedrige CO_2-Werte auch bei einem nicht optimalen Strahlungsangebot zustande kamen. Darüber hinaus konnten Niederschlagsereignisse und die relative Luftfeuchte zu dem CO_2-Gehalt in der Atmosphäre assoziiert werden. Sie zeigten aber auch, dass in vielen Fällen eine einseitige Betrachtung der CO_2-Konzentration mit Bezug nur auf eine meteorologische Einflussgröße oft nicht möglich ist. Vielmehr ist es ein Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren der Meteorologie, die den Verlauf der CO_2-Konzentration beeinflussen. So treten Inversionslagen, die gute Bedingungen für eine CO_2-Anreicherung bieten, oftmals als ein Effekt der negativen Strahlungsbilanz der Erdoberfläche auf. Der Tagesgang der Windgeschwindigkeit kann erheblich beeinflusst werden von den Strahlungsbedingungen und den damit verbundenen unterschiedlichen Schichtungen der Atmosphäre. Allerdings können sich auch ganz andere Windbedingungen einstellen infolge eines Tiefdrucksgebiets. Derlei Verknüpfungen lassen in vielerlei Hinsicht ziehen und deswegen müssen bei einer qualitativen Analyse des Verlaufs der CO_2-Konzentration alle denkbaren Einflussgrößen in Betracht gezogen werden.

Dies führt im Ergebnis dazu, dass sich die Variationen des CO_2-Gehalts nicht immer zweifelsfrei zuordnen lassen. Zum Beispiel besteht sehr wohl die Möglichkeit eines „Rainout“-Effekts, wobei die CO_2-Konzentration infolge eines Niederschlagsereignisses absinkt, allerdings könnte auch eine erhöhte Windgeschwindigkeit einhergehend mit dem Niederschlag zu der Verringerung führen.

Die Schwierigkeit der Zuordnung wird ganz besonders deutlich in Hinblick auf anthropogene Emissionen und deren Detektierung im Verlauf der CO_2-Konzentration. Es

stellte sich heraus, dass eine eindeutige Identifizierung anthropogener Emissionen viel seltener als erwartet möglich war. Damit sind insbesondere die Variationen des Automobilverkehrs in der Stadt gemeint. Mutmaßlich ist ein großer Teil des in der Nacht angereicherten Kohlendioxid anthropogener Herkunft. Dennoch ist es wahrscheinlich, dass die meteorologischen Bedingungen „dominiert" haben, und dass zum Beispiel der morgendliche Berufsverkehr eher als zusätzlicher Effekt zu dem Zeitpunkt auftritt. Da eine Quantifizierung schwierig ist, werden in der Literatur verschiedene Isotopen-Verhältnisse verwendet um auf die Herkunft des Kohlendioxids zu schließen (z.B. WIDORY & JAVOY 2003).

Das Auftreten von Emissionsquellen in größerer Entfernung konnte bei Betrachtung des CO_2-Verlaufs an unserer Messstation nur erahnt werden. Hier würde sich ein längerer Messzeitraum als günstig erweisen, innerhalb dessen die auftretenden dominanten Windrichtungen mit den zugehörigen CO_2-Konzentrationen verglichen werden. Ein weiteres Problem besteht im Standort der Messstation. Die Hanglage am Rand der Stadt Jena erschwert die Rückverfolgung bzw. das Auftreten von signifikanten Windtrajektorien, die gewissen Emissionsquellen zugeordnet werden können. Hier wäre ein Standort auf flacherem, offenerem Terrain oder in größerer Höhe besser geeignet.

Eine Analyse der jahreszeitlichen Variationen der CO_2-Konzentration konnte nur bedingt erstellt werden, der Zeitraum von drei Monaten stellte sich als zu kurz heraus. Entgegen der Erwartung eines allgemeinen Absinkens der CO_2-Konzentrationen im Zuge des Frühlingsbeginns, konnte ein solch negativer Gradient hinsichtlich der Tagesmittelwerte nicht erfasst werden. Vielmehr war ein Anstieg etwa bis zum 10. Mai zu beobachten. Für einen Zeitraum von einem oder mehreren Jahren könnte eine detailreichere aussagekräftigere Auswertung geschehen. Zum Beispiel ist es durchaus möglich, dass das Maximum Mitte Mai erreicht wurde und ab dann ein Absinken zu verzeichnen ist. Ebenfalls kann man über den längeren Zeitraum eine Eingrenzung hinsichtlich der meteorologischen Bedingungen erstellen um somit repräsentativere Aussagen über den Jahresverlauf zu bekommen.

Mit Hinblick auf die Ergebnisse aus der Literatur (in Kapitel **2** detailliert angesprochen) führte unsere Messreihe zu sehr vielfältigen Charakteristika. Wie vorher diskutiert, entsprachen die jahreszeitlichen Variationen nur zum Teil den Verlauf aus anderen Arbeiten (z.B. LEVIN et al. 1995). Die Maxima variieren hierbei zwischen Januar und Mai (auch abhängig von der Breitenlage). Vergleicht man die tageszeitlichen Variationen miteinander und die Entwicklung der Amplituden von März bis Mai, so kann unsere Messreihe eher den Ergebnissen aus ruralen Gebieten zugeordnet werden. Dies ist sehr erstaunlich, da sich die Messstation eigentlich im urbanen Gebiet von Jena befindet. Hierbei spielt möglicherweise die Hanglage am städtischen Rand eine Rolle. Die vielmals zitierten zwei Maxima im Tagesgang einer urbanen Fläche (z.B. AIKAWA et al. 1995) ließen sich nur vereinzelt und zu verschiedenen Zeitpunkten im Tagesablauf finden. Dabei wird umso mehr deutlich, dass der Standort für die Identifikation anthropogener Emissionen eher ungeeignet ist. Es ist definitiv zu erwarten, das bei einem Aufbau einer Messstation im direkten Stadtgebiet, das Auftreten des morgendlichen und abendlichen

Berufsverkehrs viel stärker ins Gewicht fallen würde, allerdings muss bei einem solchen auch eine geeignete Höhe gefunden werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Durchführung von mobilen CO_2-Messungen im urbanen Gebiet von Jena. IDSO et al. (2001) und auch HENNINGER (2005) verwenden diese Methode in den Städten Phoenix und Essen. Das Ziel besteht in einer räumlich und zeitlich hochauflösenden Darstellung des urbanen CO_2-Volumenmischungsverhältnisses sowie in der Berücksichtigung räumlich variierender Flächennutzungen. Darüber hinaus könnten sich die mikroklimatischen Bedingungen in einer Stadt räumlich gesehen verändern, was vor allen Dingen bei größeren Städten zu beobachten ist.

Ein interessanter Ansatz wäre auch ein Aufbau von verschiedenen CO_2-Messstationen im Raum Jena ähnlich dem Aufbau nach BERRY & COLLS (1990a &b). Dabei könnte man zusätzlich zu der Station am MPI Biogeochemie an Standort im direkten Stadtgebiet und einen Standort in umliegender ruraler Fläche wählen. Nach unseren Ergebnissen zu urteilen, bewegt sich die Messstation am MPI Biogeochemie zwischen den theoretischen Ergebnissen zu urbanen und ruralen CO_2-Gehalts (vgl. Kapitel **2.6**). Ein solcher Vergleich verschiedener Standorte könnte aufschlussreiche Ergebnisse liefern und man könnte versuchen diese Messstation dazwischen einzuordnen, zum Beispiel könnte die Klassifizierung „suburbaner Bereich“ lauten.

Insgesamt liefert die aufgebaute Messstation sehr viel Potential für zukünftige Analysen. Ein längerer Messzeitraum wird viel mehr Möglichkeiten für eine jahreszeitliche Analyse bieten. Ebenfalls sollte über mehrere Jahre der globale Anstieg der CO_2-Konzentration zu erfassen sein. Messungen in verschieden Höhen bzw. die Installation eines „Eddy Covariance“-Systems könnte interessante Aufschlüsse über den Fluss von Kohlendioxid in dieser speziellen Hanglage am Rand des städtischen Gebiets geben. Darüber hinaus können weitere Vergleiche zu vorhandenen Umlandsstationen angegangen werden, es könnte auch ein Vergleich zu höher gelegenen Stationen wie am Ochsenkopf, Fichtelgebirge durchgeführt werden. Weitere Möglichkeiten sind eine detailreiche Windtrajektorien-Analyse um weiter entfernte Emissionszentren möglicherweise zu erfassen: Dabei sollte die Wahl des Standorts gut überlegt sein, da die Lage der Messstation MPI Biogeochemie dafür nicht ideal ist.

Als interessanteste Fortführung dieser Arbeit kann der Aufbau von verschiedenen CO_2-Messstationen in gleicher Höhe im Raum Jena betrachtet werden. Es sind sehr unterschiedliche Ergebnisse aufgrund variierender Flächennutzungen zu erwarten und man könnte die Ergebnisse dieser Messstation viel besser einordnen. Auch könnten auf mikroskaliger Ebene unterschiedliche meteorologische Effekte zu beobachten sein, sowie unterschiedliche Einflüsse anthropogener Emissionen.

6 Literaturverzeichnis

AIKAWA, M., YOSHIKAWA, K., TOMIDA, M., AOTSUKA, F., & H. HARAGUCHI (1995): Continuous monitoring of the carbon concentration in the urban atmosphere of Nagoya, 1991-1993. In: Analytical Sciences, 11, 357-362.

ALLEN, L.H. (1969): Variations in carbon dioxide concentration over an agricultural field. In: Agricultural Meteorology, 8, 5-24.

ARDENNE, van, J.A., DENTENER, F.J., OLIVIER, J.C.J., KLEIN-GOLDEWIJK, C.G.M. & J. LELIEVELD (2001): A 1º × 1º resolution data set of historical anthropogenic trace gas emission for the period 1890-1990. In: Global Biochemical Cycles, 15(4), 909-928.

ARRHENIUS, S. (1896): On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature on the ground. In: Philosophical Magazine and Journal of Science, S. 5, Vol. 41, 237-276.

AUBINET, M., CHERMANNE, B., VANDENHAUTE, M., LONGDOZ, B., YERNAUX, M. & E. LAITAT (2001): Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. In: Agricultural and Forest Meteorology, 108, 293-315.

BAKWIN, P.S., TANS, P.P., ZHAO, C., USSLER, W. & E. QUESNELL (1995): Measurements of carbon dioxide on a very tall tower. In: Tellus, 47B, 534-549.

BAKWIN, P.S., TANS, P.P., HURST, D.E., & C. ZHAO (1998): Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program. In: Tellus, 50B, 410-415.

BAKWIN, P.S., DAVIS, K.J., YI, C., WOFSY, S.C., MUNGER, J.W., HASZPRA, L. & S. BARCZA (2004): Regional carbon dioxide fluxes from mixing ratio data. In: Tellus, 50B, 301-311.

BERRY, R.D. & J.J. COLLS (1990a): Atmospheric carbon dioxide and sulphur dioxide on an urban/rural transect-I. Continuous measurements at the transect ends. In: Atmospheric Environment, 24A (10), 2681-2688.

BERRY, R.D. & J.J. COLLS (1990b): Atmospheric carbon dioxide and sulphur dioxide on an urban/rural transect-II. Measurements along the transect. In: Atmospheric Environment, 24A (10), 2689-2694.

BIERWERTH, W. (2007): Tabellenbuch Chemietechnik. 6. Aufl., Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 381 S.

BORKEN, W., DAVIDSON, E.A., SAVAGE, K., GAUDENSKI, J. & S.E. TRUMBORE (2003): Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. In: Soil Science Society of America, 67, 1888-1896.

BROWN, C.W. & C.D. KEELING (1965): The concentration of atmospheric carbon dioxide in Antarctica. In: Journal of Geophysical Research, 70 (24), 6077-6085.

CLARKE, J.F. (1965): A meteorological analysis of carbon dioxide concentrations measured at a rural location. In: Atmospheric Environment, 3, 375-383.

CLARKE, J.F. & R.B. FAORO (1966): An evaluation of CO_2 measurements as an indicator of air pollution. In: Journal of the Air Pollution Control Association, 6, 212-218.

DETTINGER, M.D. & M. GHIL (1998): Seasonal and interannual variations of atmospheric CO_2 and climate. In: Tellus, 50B, 1-24.

EUGSTER, W. & F. SIGRIST (2000): The influence of the nocturnal CO_2 advection on CO_2 flux measurements. In: Basic and Applied Ecology, 1, 177-188.

FALBE, J. [Hrsg.] (1999): Römpp-Chemie Lexikon A-Z. 10. Aufl., Version 2.0, G. Thieme Verlag, Stuttgart.

FEIGE, G.W. & M. JENSEN (1995): Kohlenstoff-Kreislauf. In: KUTTLER, W. [Hrsg.]: Handbuch zur Ökologie. Bd. 1, 2. Aufl., Analytica Verlagsgesellschaft, Berlin 164-167.

FREUDIG, D. [Red.] (2001): Lexikon der Biologie. Bd. 6, Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg, 497 S.

FRÜHAUF, C. (1998): Verdunstungsbestimmungen von Wäldern am Beispiel eines Fichtenbestandes im Tharandter Wald. Tharandter Klimaprotokolle, Technische Universität Dresden.

GRIMMOND, C.S.B., KING, T.S., CROPLEY, F.D., NOWAK, D.J. & C. SOUCH (2002): Local-scale fluxes carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. In: Environmental Pollution, 116, S243-S254.

GUDERIAN, R. [Hrsg.] (2000): Handbuch der Umweltveränderung und Ökotoxikologie, Bd. 1B: Atmosphäre, Aerosol/Multiphasenchemie, Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen, Auswirkungen auf Strahlung und Klima, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 516 S.

HÄCKEL, H. (1990): Meteorologie. 2. Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 448 S.

HASZPRA, L. (1992): Carbon dioxide concentration measurements at a rural site of Hungary. In: Tellus, 47B, 17-22.

HEIMANN, M. & GERBIG, C. (2007/08): Klimatologie-Vorlesung an der Universität Jena. Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, www.bgc-jena.mpg.de/bgc-systems/lectures.

HENNINGER, S. (2005): Analyse der atmosphärischen CO_2-Konzentration am Beispiel der Stadt Essen, Essener Ökologische Schriften, Bd. 23, Westarp Wissenschaften-Verlag, Hohenwarsleben, 192 S.

IDSO, C.D., IDSO, S.B. & R.C. BALLING (2001): An intensive two-week study of an urban CO2 dome in Phoenix, Arizona, USA. In: Atmospheric Environment, 35, 995-1000.

IDSO, C.D., IDSO, S.B. & R.C. BALLING (2002): Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO_2 concentration within a residential sector of the urban CO_2 dome of Phoenix, AZ, USA. In: Atmospheric Environment, 36, 1655-1660.

JÄSCHKE, M. & K. UHSE (2000): CO_2-Messkampagne auf dem Feldberg/Schwarzberg. In: Jahresbericht 2000 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes, 77/01, 2-9.

KEELING, C.D., WHORF, T.P., WAHLEN, M. & J. VANDERPFLICHT (1995): Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. In: Nature, 375, 666-670.

KIEHL, J. T. & K.E. TRENBERTH (1997): Earth's Annual Global Mean Energy Budget. In: Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 197-208.

KIM, J. & S.B. VERMA (1990): Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem. In: Boundary-Layer Meteorology, 52, 135-149.

KOERNER, B. & J. KLOPATEK (2002): Anthropogenic and natural CO_2 emission sources in an arid environment. In: Environmental Pollution, 116, S45-S51.

KOLLE, O. (2007): Documentation of Logger Tools Software. Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena.

KUTTLER, W. (1995): Treibhauseffekt. In: KUTTLER, W. [Hrsg.]: Handbuch zur Ökologie, Bd. 1, 2. Aufl., Analytica Verlagsgesellschaft, Berlin, 452-457.

LARCHER, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 6.Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 408 S.

LEVIN, I., GRAUL, R. & N.B.A. TRIVETT (1995): Long-term observations of atmospheric CO_2 and carbon isotopes at continental sites in Germany. In: Tellus, 47B, 23-34.

MALBERG, H. (1997): Meteorologie und Klimatologie. 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 354 S.

MARTIN, C.A. & L.B. STABLER (2000): Seasonal amplitude and distribution of elevated atmospheric CO_2 in Phoenix, Arizona, USA. In: HortScience, 35 (3), 468.

MURAYAMA, S., SAIGUSA, N., CHAN, D., YAMAMOTO, S., KONDO, H. & Y. EGUCHI (2003): Temporal variations of atmospheric CO_2 concentration in a temperate deciduous forest in Central Japan. In: Tellus, 55B, 232-243.

NASRALLAH, B., BALLING, R.C., MADI, S.M. & L. AL-ANSARI (2003): Temporal variations in atmospheric CO_2 concentrations in Kuwait City, Kuwait with comparison to Phoenix, Arizona, USA. In: Environmental Pollution, 121 (2), 301-305.

OFFERLE, B., GRIMMOND, C.S.B., FORTUNIAK, K., OKE, T.R. & K. KLYSIK (2002): Analysis of long-term observations of urban surface-atmosphere energy exchange. In:

Fourth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 20.-24.05.2002, Norfolk, 103-104.

OLIVIER, J.C.J., BOUWMAN, A.F., BERDOWSKI, J.J.M., VELDT, C., BLOOS, J.P.J., VISSCHEDIJK, A.J.H., VAN DE MANS, C.W.M. & P.Y.J. ZANDVELD (1999): Sectoral emission inventories of greenhouse gases for 1990 on a per country basis as well as on 10º × 10º. In: Environmental Science and Policy, 2, 241-264.

OSCHMANN, W., DULLO, C., MOSBRUGGER, V. & STEININGER, F. [Hrsg.] (2000): Evolution des Systems Erde. Geobiologische und paläobiologische Prozesse als Antrieb, Kleine Senckenberg-Reihe, 35, 1-57.

PARKIN, T.B., & T.L. KASPAR (2003): Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. In: Soil Science Society of America, 67, 1763-1772.

PATAKI, D.E., BOWLING, D.R. & J.R. EHLERINGER (2003): Seasonal cycle of carbon dioxide and its isotopic composition in an urban atmosphere: anthropogenic and biogenic effects. In: Journal of Geophysical Research, 108 (D23), ACH 8-1 – ACH 8-8.

PEARSON, P.N. & M.R. PALMER (2000): Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. In: Nature, 406, 695-698.

PETIT, J.R., JOUZEL, J., RAYNAUD, D., BARKOV, N.I., BARNOLA, J.M., BARSILE, I., BENDER, M., CHAPPELLATZ, J., DAVIS, M., DALAYGUE, G., DELMOTTE, M., KOTLYAKOV, V.M., LEGRAND, M., LIPENKOV, V.Y., LORIUS, C., PEPIN, L., RITZ, C., SALTZMANN, E. & M. STIEVENARD (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. In: Nature, 399, 429-436.

RUDDIMAN, W.F. (2003): The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. In: Climatic Change, 61, 261-293.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl., Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg, 593 S.

SCHÖNWIESE, C.-D. (1994): Klimatologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 436 S.

SCHULZ, J. (2005): Die Datenbank „Raumrelevante Umweltdaten Thüringen“. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena, 12 S.

SCHULZ, K.G., ZONDERVAN, I., GERRINGA, L.J.A., TIMMERMANS, K.R., VELDHIUS, M.J.W. & U. RIEBESELL (2004): Effect of trace metal availability on coccolithophorid calcification. In: Nature, 430, 673-676.

SOLOMON, S. et al. (2007): Technical Summary. In: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. & H.L. MILLER (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK/New York, USA.

STEPHENS, B.B. & R.F. KEELING (2000): The influence of Antarctic sea ice on glacial-interglacial CO_2 variations. In: Nature, 404, 171-174.

STURM, P., LEUENBERGER, M., VALENTINO, F.L., LEHMANN, B. & B. IHLY (2006): Measurements of CO_2, its stable isotopes, O_2/N_2, and ^{222}Rn at Bern, Switzerland. In: Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 1991-2004.

TAKAHASHI, H.A., HIYAMA, T., KONOCHIRA, E., TAKAHASHI, A., YOSHIDA, N. & T. NAKAMURA (2001): Balance and behavior of carbon dioxide at an urban forest inferred from the isotopic and meteorological approaches. In: Radiocarbon, 43 (2B), 659-669.

WIDORY, D. & M. JAVOY (2003): The carbon isotope composition of atmospheric CO_2 in Paris. In: Earth and Planetary Science letters, 215 (1-2), 289-298.

WINDERLICH, J. (2007): Entwicklung und Test eines Probennahme- und Kalibriersystems für einen kontinuierlich messenden Hochpräzisions-CO_2-Analysator zum Einsatz in kommerziellen Flugzeugen. Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena.

ZIMNOCH, M., FLORKOWSKI, T., NECKI, J.M. & R.E.M. NEUBERT (2004): Diurnal variability of ^{13}C and ^{8}O of atmospheric CO_2 in the urban atmosphere of Krakow, Poland. In: Isotopes in Environmental and Health Studies, 40, 129-143.

ZÜRCHER, F., WALDBURGER, U. & P. VUILLEMIER (1996): CO_2 in Schulzimmern: Lüften tut not. In: SLZ, 18, 8-9.

Verwendete Geräte-Anleitungen:

BC-Systemtechnik: Ventil-Steuerfunktionen (2006). BC-Systemtechnik GmbH & Co KG, Dortmund.

Bronkhorst Hi-Tec El-Flow: Instruction Manual (2002). Bronkhorst Hi-Tec, Ruurlo, Niederlande.

CR10X Measurement and Control Module: Instruction Manual (2000). Campbell Scientific Inc., Utah, USA.

KNF Neuberger Membranpumpe N811 K: Betriebsanleitung (2002). KNF Neuberger AG, Balterswil, Schweiz.

LI-6262 CO_2/H_20 Analyser: Operating and Service Manual (1996). LI-COR, inc., Nebraska, USA.

Whatman Polydisc Filter device: Operating Instructions (2001). Whatman Inc., New Jersey, USA.

Verwendete Internetadressen für Klimadaten Jena:

http://www.tlug-jena.de
http://mechatronik.mb.fh-jena.de/station
http://www.wikipedia.de/wiki/jena

Anhang

Auf beigefügter CD-ROM sind enthalten:

- gesamter Datensatz des Messzeitraums am MPI Biogeochemie, Jena
- Datensätze über den Messzeitraum von den Stationen Hainich, Gebesee und Versuchsfeld Saaleaue
- Edlog-Programm („Dominic1“), das verwendet wird in der CO_2-Messstation (siehe **3.4.1**). Auf ist dem Datenlogger CR10X ist „Dominic1“ Teil des beigefügten Programms „Kolle1“.
- Gesamte Bachelor-Arbeit als PDF-File

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Energieflüsse ausgehend von der empfangenen Sonnenstrahlung (KIEHL und TRENBERTH 1997, verändert)	4
Abb. 2	Biosphären-gekoppelter Kohlenstoffkreislauf, alle Werte sind Relativzahlen bezogen auf die Biomasse, jeder Wert × $0{,}6 \cdot 10^{18}$ g C (OSCHMANN et al. 2000, verändert)	7
Abb: 3	CO_2-Gaswechsel von verschiedenen Pflanzentypen abhängig vom Strahlungsangebot (LARCHER 2001)	11
Abb. 4	CO_2-Akkumulation in einer Inversionslage (EUGSTER & SIGRIST 2000)	13
Abb. 5	CO_2-Tagesgang abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Bewölkungsgrad an einem ruralen Standort (HASZPRA 1992)	16
Abb. 6	Saisonale Variationen an fünf verschiedenen Messstationen in ruralen Gebieten in Deutschland (LEVIN et al. 1995)	17
Abb. 7	Jahreszeitliche Unterschiede in der Ausprägung des Tagesgangs in ruralen Gebieten (LEVIN et al. 1995)	18
Abb. 8	Durchschnittliche monatliche CO_2-Konzentrationen an einem urbanen Standort, Al-Jahra (NASRALLAH 2003)	20
Abb. 9	Urbaner Tagesgang in Phoenix zu unterschiedlichen Jahreszeiten (IDSO et al. 2002)	21
Abb. 10	Pneumatischen Diagramm der CO_2-Messstation, MPI Biogeochemie, Jena	23
Abb. 11	Prinzipskizze des LI-6262 Gas-Analysators (LI-6262 Manual, 1996)	27
Abb. 12	Vereinfachtes elektrisches Schaltdiagramm der CO_2-Messstation, MPI Biogeochemie, Jena	29
Abb. 13	Darstellung der linearen Funktion ausgehend von den Messwerten der beiden Kalibriergase	32
Abb. 14	Benutzeroberfläche von des Konvertierungs-Programms CSLOGGEN (KOLLE 2007)	33
Abb. 15	Photo des „Herzstücks“ der CO_2-Messstation auf drei Platinen angebracht	35
Abb.16	Verlauf der CO_2-Konzentration am Standort MPI Biogeochemie, Jena über den gesamten Messzeitraum (27.2.08-18.5.08)	37

Abb. 17	Täglicher Mittelwert über den gesamtem Messzeitraum, mit Approximation, Standort MPI Biogeochemie, Jena	38
Abb. 18	Vergleich eines Wochenlaufs von CO_2 im Anfang März mit Anfang Mai, Standort MPI Biogeochemie, Jena	39
Abb. 19	Vergleich der Minima und Maxima der CO_2-Konzentrationen pro Tag, Standort MPI Biogeochemie, Jena	40
Abb. 20	Beispiele von relativ früh einsetzender konstanter CO_2-Konzentration in der Nacht und verfrühter Abnahme des CO_2-Gehalts, Standort MPI Biogeochemie, Jena	41
Abb. 21	Nächtliche Fluktuationen am Beispiel des CO_2-Verlaufs von 8.5.2008 18:00 bis 9.5.2008 12:00, sowie die Fluktuationen in der Windrichtung im gleichen Zeitraum, Standort MPI Biogeochemie, Jena	42
Abb. 22	Ausbildung einer Inversionslage in der Nacht vom 10.05.2008 zum 11.05.2008, Standort MPI Biogeochemie, Jena	43
Abb. 23	Vergleich der CO_2-Tagesgänge mit Ausbildung von Inversionen in Woche 11 (5.5.2008-11.05.2008), Standort MPI Biogeochemie, Jena	44
Abb. 24	Effekt des verfrühten Auflösens einer Inversionslage auf die CO_2-Konzentration in der Nacht vom 24.4.2008 zum 25.4.2008, Standort MPI Biogeochemie, Jena	45
Abb. 25	Darstellung eines CO_2-Wochenverlaufs während labiler Schichtungsverhältnisse, Standort MPI Biogeochemie, Jena	46
Abb. 26	Typische Tagesgänge der Windgeschwindigkeit zu Hochdruckwetterlagen in der Woche vom 5.5.2008-11.5.2008, Standort MPI Biogeochemie, Jena	46
Abb. 27	Verlauf der CO_2-Konzentration und der Windgeschwindigkeit für den Zeitraum 18.4.08 0:00 Uhr bis 19.4.08 16.00 Uhr, MPI Biogeochemie, Jena	47
Abb. 28	Vergleich von CO_2-Konzentration und Windstärke in der Zeit von 22.4.08 12:00 Uhr bis 23.4.08 12:00Uhr, MPI Biogeochemie, Jena	48
Abb. 29	Verlauf der CO_2-Konzentration über zwei Tage (19.4.08-21.4.08) zu strahlungsarmen Bedingungen, MPI Biogeochemie, Jena	49
Abb. 30	Verlauf der CO_2-Konzentration zu strahlungsreichen Bedingungen (5.5.08 18:00 Uhr – 7.5.08 12:00 Uhr), MPI Biogeochemie, Jena	50

Abb. 31	Wochenverlauf der relativen Luftfeuchte verglichen mit der CO_2-Konzentration im gleichen Zeitraum (14.4.08 – 20.04.08), MPI Biogeochemie, Jena	51
Abb. 32	Möglicher Einfluss von zwei Niederschlagsereignissen auf die CO_2-Konzentration in dem Zeitraum 9.4.08 12:00 Uhr bis 12.4.08 12:00 Uhr, MPI Biogeochemie, Jena	52
Abb. 33	CO_2-Konzentration bei relativ konstanter nordöstlicher Windrichtung (9.4.08 0:00 – 12.4.08 12:00), MPI Biogeochemie, Jena	53
Abb. 34	Auftreten des Berufsverkehrs in der CO_2-Konzentration anhand günstiger Windrichtung am 3.5.08, MPI Biogeochemie, Jena	54
Abb. 35	Nächtliche Fluktuationen in CO_2-Konzentration und Windrichtung im Zeitraum 6.5.08 12:00 Uhr – 9.5.08 12:00 Uhr, MPI Biogeochemie, Jena	54
Abb. 36	Unterscheidung zwischen CO_2-Konzentration an Werktagen und Wochentagen über den gesamten Messzeitraum, Standort MPI Biogeochemie, Jena	56
Abb. 37	Vergleich der Tagesmittelwerte für die Zeit 10:00-22:00 Uhr in Woche 11 (5.5.08-11.5.08), Standort MPI Biogeochemie, Jena	57
Abb. 38	CO_2-Konzentration an der Station Hainich für den Zeitraum 27.2.08 – 18.5.08	57
Abb. 39	Vergleich eines Wochenverlaufs (28.4.08 – 4.5.08) der CO_2-Konzentration an den Standorten MPI Biogeochemie, Jena und Hainich.	58
Abb. 40	Verlauf der CO_2-Konzentration an der Station Gebesee, Höhe 7 m, für Zeitraum 27.2.08 – 14.5.08, mit Datenausfall zwischen 9.4.08 -11.4.08.	59
Abb. 41	Vergleich der CO_2-Konzentration über den Zeitraum von 8 Tage (13.4.08, 12 Uhr – 21.4.08, 12 Uhr) an den Standorten MPI Biogeochemie, Jena und Gebesee.	61

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

CO_2	Kohlenstoffdioxid
CH_4	Methan
O_3	Ozon
N_2O	Distickstoffoxid
UV	Ultraviolett
FCKWs	Flourchlorkohlenwasserstoffe
PFCs	Perfluorcarbone
SF_6	Schwefelhexafluorid
PTFE	Polytetrafluorethylen
KFZ	Kraftfahrzeug
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
PAR	Photosynthetically active radiation, die photosynthetisch wirksame Strahlung
IR	Infrarot
RTDM	Real time data monitoring
NDIR	Nicht-Dispersive-Infrarot
CCGG	Carbon Cycle Greenhouse Gases Group
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MPI	Max-Planck-Institut
MPI-BGC	Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena