

**Der Austausch von Carbonylsulfid (COS) zwischen  
Vegetation und Atmosphäre  
unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration**

Dissertation

zur Erlangung des Grades  
„Doktor  
der Naturwissenschaften“

am Fachbereich Biologie  
der Johannes Gutenberg-Universität  
in Mainz

vorgelegt von

Lisset Sandoval-Soto  
geboren in San Rafael, Alajuela, Costa Rica

Mainz, 2002

## Der Austausch von COS zwischen Vegetation und Atmosphäre unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration

Liseth Sandoval-Soto, Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz

Vor dem Hintergrund der mit der steigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration verbundenen Problematik der globalen Klimaveränderung auf unsere Erde wurde der Austausch des klimarelevanten Spurengases Carbonylsulfid (COS) bei den Spezies *Quercus ilex* L. und *Fagus sylvatica* L. unter natürlicher und erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration untersucht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen bei beiden Spezies im Messbereich natürlicher COS-Umgebungskonzentration eine lineare Abhängigkeit der COS-Aufnahme ( $F_{\text{COS}}$ ) von der COS-Umgebungskonzentration. Da bei COS-freier Luft keine COS-Abgabe bei diesen Spezies detektiert wurde, konnte dieser lineare Trend bei Einschluss dieses Punktes nicht über den gesamten Messbereich verwendet werden. Um die Abhängigkeit über den gesamten Messbereich mit einer Beziehung geschlossen zu parametrisieren, wurde deshalb eine nichtlineare Approximation auf Basis der Parameter Depositionsgeschwindigkeit ( $v_D$ ) und Kompensationspunkt (KP) entwickelt.

$$F_{\text{COS}} = \frac{v_D \cdot [\text{COS}]^{N+1}}{KP^N + [\text{COS}]^N}$$

Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration reagiert die Vegetation nicht einheitlich. Grundsätzlich streuen die Parameter  $v_D$  und KP unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration stärker als unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. *Quercus ilex* L. neigte zu einer signifikanten Reduktion des COS-Austausches und der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase, dem Schlüsselenzym für die COS-Aufnahme während bei *Fagus sylvatica* L. dieser Trend nicht signifikant ausgeprägt war. Beide Spezies tendieren unterschiedlich stark bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration und ansonsten unveränderten Bedingungen zu einer Erhöhung des Kompensationspunktes und einer betragsmässigen Verringerung der Depositionsgeschwindigkeit.

Die bislang publizierten Abschätzungen der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation basieren mehrheitlich auf der Korrelation zur Nettoprimärproduktion. Der in diesem theoretischen Modell, aus zu groben Vereinfachungen resultierende Modellfehler von etwa 200 % [195 %... 468 %], wurde durch die in dieser Arbeit weiterentwickelten Schätzformel behoben.

$$\Delta \text{COS} = k \cdot \Delta \text{CO}_2 \frac{M_{\text{COS}}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{[\text{COS}]}{[\text{CO}_2]} \quad \text{mit} \quad k = \frac{v_{D\text{COS}}}{v_{D\text{CO}_2}}$$

Auf dieser Basis wird die globale COS-Senkenstärke der Vegetation unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf (0,909 Tg/a...2,750 Tg/a) korrigiert. Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen kann die globale COS-Senkenstärke der Vegetation auf (0,687 Tg/a ...2,561 Tg/a) sinken.

Zum Abschluss wird dieses Modell so abstrahiert, dass es grundsätzlich zur Parametrisierung für miteinander korrelierende Gasaustauschprozesse zwischen Vegetation und Atmosphäre, Anwendung finden kann. Dadurch kann man die Partizipation der Vegetation bei klimatischen Prozessen über ihren Einfluss auf die Zusammensetzung der Chemie der Atmosphäre in vereinfachten Modellen zur Klimaprognose abbilden.

## Exchange of Carbonyl Sulfide (COS) between vegetation and the atmosphere under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>

L. Sandoval-Soto, (Max-Planck-Institut für Chemie, Abt. Biogeochemie, Mainz)

The responses of photosynthetic plant gas exchange, COS uptake and carbonic anhydrase (CA) activity were studied on *Quercus ilex* (Holm oak), and beech *Fagus sylvatica* L., grown under ambient (350 ppm) and elevated (800 ppm) CO<sub>2</sub> levels for three years.

Both growing CO<sub>2</sub> conditions resulted in a linear relationship between the consumption of COS and the ambient COS concentration. Under COS free conditions no release of COS was detected. The dependence over the entire measurement range with a linear regression was not possible; therefore a no linear approximation on basis of the parameters Deposition velocity ( $v_D$ ) and compensation point was developed.

$$F_{COS} = \frac{v_D \cdot c_{REF}^{N+1}}{(KP + c_{REF})^N}$$

Under elevated CO<sub>2</sub>-levels the response of the vegetation is not uniformly, since the parameters ( $v_D$ ) and compensation point (KP) are highly scattered under elevated CO<sub>2</sub> concentration. COS uptake and the activity of the enzyme carbonic anhydrase (CA), which is the enzyme for the COS uptake, was significantly reduced in *Quercus ilex* L. measurements while there was no significant trend in *Fagus sylvatica* L. measurements. Both species react differently under elevated CO<sub>2</sub>-concentration at constant conditions.

This work identifies relevant errors in the existing model for the determination of the global sink strength for COS of the vegetation. These errors are in the range of 200 % [195 %... 500 %] According to the results of this investigation a new model for the estimation of the global vegetation sink for COS was developed.

$$\Delta COS = k \cdot \Delta CO_2 \frac{M_{COS}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad \text{with} \quad k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$$

Based on this result the global COS uptake of the vegetation was estimated to be 0,909 -2,750 Tg/a. Under elevated CO<sub>2</sub> concentration the global COS sink strength of the vegetation is about 0,687-2,561 Tg/a).

Finally this model is modified and abstracted this way, which it can be applied to model the gas exchanges between vegetation and atmosphere that are correlated to each other and which have influence on the composition of the chemistry of the atmosphere. So generally the model can be used to represent the participation of the vegetation on climatic processes.

## Intercambio de (COS) entre la Vegetación y la Atmósfera bajo condiciones elevadas de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

L Sandoval-Soto, (Max-Planck-Institut für Chemie, Abt. Biogeochemie, Mainz)

Dentro del marco del cambio climático global y la influencia del incremento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) sobre el metabolismo de plantas superiores, fue investigada la Asimilación de COS y la actividad de la enzima Anhidrasa Carbonica en las especies *Quercus ilex* L y *Fagus sylvatica* L durante un período de tres años de crecimiento, bajo 350 ppm y 800 ppm de CO<sub>2</sub>.

Los resultados indican una correlación lineal entre el intercambio de COS y la concentración ambiental de COS. Sin embargo, durante exposiciones de las plantas bajo a un ambiente libre de COS no fueron observadas emisiones de COS. Estos resultados indican que no es aplicable un modelo lineal en el caso del intercambio de COS. Por lo tanto se plantea la posibilidad de aplicar un modelo no lineal que permita interpretar a la vez la existencia de una correlación lineal sólo en presencia de concentraciones ambientales reales de COS.

Con ayuda de los parámetros velocidad de deposición (v<sub>D</sub>) y del punto de compensación (KP) de la función lineal, se desarrollo un modelo de aproximación no lineal:

$$F_{COS} = \frac{v_D \cdot c_{REF}^{N+1}}{(KP + c_{REF})^N}$$

Los resultados indican que la respuesta de la vegetación mantenida bajo elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> no es uniforme. Ambas especies bajo condiciones controladas de laboratorio y diferente concentración de CO<sub>2</sub> presentan diferente tendencias en el punto de compensación (KP) y de la velocidad de deposición (v<sub>D</sub>). Bajo elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> dispersan los parámetros (v<sub>D</sub>) y (KP). *Quercus ilex* L. presenta una significativa reducción del intercambio de COS y de la actividad de la anhidrasa carbonica. Esta tendencia no es significativa en *Fagus sylvatica* L..

La mayoría de los pronósticos sobre la capacidad global de la vegetación de reducir la concentración atmosférica de COS están basados en un modelo teórico, el cual establece una relación lineal de la asimilación de COS con la asimilación de CO<sub>2</sub> obtenida de la Productividad primaria neta (NPP) y las concentraciones atmosféricas de COS y CO<sub>2</sub>. Consecuencia de esta simplificación resulta un error de 200 % [195 %... 468 %]. Los resultados experimentales de esta investigación permiten corregir este modelo y generar con base en las velocidades de deposición de COS y CO<sub>2</sub> un nuevo parámetro (*k*) que permite su utilización en la estimación de la reducción global de COS eliminando el error:

$$\Delta COS = k \cdot \Delta CO_2 \frac{M_{COS}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad \text{con} \quad k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$$

Este nuevo modelo corrige el valor estimado de la asimilación global del COS bajo condiciones naturales de CO<sub>2</sub> en (0,909 Tg/a...2.750 Tg/a) y permite pronosticar una reducción de la asimilación global de COS en (0,687 Tg/a ...2,561 Tg/a) bajo elevada concentración de CO<sub>2</sub>. La generalización de este modelo en otros procesos de intercambio gaseoso entre la vegetación y la atmósfera, permiten integrar la participación global de la vegetación en los modelos de pronósticos del clima.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Der Treibhauseffekt	1
1.2	Die Bedeutung von Kohlendioxid	4
1.2.1	Der biogeochemische Kreislauf des Kohlenstoffs	5
1.2.2	Die atmosphärische Konzentration von Kohlendioxid	6
1.2.3	Enzymatischer Hintergrund der Photosynthese	9
1.2.4	Vegetation unter erhöhter atmosphärischer CO <sub>2</sub> -Konzentration – Einführender Überblick zum Stand des Wissens	16
1.3	Die Bedeutung von Carbonylsulfid (COS) in der Chemie der Atmosphäre	24
1.3.1	Der biogeochemische Kreislauf des Schwefels	24
1.3.2	Die atmosphärische Konzentration von COS	26
1.3.3	Chemischer Hintergrund der Bildung von Sulfataerosolen aus COS	29
1.3.4	Die Rolle von Sulfataerosolen in der Atmosphäre	30
1.3.5	Bedeutung der Vegetation für die atmosphärische COS-Konzentration	31
1.3.6	Globale Quellen und Senken für COS in der Atmosphäre	35
1.3.7	Mögliche Auswirkungen einer erhöhten atmosphärischen CO <sub>2</sub> - Konzentration auf die COS-Senkenstärke der Vegetation	38
1.4	Zielstellung	40
<b>2</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>41</b>
2.1	Botanisches Material	41
2.1.1	Die Steineiche - <i>Quercus ilex</i> L.	41
2.1.2	Die Rotbuche - <i>Fagus sylvatica</i> L.	41

2.2	Herkunft, Alter und Aufzuchtbedingungen	42
2.3	System zur Aufzucht von Pflanzen unter kontrollierten Umweltbedingungen	43
2.3.1	Die Klimakammern	43
2.3.2	Die Regulation der Kohlendioxidkonzentration	45
2.4	Technische Systeme zur Analyse des Gasaustausches von höheren Pflanzen	46
2.4.1	Funktionsprinzip der Gaswechsellanlage	46
2.4.2	Reinigungssystem	49
2.4.3	COS- und CO <sub>2</sub> - Begasung	50
2.4.4	Küvettenystem zur Bestimmung des Gaswechsels	52
2.4.5	Probenentnahme der zwei COS Sammelsystem	54
2.4.6	Quantitative Bestimmung von COS	57
2.4.7	Kalibration des Detektors und Fehlerbetrachtungen	60
2.5	Versuchsbeschreibungen	63
2.5.1	Untersuchung des COS Austausches	63
2.5.2	Methode zur Beeinflussung der stomatären Leitfähigkeit	63
2.5.3	Bestimmung der Aktivität des Enzyms Carboanhydrase (CA)	65
2.6	Berechnungen der Gasaustausch-Parameter	69
2.6.1	Berechnung der COS-Konzentration der Umgebungsluft	69
2.6.2	Berechnung der COS-Austauschrate	70
2.6.3	Berechnung der Depositionsgeschwindigkeiten	70
2.6.4	Berechnung der Transpirationsrate	71
2.6.5	Berechnung der Assimilationsrate	71
2.6.6	Berechnung der stomatären Leitfähigkeit	72
2.6.7	Fehlerfortpflanzung	74
2.7	Statistische Methoden	76
2.7.1	Der Ausreissertest von Nalimov	76
2.7.2	Vergleich von Mittelwerten mit dem t-Test	78

2.7.3	Vergleich von Varianzen mit dem F-Test	79
2.7.4	Korrelationsanalyse	80
2.7.5	Zusammenfassen von Mittelwerten und Medianwerte	81
2.7.6	Nachweis der Vergleichbarkeit von Messreihen	82
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>83</b>
3.1	Vergleichbarkeit der verwendeten COS-Messmethoden	84
3.2	Tagesgang des COS-Austauschs	88
3.3	Nachweis der stomatären Regulation des COS Austausches	92
3.4	Einfluss der COS-Konzentration auf den COS-Austausch	97
3.5	Einfluss der CO <sub>2</sub> -Umgebungskonzentration auf den COS-Austauschrate	106
3.5.1	Messungen an <i>Fagus sylvatica</i> L.	108
3.5.2	Messungen an <i>Quercus ilex</i> L.	122
3.6	Einfluss der erhöhten CO <sub>2</sub> -Umgebungskonzentration auf die Aktivität des Enzyms Carboanhydrase	134
3.6.1	Aktivität des Enzyms Carboanhydrase bei <i>Fagus sylvatica</i> L. unter 350 und 800 ppm CO <sub>2</sub> -Umgebungskonzentration	134
3.6.2	Aktivität des Enzyms Carboanhydrase bei <i>Quercus ilex</i> L. unter 350 und 800 ppm CO <sub>2</sub> -Umgebungskonzentration	135
3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	136
<b>4</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>138</b>
4.1	Verbesserungsvorschläge zur Verringerung Messfehler des Gaswechselsystems	138
4.2	COS-Austausch zwischen Vegetation und Atmosphäre unter	

	normaler CO <sub>2</sub> -Umgebungskonzentration	140
4.3	Auswirkungen einer erhöhten CO <sub>2</sub> -Konzentration auf den COS-Austausch der Vegetation	144
4.3.1	Auswirkung aus den COS-Austausch von <i>Fagus sylvatica</i> L.	144
4.3.2	Auswirkung aus den COS-Austausch von <i>Quercus ilex</i> L.	147
4.4	Auswirkungen einer erhöhten CO <sub>2</sub> -Konzentration auf die Aktivität des Enzyms Carboanhydrase	151
4.5	Analyse und Korrektur der Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation	153
4.6	Globale Auswirkungen einer erhöhten CO <sub>2</sub> -Konzentration auf die globale COS-Senkenstärke der Vegetation	171
4.7	Verallgemeinerte Methode zur Prognose des Gasaustausches der Vegetation	175
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	176
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	180
<b>7</b>	<b>ANHANG</b>	
7.1	Abkürzungsverzeichnis	201
7.2	Verwendete Hilfsmittel	205
7.3	Eine Auswahl atmosphärischer Gase	208
7.4	Darstellung von Einzelergebnissen der COS-Messungen	210

**DANKSAGUNG**

**LEBENS LAUF**

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren sind, im Zusammenhang mit dem so genannten „Ozon-Loch“ und der Diskussion um die Klimaveränderungen, die Spurengase der Atmosphäre verstärkt in den Blickpunkt der Öffentlichkeit geraten. Dem Spurengas Carbonylsulfid (COS) wird ebenfalls eine exponierte Rolle in den Prozessen, die sich in unserer Atmosphäre abspielen, zugeschrieben. Es wird im Rahmen dieser Arbeit analysiert, welche globalen Auswirkungen die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf die COS-Austauschprozesse von höheren Pflanzen haben kann.

Dieses Kapitel führt in jene komplexen, globalen Zusammenhänge der Wechselwirkungen zwischen dem Strahlungshaushalt, dem Klima, der irdischen Biosphäre und der Atmosphäre ein, die für das Verständnis der Arbeit und der am Anfang aufgestellten Hypothesen sowie den daraus abgeleiteten Aufgabenstellungen notwendig sind.

## 1.1 Der Treibhauseffekt

Der natürliche Treibhauseffekt wurde bereits vor fast 200 Jahren als eine klimatische Voraussetzung für das Leben auf der Erde angesehen. Der französische Mathematiker und Physiker Jean-Baptiste Joseph Fourier (♁ 1768 Auxerre †1830 Paris) erkannte schon zu Beginn der industriellen Revolution die Zusammenhänge zwischen dem Strahlungshaushalt und der Klimaentwicklung unserer Erde. Seine Hypothese, dass die Atmosphäre bzw. deren Gase Strahlungsenergie der Sonne aufnehmen und ähnlich wie ein Treibhaus wirken, stellte er bereits im Jahr 1824 auf (Handel und Risbey, 1992).

Die groben Zusammenhänge zwischen dem Leistungshaushalt und dem Klima der Erde können aus heutiger Sicht wie folgt vereinfacht beschrieben werden: Die Sonne emittiert ein vorwiegend kurzwelliges Strahlungsspektrum. Das Maximum des Spektrums liegt nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz  $\left[ \lambda_{\max} = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K} / T \right]$  und unter Annahme einer Temperatur der Sonnenoberfläche von 6000 Kelvin bei 483 nm. Die an der Oberkante der Atmosphäre der Erde ankommende, über den Abstand zur Sonne gemittelte, Strahlungsleistung beträgt 342

W/m<sup>2</sup> (Helas, 2002). Diese Strahlung wird in der Atmosphäre teilweise reflektiert und absorbiert. Die Energie der absorbierten Strahlung erhöht die Temperatur der Atmosphäre. Die mittlere Temperatur der Atmosphäre beträgt ca. -22°C (Tipler, 1995). Ein großer Teil der Sonneneinstrahlung gelangt zur Erdoberfläche, wo sie wiederum reflektiert und absorbiert wird. Die Erdoberfläche, deren mittlere Temperatur ungefähr bei 15°C liegt, gibt die absorbierte kurzwellige Strahlung als langwellige Wärmestrahlung teilweise wieder ab. Die emittierte gemittelte Strahlungsleistung der Erdoberfläche beträgt 235 W/m<sup>2</sup>. Das Spektrum der emittierten Wärmestrahlung lässt sich wiederum nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz abschätzen und liegt bei Temperaturen zwischen -22°C und +20°C im oberen Infrarotbereich von 800 nm...20 µm. Im Gegensatz zur kurzwelligen Strahlung absorbiert die Atmosphäre den größten Teil der langwelligen Infrarotstrahlung, erwärmt sich dadurch und strahlt erneut langwellig in alle Richtungen ab. „...Dieser natürliche Effekt bewirkt, dass die mittlere Temperatur der Erdoberfläche von lebensfeindlichen -19°C auf lebensfreundliche +15°C angehoben wird...“ (Schönwiese, 1991). Die Abbildung 1 veranschaulicht die Zusammenhänge.

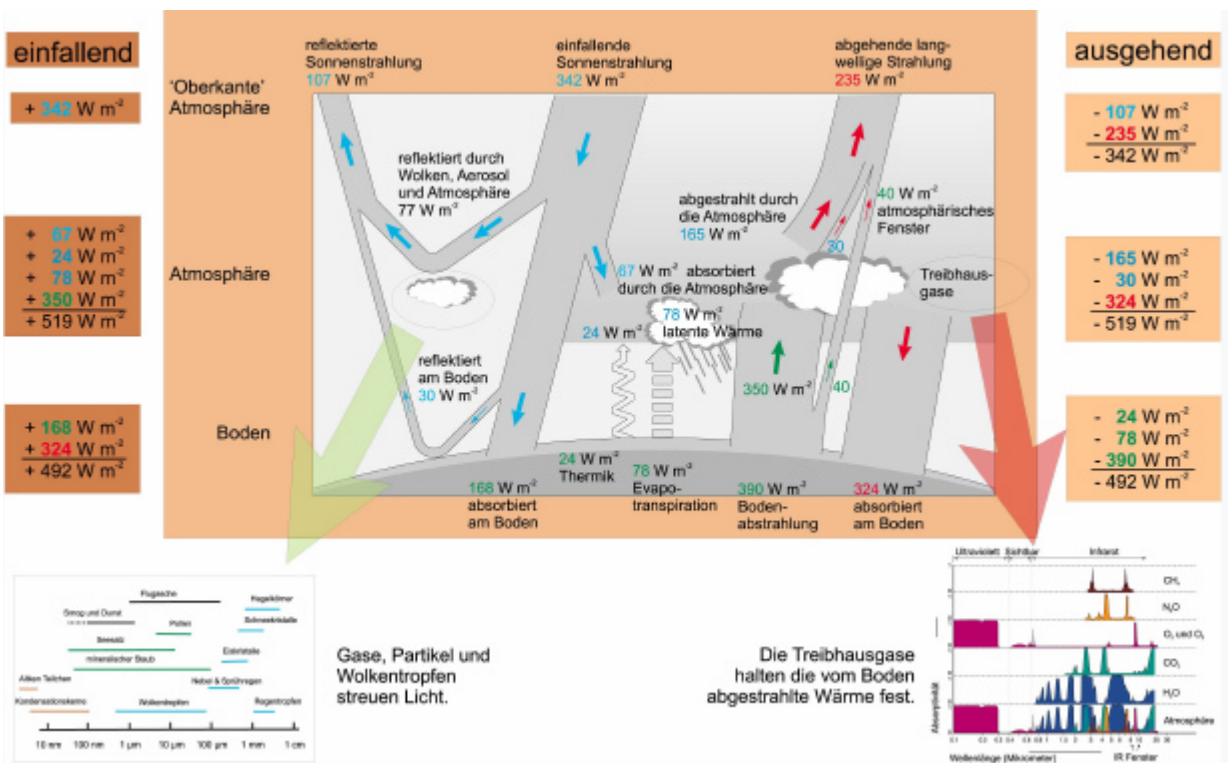


Abbildung 1: Schematische Darstellung zum Strahlungshaushalt der Erde (Helas, 2002)

Die Klimaentwicklung auf unserem Planeten wird also vor allem durch folgende Faktoren gesteuert:

- Intensität und Verteilung der kurzwelligen Sonnenstrahlung
- Umwandlung der kurzwelligen in langwellige Strahlung
- Absorption langwelliger Strahlung durch atmosphärische Bestandteile

Es sind vor allem die im infraroten Bereich guten Absorber, die 3-atomigen Spurengase Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), welche die langwellige Strahlung klimawirksam absorbieren.

Der britische Wissenschaftler John Tyndall bewies im Jahre 1861 experimentell, dass  $\text{CO}_2$  und Wasserdampf Wärmestrahlung aufnehmen. Auf der Basis dieser experimentellen Untersuchungen zur Wärmeabsorption durch Gase entwickelte er die Theorie, dass das Erdklima im Wesentlichen durch Wasserdampf gesteuert wird. De facto bewirkt eine Erhöhung der Wasserdampfkonzentration eine verstärkte Absorption und damit eine Erwärmung der Atmosphäre, was wiederum zu einer schnelleren Verdunstung des Meerwassers führt. Diese positive Rückkopplung bewirkt einen verstärkten Anstieg der Temperatur. Die damit verbundene dichtere Wolkendecke erhöht einerseits den Reflexionsgrad der Atmosphäre, wodurch weniger kurzwellige Strahlung in die Erdatmosphäre eindringt und somit die Erwärmung gebremst wird, andererseits vermindert die dichtere Wolkendecke die Wärmeabstrahlung, wodurch wiederum die Erwärmung gefördert wird.

Neben Wasserdampf, der den Hauptanteil der langwelligen Strahlung absorbiert, spielt ebenfalls Kohlendioxid eine wesentliche Rolle in der Klimasteuerung unseres Planeten, was der schwedische Chemiker Svante Arrhenius bereits 1896 erkannte. 1903 veröffentlichte er seine Theorie, in der er für unterschiedliche Kohlendioxidkonzentrationen unterschiedliche Klimaszenarien entwarf und eine globale Erwärmung innerhalb weniger Jahrhunderte infolge industrieller Kohlendioxid-Emissionen prognostizierte. Callender lieferte 1938 eine quantitative Abschätzung zur anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffektes, die schlussendlich durch den globalen Kohlendioxidanstieg verursacht wird (Bolin et al., 1986; Flohn, 1988; Handel und Risbey, 1992).

Heute gilt es als erwiesen, dass das Klima der Erde letztendlich durch die chemische Zusammensetzung<sup>1</sup> der Atmosphäre beeinflusst wird. Insbesondere durch die globalen Kreisläufe der atmosphärischen Spurengase, die sich auf deren Verteilung und somit auf die physikalischen und chemischen Prozesse der Erdatmosphäre auswirken (Graedel & Crutzen, 1994; Graedel & Crutzen, 1996; Bolin et al., 1986).

Ändern sich die Emissions- und Absorptionsraten der Quellen und Senken atmosphärischer Spurengase, führt das zu Änderungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und somit auch zu Veränderungen des Klimas. Inzwischen besteht auch kein Zweifel mehr darüber, dass die Zusammensetzung der Atmosphäre wesentlich durch die irdische Biosphäre beeinflusst wird.

## 1.2 Die Bedeutung von Kohlendioxid

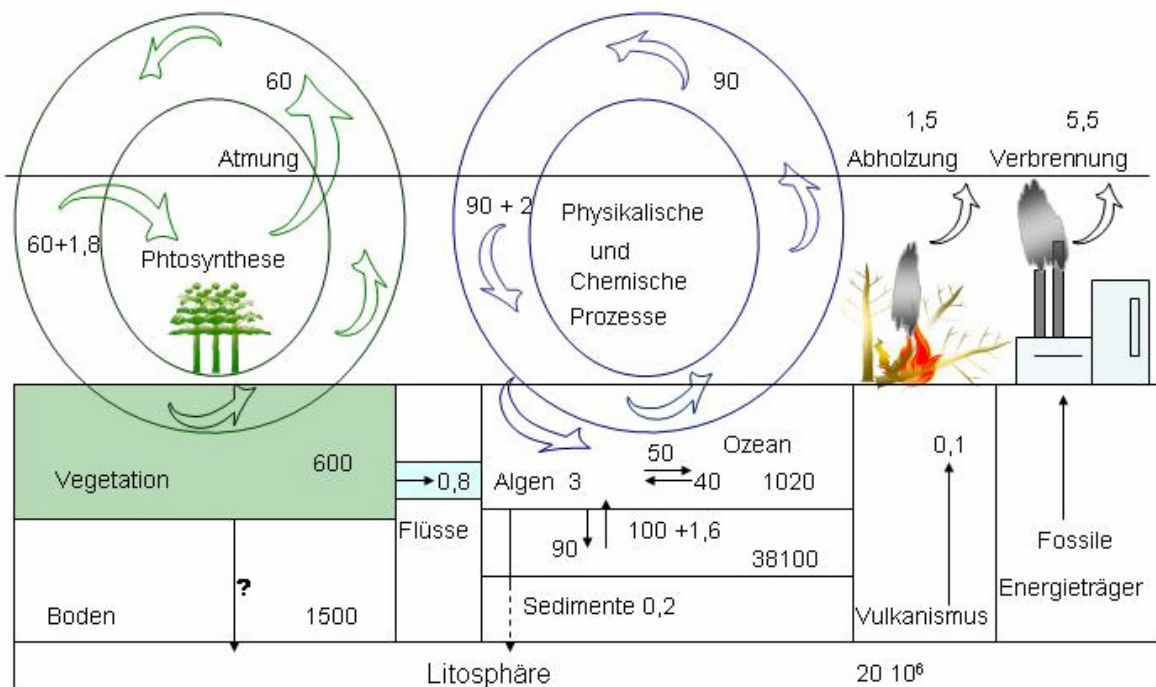
CO<sub>2</sub> spielt nicht nur, wie bereits im Kapitel 1.1 ausgeführt, für die Verstärkung des Treibhauseffektes eine wichtige Rolle, sondern auch für das irdische Leben. Grundsätzlich sind CO<sub>2</sub>, Wasser, Licht und Mineralien primäre Voraussetzungen für irdische, aquatische, und autotrophe Lebewesen, wie grüne Pflanzen, Grünalgen, Blaualgen (Cyanobakterien), marines Phytoplankton sowie photo- oder chemosynthesefähige Bakterien, um aus anorganischen, energiearmen Substanzen organische, energiereiche Substanzen zu bilden. Diese energiereichen, organischen Substanzen sind Ernährungsgrundlage für heterotrophe Organismen (Tiere, die meisten Pilze und Bakterien sowie einige höhere parasitär lebende Pflanzen), wodurch das heterotrophe Leben direkt vom autotrophen abhängt. Der biotische Kohlendioxidzyklus wird heutzutage nicht mehr nur durch Licht, Temperatur, Nährstoffe und Luftmassenbewegung beeinflusst, sondern in zunehmendem Masse auch, wie bereits im Kapitel 1.1 erwähnt, durch die anthropogene Aktivität, in Form von dramatisch steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, dirigiert (Bolin et al., 1986; Idso, 1989; Schneider, 1989, Graedel & Crutzen, 1994; Murray, 1997; Graedel & Crutzen, 1996; Idso & Kimball, 2001).

---

<sup>1</sup> Die Tabelle im Anhang 7.3 beinhaltet eine Auflistung der wesentlichen Bestandteile von Gasen der Atmosphäre, deren Konzentration und Lebensdauer Holzinger & Kaiser, (2000).

### 1.2.1 Der biogeochemische Kreislauf des Kohlenstoffs

Die Abbildung 2 stellt vereinfacht den biogeochemischen Kreislauf des Kohlenstoffs dar. Kohlenstoff wird in gebundener Form als  $\text{CO}_2$  bei vulkanischer Aktivität und Atmungsprozessen von Flora und Fauna natürlich freigesetzt. Ebenso gelangt der Kohlenstoff durch Verbrennung und Verrottung biologischen Materials wiederum gebunden als  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre zurück, nachdem er primär über die Prozesse der Photosynthese in die Biomasse eingebaut wurde.



**Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des biogeochemischen Kohlenstoff-Kreislaufs in Anlehnung an Houghton, (1994) und Heimann et al., (1998).**

Ein Teil des in Form von  $\text{CO}_2$  gebundenen Kohlenstoffs wird an der Wasseroberfläche zu  $\text{HCO}_3^-$  umgewandelt und dann primär durch die Photosynthese der aquatischen und marinen Biosphäre fixiert und via Karbonate sedimentiert (Boyle, 1988; Broecker & Peng, 1990; Takahashi, 1989). Von der terrestrischen Biosphäre wird die Biomasse ebenfalls durch photosynthetische Fixierung von  $\text{CO}_2$  gewonnen. Die Photosynthese besitzt im Gleichgewicht der Austauschprozesse, auf Basis derer biotische Kompartimente in der heutigen Form

existieren, eine zentrale Funktion. Die auf  $\text{CO}_2$  basierende Biomassenbildung, die sog. Netto-Primärproduktion des Ökosystems, ist neben der  $\text{CO}_2$ -Konzentration außerdem noch von der eingestrahnten Sonnenergie, Wasser und mineralischen Nährstoffen abhängig. Das erste Produkt bei dieser Art der  $\text{CO}_2$ -Fixierung ist Zucker, der dann in komplexe Kohlenhydrate umgewandelt wird. Die daraus entstandene autotrophe Phytomasse (Biomasse) wird von Pflanzenfressern (Herbivore), den Erstkonsumenten der Nahrungspyramide, als Existenzgrundlage benötigt. Fleischfresser, die Karnivore, sind das folgende Glied der Nahrungskette. Die toten organischen Rückstände der Produzenten und Konsumenten werden schließlich durch Zersetzung wieder zu anorganischen Stoffen abgebaut und somit dem  $\text{CO}_2$ -Kreislauf zurückgeführt.  $\text{CO}_2$  ist im Kreislauf für die Primärproduzenten der Biomasse die primäre Bezugsquelle von Kohlenstoff, der wiederum eine materielle Voraussetzung für den Aufbau energiereicher, organischer Substanzen darstellt, und somit eine wichtige Basis für das Leben auf unserem Planeten ist.

Globale Dimensionen im Zusammenhang mit der Photosynthese erhält die Tatsache, dass ca. 50 % des global assimilierten  $\text{CO}_2$  durch die autotrophe Atmung wieder in die Atmosphäre gelangen. Insgesamt kommen aus den terrestrischen Bereich ca. 120 Pg  $\text{CO}_2$  in die Vegetation, wovon jeweils ca. 60 Pg C  $\text{CO}_2$  durch die autotrophe und 50 Pg C durch die heterotrophe Atmung wieder in die Atmosphäre zurückgelangen. Der Ozean nimmt etwas mehr als 90 Pg auf und gibt ca. 90 Pg  $\text{CO}_2$  wieder ab (Houghton, 1994; Strasburger, 1998; Heimann et al., 1998).

Kürzliche Studien zeigen detaillierter, dass das Gleichgewicht des  $\text{CO}_2$ -Kreislaufs nicht nur durch die Produkte der Respiration oder der Verrottung biologischen Materials sondern auch als direkt Emissionen von Kohlenwasserstoffe wieder in der Atmosphäre beeinflusst wird (Kesselmeier et al., 2002).

### **1.2.2 Die atmosphärische Konzentration von Kohlendioxid**

Die gegenwärtige Konzentration des Spurengases Kohlendioxid in der Atmosphäre beträgt ca. 360 ppm. Die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration wird heutzutage vor allem durch

- Emission bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe<sup>1</sup> und
- die weltweite Abnahme der Vegetation als  $\text{CO}_2$ -Senke

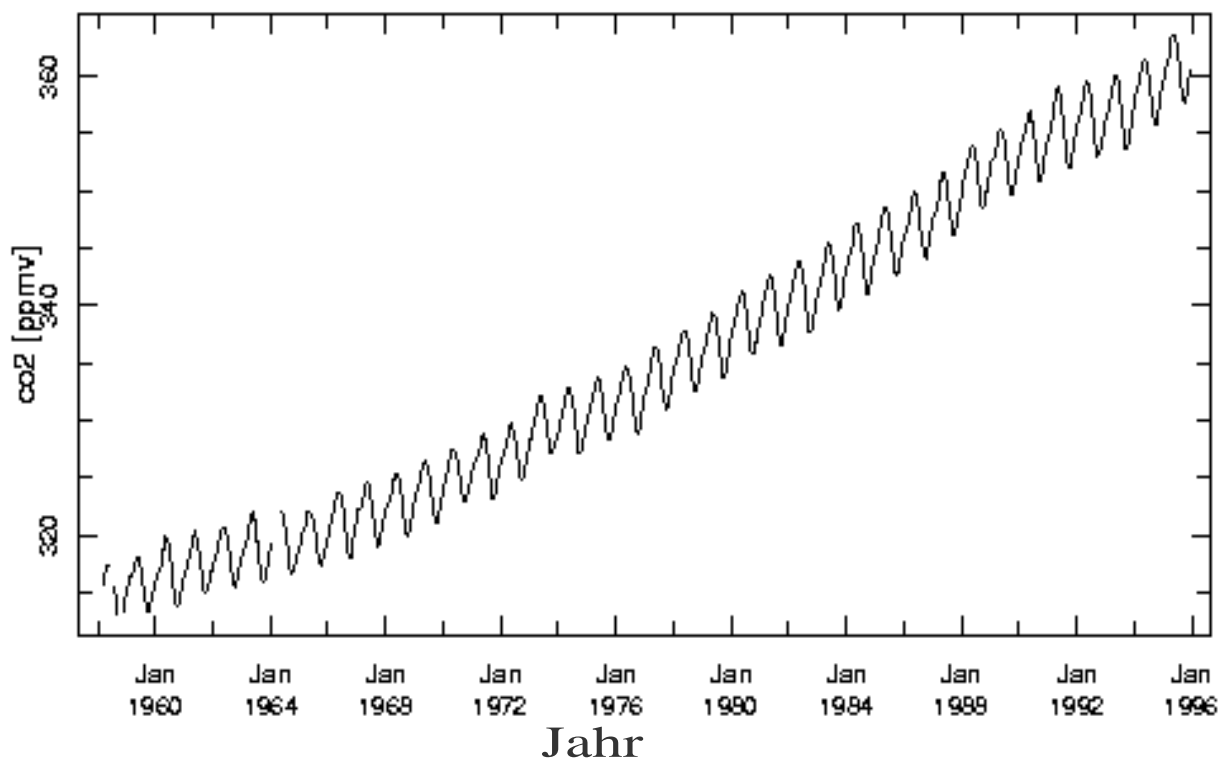
---

<sup>1</sup> Derzeit gelangen ca. 18000 Tg/a  $\text{CO}_2$  aus fossiler Verbrennung in die Atmosphäre.

- die weltweite Abnahme der Ozeane als CO<sub>2</sub>-Senke und
- Verrottung biologischen Materials

beeinflusst.

Seit 1958 wird auf Mauna Loa / Hawaii die globale Kohlendioxid-Konzentration routinemäßig gemessen. Die Untersuchungen ergaben neue Erkenntnisse über den jahreszeitlichen Zyklus der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der auf der physiologischen Aktivität der Vegetation basiert. Abbildung 3 stellt die Konzentration atmosphärischen Kohlendioxids gemessen in Mauna Loa dar. Diese oft auch als Keeling-Kurve bezeichnete Darstellung zeigt eindrücklich die kontinuierliche Erhöhung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb der letzten 30 Jahre. Den Messungen kann man entnehmen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Jahr 1959 der Minimalwert des Jahreszyklus ca. 313 ppm betrug. Im Jahr 1996 ist dieser Wert bereits auf 365 ppm angestiegen.

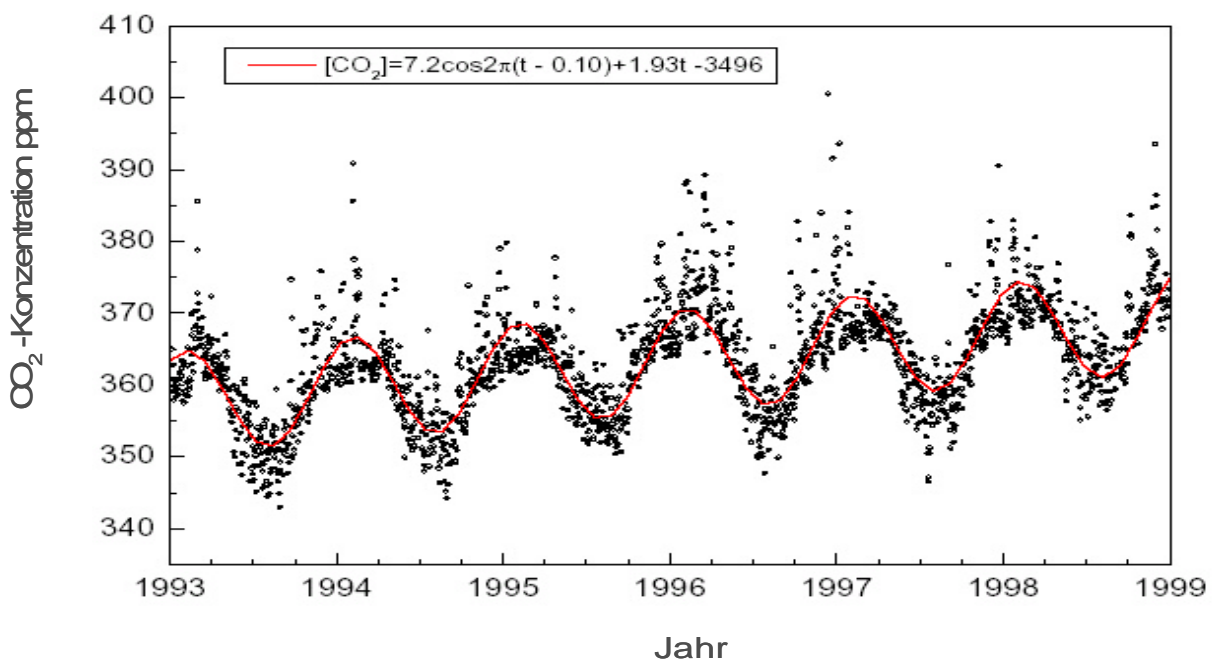


**Abbildung 3: Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen bis 1996 in Mauna Loa**  
(aus <http://ingrid.lidgo.columbia.edu/SOURCES/.KEELING>)

Das mittlerweile unbestrittene und unverminderte Anhalten dieses gemessenen Trends wurde unter anderem auch von jüngeren Ergebnissen aus Mitteleuropa bestätigt (Xu, 2001, Xu et al.,

2002). Die Abbildung 4 präsentiert jüngste CO<sub>2</sub>-Konzentrationsmessergebnisse aus dem Taunus.

In den Abbildungen 3 und 4 sind die jährlichen Periodizitäten gut sichtbar. Die erkennbaren Zyklen korrelieren mit den Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel. Während des Frühlings und in den ersten Wochen des Sommers nimmt die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration infolge der Assimilationsprozesse der sommergrünen Vegetation ab. Im Herbst wird das aufgenommene und in die pflanzlichen Strukturen eingebaute CO<sub>2</sub> hauptsächlich durch Verrottungsprozesse des heruntergefallenen Laubes teilweise wieder an die Atmosphäre abgegeben; die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt wieder an.



**Abbildung 4: Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen im Taunus aus (Xu 2001)**

Hält dieser Trend unverändert an, ist spätestens bis zum Jahr 2100 eine Verdopplung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre zu erwarten. Bis zum Jahr 2040 ist eine Steigerung auf ungefähr 450 ppm bis zum Jahr 2100 und 800 ppm zu erwarten (IPCC WGI, 1991; 1995; 1996).

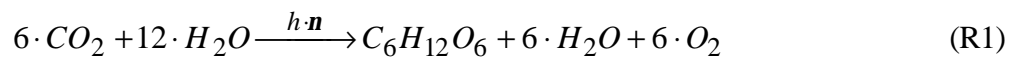
Beobachtungen zeigen, dass mit dem Anstieg der Kohlendioxidkonzentration eine Zunahme weiterer langlebiger strahlungswirksamer atmosphärischer Substanzen, wie z.B.

Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Stickstoffmonoxide (NO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O) Fluorchlorwasserstoffe (FCKWs), Methan (CH<sub>4</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Aerosole und Troposphärische Ozon (O<sub>3</sub>); verbunden ist (Bolin et al., 1986; Graedel & Crutzen, 1994).

Wie bereits anfangs erwähnt, ist es gegenwärtig wichtig zu erkennen, wie sich dieser Anstieg der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration auf die Vegetation auswirken wird. Zentral für die Prozesse und zu erwartenden Trends ist die Photosynthese, bei der bekanntlich die Pflanzen den in CO<sub>2</sub> gebundenen Kohlenstoff aufnehmen, in die Biomasse „einbauen“ und zusätzlich noch CO<sub>2</sub> und Sauerstoff abgeben. Das nächste Kapitel führt in die, für das Verständnis der Zusammenhänge wichtigen Prozesse der Photosynthese ein.

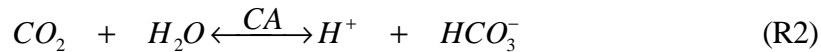
### 1.2.3 Enzymatischer Hintergrund der Photosynthese

Der komplexe Gesamtprozess der Photosynthese lässt sich durch die unten stehende Reaktionsgleichung (R1) beschreiben.



Bei der enzymgesteuerten Reaktion wird 2878 kJ/mol<sub>Hexose</sub> Energie gewonnen. Die Reaktion läuft in mehreren Zyklen ab. Die Photosynthese bei C<sub>3</sub>-, C<sub>4</sub>- und CAM-Pflanzen erfolgt über unterschiedliche Wege. Alle Pflanzen ob C<sub>3</sub>-, C<sub>4</sub> oder CAM-Pflanzen nehmen CO<sub>2</sub> über die Stomata reguliert auf. Die Unterschiede liegen vor allem in den Mechanismen der CO<sub>2</sub>-Bindung. Dieser Prozess wird insbesondere von den Enzymen: Kohlensäureanhydratase (engl. Carboanhydrase), Ribulosebisphosphat-Carboxylase-Oxygenase (kurz: RubP-CO) und Phosphoenolpyruvate-Carboxylase (kurz: Pep-CO) beeinflusst (Badger and Price 1994; Strasburger, 1998).

Das Zink-enthaltende Enzym Carboanhydrase katalysiert in vielen Organismen die reversible Hydratisierung von CO<sub>2</sub>.



Jedoch gibt es in unterschiedlichen Organismen verschiedene Arten von Carboanhydrase, deren Bedeutung letztendlich von der genauen Funktion des Organismus abhängt.

Untersuchungen an Pflanzen, bspw. an *Triticum aestivum*, haben gezeigt, dass in Dunkelheit keine Aktivität der Carboanhydrase feststellbar war, im Gegensatz zum Enzym Rubisco (Tsuzuki et al. 1985). Weiterhin fanden diese Autoren eine direkte Korrelation zwischen den Aktivitäten von Carboanhydrase und Rubisco unter steigender Lichtintensität. Eine Korrelation, die später von Arakelyan et al., (1993) bestätigt wurde. Die Autoren Arakelyan et al., (1993) fanden zusätzlich noch eine Korrelation zwischen Aktivität, Lichtintensität und Temperatur. Die Reaktionen mit Partizipation der Carboanhydrase sind grundsätzlich lichtunabhängig. Ursache für die in einigen Arbeiten beobachtete "Lichtabhängigkeit" der Reaktionen unter Beteiligung der Carboanhydrase ist die Kopplung dieser Reaktionen an die lichtabhängige photosynthetische CO<sub>2</sub>-Assimilation der Pflanzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird experimentell gezeigt, dass beispielsweise die Reaktionen während der COS-Aufnahme, bei der, wie später noch detailliert erläutert wird, das Enzym Carboanhydrase eine Schlüsselrolle spielt, streng mit dem Öffnungsverhalten der Stomata korreliert sind. Studien an Algen haben gezeigt, dass auch ohne Carboanhydrase die Photosynthese fast unbeeinträchtigt weiterläuft, da immer noch genügend CO<sub>2</sub> durch das Chloroplastenstroma diffundiert. Der Grund hierfür ist, dass das Enzym Rubisco ca. 10-15 % des CO<sub>2</sub> direkt fixiert. Während das Enzym Carboanhydrase mit nur ca. 3-5 % an der CO<sub>2</sub>-Versorgung von Rubisco beteiligt ist (Cowan, 1986; Price et al. 1993). Carboanhydrase spielt auch, wie bereits erwähnt, bei den Prozessen, die an der COS-Aufnahme beteiligt sind, eine Schlüsselrolle (Chengelis & Neal 1979, 1980; Miller et al. 1989, Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1991; Protoschill-Krebs et al., 1996; Blezinger, 1995; Blezinger et al., 2000; Kuhn, 1997; Teusch, 1998; Kesselmeier et al., 1999; Kuhn & Kesselmeier, 2000) und diese Arbeit fokussiert sich im Folgenden auf wesentliche Zusammenhänge, die Einfluss auf den COS-Kreislauf haben.

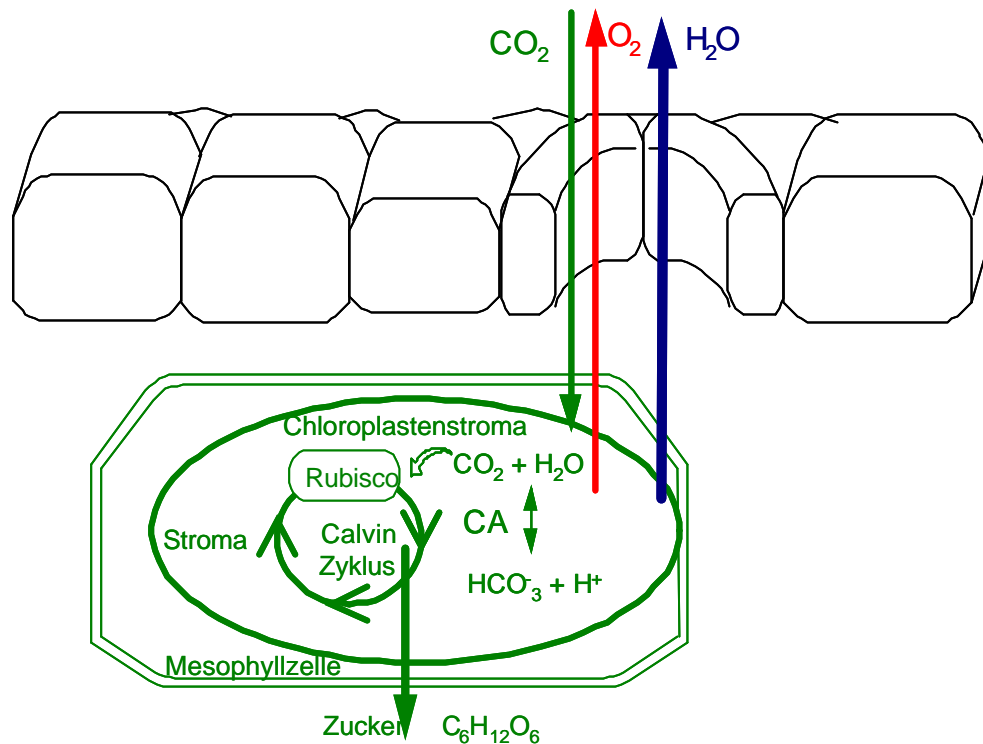
Im Folgenden werden die photosynthetischen Prozesse der C<sub>3</sub>-, C<sub>4</sub>- und CAM-Pflanzen näher beschrieben:

### a) Photosynthese-Zyklus der C<sub>3</sub>-Pflanzen

Die 95 % aller Pflanzen repräsentierenden C<sub>3</sub>-Pflanzen, zu denen die meisten Waldbäume und die wichtigsten Nutzpflanzen wie Weizen, Reis, Gerste und Kartoffeln gehören (Bazzaz & Fajer, 1996), lösen im ersten Schritt CO<sub>2</sub> in den Chloroplastenstroma in einer durch das Enzym Carboanhydrase gesteuerten Reaktion, die den Kohlensäuregehalt innerhalb der MesophyllzellZelle reguliert. Danach wird der als HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> gebundene Kohlenstoff an das Ribulose-1,5-Bisphosphat gebunden.

Es ist aber auch möglich, dass der in CO<sub>2</sub> gebundene Kohlenstoff direkt an Ribulose-1,5-Bisphosphat angelagert wird. Die entstehenden Zwischenprodukte (3-atomiges 3-Phosphoglycerat) aus denen sich der Name C<sub>3</sub>-Pflanze ableitet, werden danach im sog. Calvin-Zyklus zum Endprodukt dem Zucker (Glukose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), umgewandelt. Da Ribulosebisphosphatcarboxylase-Oxygenase auch Sauerstoff binden kann, findet in Anwesenheit von Licht und neben der CO<sub>2</sub> Fixierung, auch die sog. Photorespiration statt. Die Zwischenprodukte dieser Reaktion sind: ein Molekül 3-Phosphoglycerat und Phosphoglycolat. Durch die autotrophe Atmung gelangen, wie bereits in Kapitel 1.2.1 erwähnt, bis zu 50 % des im Calvin-Zyklus fixierten CO<sub>2</sub> wieder in die Atmosphäre (Borriss & Libbert, 1985; Richter, 1996; Richter 1997; Houghton, 1994; Strasburger, 1998 ).

Die Abbildung 5 stellt den Zyklus der Photosynthese der C<sub>3</sub>-Pflanzen schematisch dar.



**Abbildung 5: CO<sub>2</sub>-Fixierung bei C<sub>3</sub>-Pflanzen, in Anlehnung an (Badger and Price, 1994)**

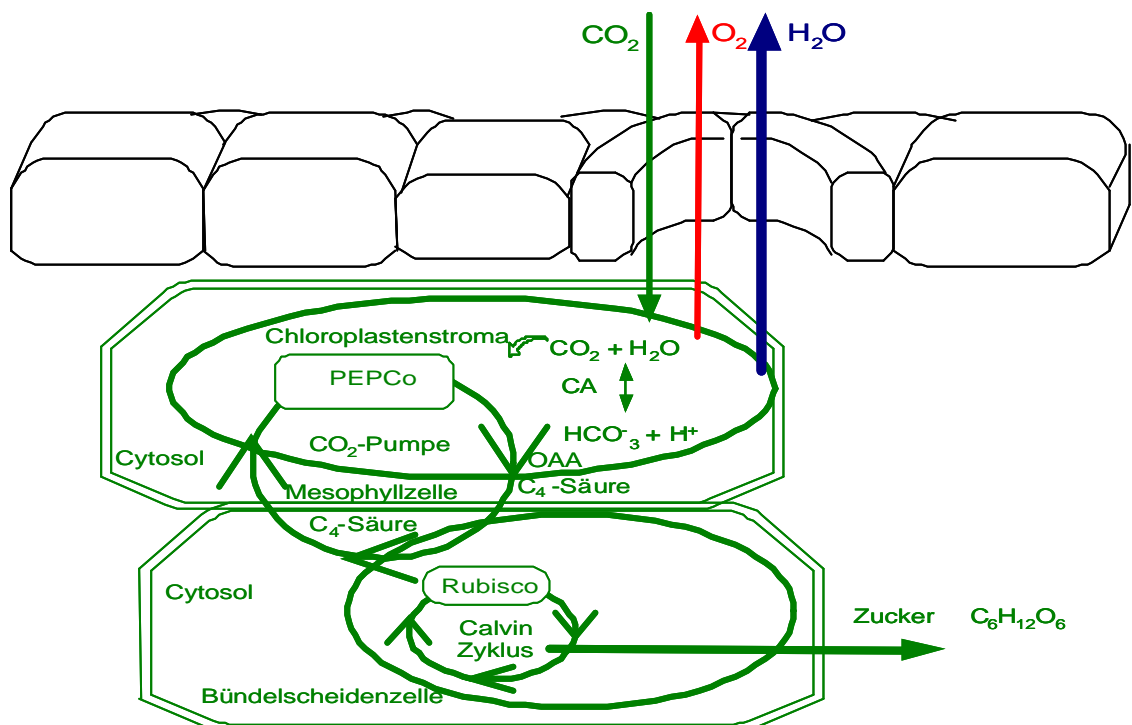
Die Enzyme Carboanhydrase und Rubisco sind bei C<sub>3</sub>-Pflanzen im Chloroplastenstroma lokalisiert (Werdan et al., 1972; Jacobson et al., 1975; Poincelot, 1979; Tsuzuki et al., 1985, Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1992; Protoschill-Krebs et al., 1995,1996)

Zusammenfassend sei darauf hingewiesen, dass bei C<sub>3</sub>-Pflanzen das Enzym Carboanhydrase die Diffusion von CO<sub>2</sub> (als CO<sub>2</sub> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) durch das Chloroplastenstroma erleichtert. CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> konkurrieren um eine Bindung mit dem Enzym Ribulosebiphosphatcarboxylase. Jede Änderung des O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Angebots oder des Konzentrationsverhältnis in der photosynthetisierenden Zelle verschiebt deshalb das Verhältnis zwischen Carboxylierung und Oxygenierung, bzw. zwischen Photosynthese und Photorespiration. Die Photosynthese von C<sub>3</sub>-Pflanzen wird somit von der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration limitiert.

b) Photosynthese-Zyklus der C<sub>4</sub>-Pflanzen

C<sub>4</sub>-Pflanzen, zu denen unter anderem Mais, Hirse, Zuckerrohr und viele Gräser gehören, verringern den Verlust der Photorespiration durch eine Vorfixierung von CO<sub>2</sub> durch den so genannten C<sub>4</sub>-Dicarbonsäurezyklus auf Kosten einer ungünstigeren Energiebilanz (5 Mol ATP/Mol fixiertes CO<sub>2</sub>) im Vergleich zu C<sub>3</sub>-Pflanzen (3 Mol ATP/Mol Fixiertes CO<sub>2</sub>). (Bazzaz & Fajer, 1996),

Die Abbildung 6 stellt diesen Zyklus schematisch dar.



**Abbildung 6: CO<sub>2</sub>-Fixierung bei C<sub>4</sub>-Pflanzen (Badger & Price, 1994)**

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass bei C<sub>4</sub>-Pflanzen fast die gesamte Menge an CO<sub>2</sub> den Katalyseprozess der Carboanhydrase durchläuft und als HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> an PEP-Carboxylase (Pep-Co) weitergeleitet wird (Price & Badger 1989; Price et al., 1993).

Die Vorfixierung von CO<sub>2</sub> beruht im Wesentlichen auf der Beteiligung des Enzymes PEP-Carboxylase (Phosphoenolpyruvatcarboxylase, Pep-Co), welches eine höhere Affinität für CO<sub>2</sub> (Michaelis Konstante:  $K_M=70 \mu\text{mol CO}_2/1$ ) (Borriss & Libbert, 1985) als das Enzym

Ribulosebisphosphat-Carboxylase des Calvinzyklus (Michaelis Konstante:  $K_M = 45 \mu\text{mol CO}_2 / \text{l}$ ) hat. Die ersten Produkte dieser Carboxylierung sind die  $\text{C}_4$ -Dicarbonsäuren Oxalacetat (OAA), Malat oder Aspartat.

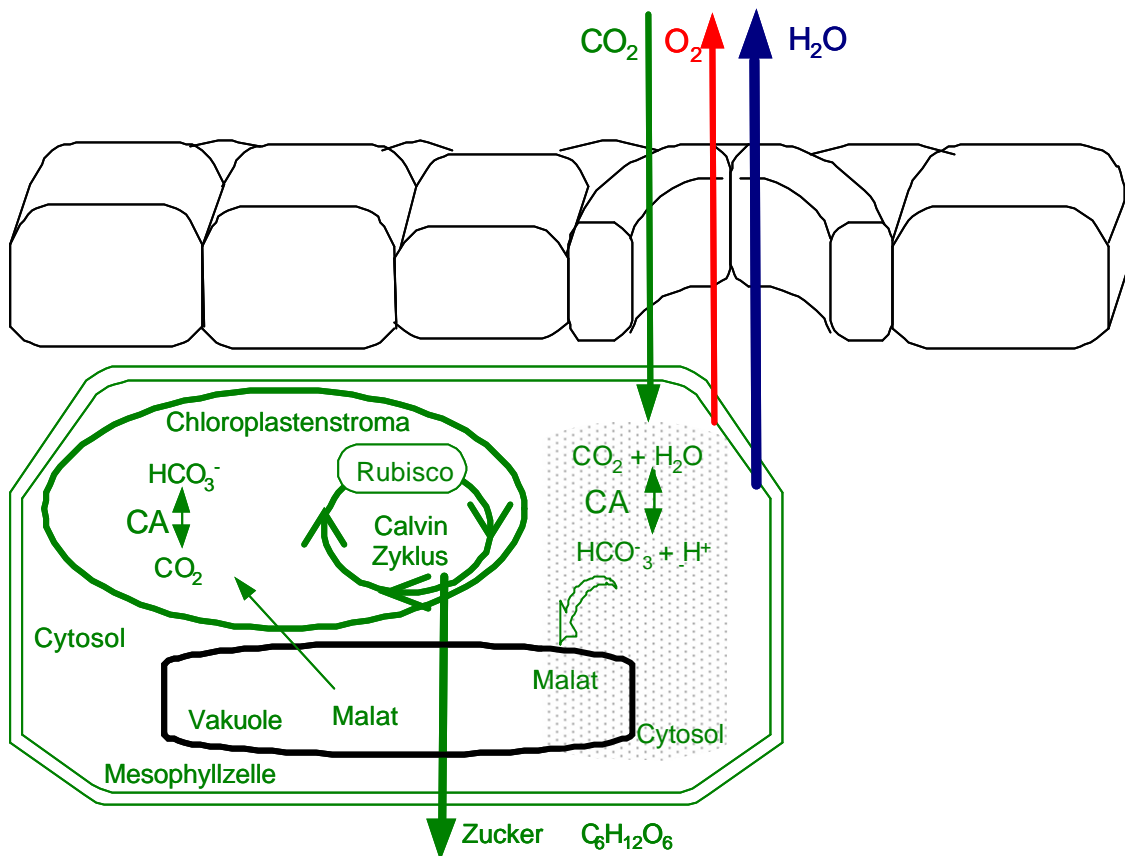
Im Gegensatz zu  $\text{C}_3$ -Pflanzen ist die Lokalisation des Enzyms Carboanhydrase wesentlich komplexer. Es befindet sich hauptsächlich im Zytoplasma der Mesophyllzellen, wo Pep-CO mit  $\text{HCO}_3^-$  versorgt wird (Ku & Edwards, 1975; Burnell & Hatch, 1988, Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1992).

Bei  $\text{C}_4$ -Pflanzen wird das Kohlendioxid dem Oxalacetat (OAA) in den Chloroplasten transportiert und dort zu Malat reduziert. In einer zweiten Variante in Mitochondrien der Bündelscheidenzelle das Kohlendioxid dem Transportmetabolit Aspartat entzogen und dann in die Chloroplasten transferiert. So erfolgt die  $\text{CO}_2$ -Fixierung und Decarboxylierung räumlich getrennt, in Mesophyll- und Bündelscheidenzelle sowie praktisch zeitgleich. Bei  $\text{C}_4$ -Pflanzen wird photorespiratorisch freigesetztes  $\text{CO}_2$  durch das Enzym PEP-Carboxylase refixiert (Borriss & Libbert, 1985). Der so genannte  $\text{C}_4$ -Dicarbonsäurezyklus ist prinzipiell genetisch fixiert (Richter, 1996).

### c) Photosynthese-Zyklus der CAM-Pflanzen

In CAM-Pflanzen, die sich an extrem trockene Standorte mit heißen, hellen Tagen und kalten Nächten angepasst haben, wie beispielsweise Kakteen und Ananas, erfolgt die  $\text{CO}_2$ -Fixierung in der Nacht bei geöffneten Stomata. Der fixierte Kohlenstoff wird über das Zwischenprodukt Malat dem Calvin-Zyklus zugeführt.

Die Abbildung 7 stellt diesen Zyklus schematisch dar.



**Abbildung 7:  $\text{CO}_2$ -Fixierung bei CAM-Pflanzen (Badger & Price, 1994)**

Dieser Zyklus ist wegen der Anwesenheit von Malat und Oxalacetat vergleichbar mit dem  $\text{C}_4$ -Zyklus. Der wesentliche Unterschied zu  $\text{C}_4$ -Pflanzen besteht in der Durchführung der  $\text{CO}_2$  Fixierung in der Nacht zur Vermeidung von Wasserverlusten. Bei CAM Pflanzen erfolgt die  $\text{CO}_2$ -Fixierung in der Nacht und die Decarboxylierung am Tage bei Licht in der Mesophyllzelle. Die CAM Pflanzen werden von physiologischen Faktoren induziert und gesteuert (Richter, 1997).

Untersuchungen von Tsuzuki et al., (1982) haben gezeigt, dass bei CAM-Pflanzen, die Carboanhydrase wie bei  $\text{C}_3$ -Pflanzen in den Chloroplastenstroma lokalisiert wurde.

Zusammenfassend sei bemerkt, dass die Prozesse der  $\text{CO}_2$  Fixierung von Umweltbedingungen wie Strahlung, Temperatur, Feuchte und  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  Verhältnis das Verhalten der Pflanzen steuern.

Die Auswirkung einer erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die Physiologie der C<sub>3</sub>-, C<sub>4</sub>- und CAM-Pflanzen wurde in den letzten Jahren untersucht. Das nächste Kapitel führt in dieses Thema detaillierter ein.

#### **1.2.4 Vegetation unter erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration – Einführender Überblick zum Stand des Wissens**

Die Reaktion der Vegetation auf eine erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration ist stark abhängig von den Bedingungen, unter denen die Pflanzen existieren. Bei guter Nährstofflage sind die Effekte im Allgemeinen ausgeprägter als bei Mangelsituationen. Ebenso beeinflussen das Alter der Pflanze und die meteorologischen Bedingungen das Verhalten entscheidend (Morison, 1988; Warrick et al., 1986; Idso, 1989; Idso & Idso, 1994; Idso & Kimbal, 2001; Idso et al., 2001).

Die Auswirkungen einer erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf physiologische, zytologische und morphologische Parameter sind in der letzten Zeit hauptsächlich an landwirtschaftlichen Pflanzen wie Gerste, Weizen, Reis, Zitronen oder Gramineen-Arten wie Mais erforscht worden. Gemessen an ihrem Vorkommen, sind die so genannten Wildpflanzen in der Erforschung deutlich unterrepräsentiert. Analoges gilt für das Alter der untersuchten Spezies sowie die Dauer der Studien. Es überwiegen Kurzzeit-Studien an Jungpflanzen. Langzeit-Studien sowie Untersuchungen an älteren Pflanzen sind im Vergleich dazu rar.

Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass die Pflanzen auf eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration unterschiedlich und meist erst nach einigen Jahren merkbar reagieren (Idso et al., 1987; Idso, 1989; Eamus & Jarvis, 1989; Körner & Arnone, 1992; Mousseau & Saugier, 1992; Mousseau, 1993; Bazzaz, 1990, 1992; Feld et al., 1992; Norby & O Neal, 1986, 1989; Idso et al., 1991; Idso & Kimball, 1991(a, b); 1992 (a,b) Norby et al., 1992, 1999; Oechel et al., 1993, 1996; Idso & Idso, 1994; Owensby et al., 1993, 1996; 1997; Zak et al., 1993; Kemp et al., 1994; Gunderson et al., 1993; Gunderson & Wullschleger 1994; Jackson et al., 1994, 1998; Idso et al., 1996; Reid et al.; 1998; Reid et al., 1998; Ceulemanns und Mousseau 1994; Arnone and Körner, 1995; Ellsworth et al., 1995; Cardon 1996; Hungate et al., 1996, 1997; Johnson et al., 1996, 1997; Bersnston und Bazzaz, 1997, 1998; Franck et al., 1997; Stocker et al., 1997, Idso & Kimball, 2001; Idso et al 2001)

Die Veröffentlichungen belegen bei erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unterschiedliche Beeinflussungen auf:

- a) Photosynthese (Photorespiration, Dunkelatmung usw.)
- b) Wasserhaushalt und stomatare Leitfähigkeit
- c) Blattmorphologie, Blattfläche und Biomasse
- d) Stickstoffgehalt (Limitierung des Assimilationstransportes)
- e) Enzymatische Aktivität
- f) Reproduktion und Population

Bei den Beeinflussungen kann es sowohl interspezifische (von Pflanzenart zu Pflanzenart) als auch intraspezifische (individuell innerhalb einer Pflanzenart) Unterschiede geben, die außerdem noch von der genetischen Veranlagung der einzelnen Pflanzen abhängen. Wie sich die genetisch fixierte Anpassungsfähigkeit einer Pflanze letztendlich auswirkt, hängt zusätzlich noch von deren so genannter biologischer Veranlagung (Prädisposition) ab. Die Pflanzen reagieren also nicht einheitlich auf die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Deshalb belegen zahlreiche Untersuchungen gegenläufige Trends. Es ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich, all die Effekte zu diskutieren. Somit beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Einführung in grundlegende Zusammenhänge, die mit einer erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration verbunden sind, um mögliche, wesentliche Trends zu skizzieren.

#### a) **Photosynthese**

Im Zusammenhang mit der Photosynthese wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen mit einer erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration bei verschiedenen Pflanzen zahlreiche unterschiedliche Effekte beobachtet:

- Erhöhung der Photosyntheserate (CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate) und der Quantenausbeute
- Verringerung der Photorespiration (Lichtatmung)
- Verringerung der Dunkelatmung
- Beeinflussung der Sekundärprozesses Calvin-Zyklus über die Schlüsselenzyme Ribulosebisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubP-CO), Carboanhydrase und andere Enzyme

- Beeinflussung der Kohlenhydratproduktion, Stärkeakkumulation

Von diesen Effekten wird im Folgenden wegen deren besonderer Relevanz auf die Photorespiration, Dunkelatmung und die enzymatische Aktivität etwas näher eingegangen.

Grundsätzlich wird bei einer erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration die Photorespiration oder Lichtatmung gehemmt. Die Photorespiration wird durch die Oxygenase-Funktion der Ribulosebisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubP-CO) eingeleitet. Sauerstoff, hohe Temperaturen, hohe Lichtintensitäten oder reduzierte pH-Werte initiieren im Allgemeinen die Oxygenase-Funktion. Kohlendioxid kann bei diesem Prozess Sauerstoff verdrängen. Eine erhöhte Kohlendioxidkonzentration verstärkt die Verdrängung. Die Hemmung dieser Art der Sauerstoffaufnahme durch die Pflanze, ist besonders für  $\text{C}_3$ -Pflanzen relevant, da  $\text{C}_4$ - und CAM-Pflanzen die Photorespiration ohnehin durch „Vorfixierung“ von  $\text{CO}_2$  über den vorgeschalteten  $\text{C}_4$ -Dicarbon-Säurezyklus und die damit verbundene  $\text{CO}_2$ -Anreicherung innerhalb der Thylakoide vermeiden (vergleiche auch Abbildungen 5 bis 7).

Die Tatsache, dass  $\text{C}_3$ -Pflanzen durch die reduzierte Photorespiration und einen geringeren Wasserverlust von einer erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration mehr profitieren als  $\text{C}_4$ -Pflanzen, könnte global zu einer Verschiebung des Verhältnisses  $\text{C}_3$ - zu  $\text{C}_4$ -Pflanzen führen (Osmond et al., 1980; Acock & Allen, 1985; Jones, 1986; Bolin et al., 1986; Bazzaz & Fajer, 1996).

Andere wissenschaftliche Untersuchungen diskutieren eine Verminderung der Dunkelatmung in den Blattorganen, (Reduktion der Abgabe von  $\text{CO}_2$  in der Nacht) durch eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration. (Bunce, 1990; Bunce, 1992). Die damit verbundene Hoffnung, die Verminderung der Dunkelatmung könnte die anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen kompensieren, wird bislang durch den anhaltenden globalen Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration deutlich ad absurdum geführt.

## **b) Wasserhaushalt und stomatäre Leitfähigkeit**

Eine erhöhte atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration beeinflusst durch Reduktion der Transpiration den Wasserhaushalt über die Reduktion der stomatäre Leitfähigkeit. Das stomatäre Öffungsverhalten wird ebenfalls über die Bodenfeuchte, die Lichtintensität, die Temperatur, Dampf Druck und  $\text{CO}_2$  gesteuert Murray, 1997.

Grundsätzlich wurde bei  $C_3$  und  $C_4$  Pflanzen unter einer erhöhten  $CO_2$ -Umgebungskonzentration eine Verminderung der stomatären Leitfähigkeit festgestellt (Murray, 1997). Morison (1987) fand eine Reduktion bis ca. 40 % der Spaltöffnung. Die Verringerung der Dichte der Stomata führt zu einer Verminderung der Transpiration und damit zu einer Erhöhung der so genannten Wassernutzungseffizienz (englische Abkürzung: WUE = Assimilationsrate / Transpirationsrate). Die geringere Transpiration dem gegenüber führt zu einer Erhöhung der Blatttemperatur (Lawlor & Mitchell, 1991; Beerling et al., 1997; Allen et al., 1998, Huang et al., 1999; Osborne, 2000; Blaschke et al., 2001).

Diesen allgemeinen Tendenzen stehen allerdings einige Ausnahmen entgegen, bei denen keine Verminderung der stomatären Leitfähigkeit beobachtet wurde, im Gegenteil sogar eine Erhöhung (Clark et al., 1999; Tognetti et al., 1998).

Schlussendlich ist der Einflussmechanismus einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration auf das stomatäre Öffnungsverhalten noch nicht vollständig geklärt.

### c) **Blattmorphologie und Biomassenentwicklung**

In zahlreichen Untersuchungen von Kimbal et al, 1983; Lawlor und Mitchell, (1991); Rozema, (1993); Shulze & Mooney; (1993); Hattenschwiler et al., (1997a, b,c); Hattenschwiler & Koorner, (1997); Centritto et al, (1999); Li et al, (2000); Marriot et al., (2001) wurde der Einfluss einer erhöhten  $CO_2$ -Umgebungskonzentration auf die Blattmorphologie und Biomassenentwicklung analysiert. Die Tabelle 1 gibt eine einführende Übersicht zum Einfluss einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration auf relevante Parameter, wobei einschränkend festgestellt wird, dass auch gegenläufige Trends veröffentlicht wurden.

<b>Parameter</b>	<b>Einfluss der <math>CO_2</math>-Erhöhung</b>
Zellengröße	Zunahme
Zellenanzahl	Zunahme (auch Zunahme der Zellschichten)
Blattfläche/ Blattgewicht	kurzfristig Zunahme, langfristig Abnahme möglich
Blattfläche/Blattgewicht	Zunahme und zusätzlicher Stärkeakkumulation
Individuelles Blattgewicht	Zunahme
Wurzel/Spross	unverändert

**Tabelle 1: Übersicht zu Auswirkungen einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration**

Die Untersuchungen zeigen, dass die Effekte bei hoher Lichtintensität stärker ausgeprägt sind, wogegen sie bei schwacher Lichtintensität nicht festgestellt werden konnten. Schulze und Mooney, (1993) sowie Li et al., (2000) berichten, dass Pflanzen mit Symbiosen, wie die sog. Mycorrhiza (Idso, 1989), zur Stickstoffixierung allgemein mit einer größeren Stimulation des Wachstums reagieren als Nicht-Stickstoffixierer.

Porter (1993) veröffentlicht in Studien an 156 verschiedenen repräsentativen Spezies, dass grundsätzlich der Wachstumszuwachs bei C<sub>3</sub>-Pflanzen mit ca. 41 % am stärksten ist, gegenüber 22 % bei C<sub>4</sub>-Pflanzen und 15 % bei CAM-Pflanzen. Ceulemans und Saugier (1992) führen die beobachteten Unterschiede der Biomassen-Erhöhung unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration bei Laubbäumen mit 63 % gegenüber 38 % für Nadelbäume auf die höhere photosynthetische Kapazität der Laubbäume zurück.

#### d) Stickstoffgehalt

Viele Wissenschaftler beobachteten in ihren Untersuchungen an verschiedenen Spezies eine Reduktion des Blatts stickstoffgehaltes unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration (Barták et al., 1998; Curtis & Wang 1998, Pan et al., 1998, Peñuelas & Estiarte, 1998, Pettersson et al., 1993; Pettersson & McDonald, 1994 und Stitt & Krapp, 1999. Außerdem berichten Freedon et al., (1998); Crafts-Brandner & Salvucci, (2000); Fangmeier et al., (1997) Fangmeier et al., (2000); Blaschke et al., (2001) noch von einer damit im Zusammenhang stehenden Reduktion der Photosyntheserate, der Rubisco-Aktivität und der Biomasse.

Einige Untersuchungen konnten gleichzeitig eine Abnahme der Rubisco-Aktivität und des Stickstoffgehaltes festzustellen (Tissue et al., 1993, 1999; Sims et al., 1998; Lawlor & Mitchell, 1991; Stitt & Krapp, 1999; Li et al., 2000). Man konnte dies auf eine Limitierung des Assimilationstransportes infolge des geringeren Stickstoffgehaltes zurückführen. Demgegenüber fanden Lewis et al. (1999) in ihren Untersuchungen an *Lolium Temulentum L. Ba 3081* eine Abnahme des Stickstoffgehaltes und eine Zunahme der Rubisco-Aktivität.

Andere Untersuchungen an den folgenden Spezies

- *Triticum aestivum L.cv. Mimaret* (Fangmeier et al., 1997)

- *Picea abies* Karst (Hattenswiller und Körner, 1998)
- *Populus deltoides* hin (Wait et al., 1999);
- *Hordeum vulgare* cv. Alexis ( Fangmeier et al., 2000);
- *Pinus ponderosa* P & C Lawson (Johnson et al., 2000)

zeigen im Gegensatz keine Veränderung des Stickstoffgehaltes.

#### e) **Enzymatische Aktivität**

Im Zusammenhang mit einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration ist in verschiedenen Untersuchungen die Aktivität der folgenden Enzyme analysiert worden: Carboanhydrase, Superoxidase - Dismutase, Peroxidase, Katalase, Ascorbatperoxidase, Glutathionperoxidase, Glutathionreduktase, Fruktuose1,6-bisphosphatase, NADP-Malatdehydrogenase, ADP-Glucosepyrophosphorylase, Cytocrome-oxidase, Succinatdehydrogenase, Rubisco, Phosphoenolpyruvatekarboxylase (PEP-CO), Guaicolperoxidase und Superoxydismutase.

Das in diesem Zusammenhang anhand der Veröffentlichungen am häufigsten untersuchte Enzym ist Rubisco. Zahlreiche Untersuchungen an verschiedenen Spezies deuten auf eine Reduktion der Rubisco-Aktivität unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration hin (Humbeck et al., 1996; Sicher & Kremer, 1996; Vu et al., 1997; Barták et al., 1998; Cook et al., 1998; Wait et al., 1999; De la Viña et al., 1999; Crafts-Brandner & Salvucci, 2000; Laitinen et al., 2000; Rogers & Humphries, 2000; Blaschke et al., 2001).

Aber auch die Zunahme der Rubisco-Aktivität wurde beobachtet (El Kohen, 1993 ; Majeau & Coleman, 1996; Booker et al 1997; Stirling et al., 1997; Reid et al., 1998; Lewis et al., 1999; Drennan & Nobel, 2000; Lutz et al., 2000). Einige Autoren fanden keinen Unterschied der Rubisco-Aktivität unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration im Vergleich zu normalen Bedingungen (Delgado et al., 1994; Sicher & Kremer , 1996; Fordham et al., 1997; Li et al., 1999; De Lucia & Thomas, 2000; Blaschke et al., 2001).

Dem Enzym Carboanhydrase wird im Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-Aufnahme die Schlüsselrolle zugesprochen (Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1992; Kesselmeier et al, 1993; Kuhn, 1997; Kuhn & Kesselmeier, 2000; Kesselmeier et al., 1999,

Blezinger et al 2000). Graham & Reed, (1971), Randall & Bouma, (1973), Chang, (1975), Porter und Grodzinski, (1984) und Arakelyan et al., (1993) fanden unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration eine Reduktion der Aktivität der Carboanhydrase. Publikationen zum Verhalten des Enzyms Carboanhydrase unter verschiedenen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration sind im Vergleich zum relativ extensiv untersuchten Enzym Rubisco relativ rar. Deshalb wird in dieser Arbeit das Verhalten des Enzyms Carboanhydrase unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration und dessen Einfluss auf die COS-Austausch-Prozesse gesondert behandelt.

#### **f) Reproduktion und Population**

Beobachtungen an einigen Entwicklungsprozessen, wie z.B. dem Blühen, zeigen sowohl positive als auch negative Einflüsse (Morison, 1985, 1987). Ergebnisse von Versuchen an Samen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration haben einen positiven physiologischen Effekt auf dessen Dormanz gezeigt. Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration sind die Samen länger zur Keimung fähig. Außer einer Verlängerung der vegetativen Phase wurde zusätzlich beobachtet, dass sich die generative Phase schneller ausbilden kann, ohne dass die Pflanze einer ausgeprägten Wachstumssteigerung unterliegt. Dies deutet darauf hin, dass es zu Aktivitätsverschiebungen zwischen der Fruchtbarkeit der Pflanzen und der tierischen Bestäubung kommen kann. (Idso, 1989; Murray, 1997).

Grundsätzlich steigt bei guter Nährstofflage die Produktivität der Vegetation. Es werden sich diejenigen Individuen durchsetzen, die das verbesserte Angebot an CO<sub>2</sub> am effektivsten in zusätzliche Wuchsleistung umsetzen können. Dabei sind die Dominierungsmechanismen jedoch zusätzlich abhängig von Konkurrenz-Interaktionen innerhalb einer Population und der Diversität einer Pflanzengemeinschaft. Auf die Dauer können jedoch Pflanzen mit einer besseren Reservestoffallokation der Wurzeln die Konkurrenzpflanzen überwachsen (Bazzaz, 1990).

Die Auswirkung einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration und einer Klimaveränderung auf die Vegetation wurde von verschiedenen Wissenschaftlern diskutiert. Basierend auf der Beziehung zwischen Klima und Vegetationszonen wurden Abschätzungen der Veränderung der Klima und deren Wirkung auf die globale Vegetation projiziert (Emmanuel et al., (1985 a);

Emmanuel et al., (1985 b); Shugart et al., 1986; Sargent, 1988, Solomon, 1986, 1993 and Rizo & Wirken 1989).

Für diese Projektion wurde das Klassifizierungssystem von Holdridge (1964) analysiert und modifiziert (Emmanuel et al., 1985 a; Emmanuel et al., 1985 b). Die Analyse zeigte folgende Wirkung auf das Ökosystem

Vegetationszonen	Einfluss der CO <sub>2</sub> -Erhöhung auf die Ausbreitung der Vegetationszonen
Global	6 % Reduktion
Boreale Zone	37 % Reduktion
Tundra	32 % Reduktion
Tropische Zone	28 % Zunahme
Subtropische Zone	22% Reduktion
Subtropische Wüste	37 % Zunahme
Wiesen	25 % Zunahme
Wüste	7 % Zunahme

**Tabelle 2: Übersicht zu Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration**

Die Projektion von Emmanuel et al., (1985 a) und Emmanuel et al., (1985 b) etabliert, dass unter einer Erhöhung der Temperatur Vegetationszonen wie z.B. die borealen Zonen von anderen Vegetationstypen ersetzt werden können.

Zusammenfassend sei festgehalten, dass wahrscheinlich die C<sub>3</sub>-Pflanzen am meisten von einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration profitieren werden. Dadurch kann sich das globale Verhältnis der C<sub>3</sub> zu C<sub>4</sub>-Pflanzen zugunsten der C<sub>3</sub>-Pflanzen verschieben. Erklärungen hierfür liegen in der spezifischen Art und Weise der biochemischen CO<sub>2</sub> Fixierung dieser Pflanzen und der Anpassungsmechanismen auf eine erhöhte Atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration und die Veränderung des Klimas. Die Prozesse sind jedoch, wie oben skizziert, zu komplex, als dass es genügen würde, nur die Prozesse der Photosynthese vor dem Hintergrund einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration zu hinterfragen, um zuverlässige Prognosen zur weiteren globalen Entwicklung der Vegetation abzugeben.

### 1.3 Die Bedeutung von Carbonylsulfid (COS) in der Chemie der Atmosphäre

#### 1.3.1 Der biogeochemische Kreislauf des Schwefels<sup>1</sup>

Der Schwefelkreislauf wird als einer der wichtigsten biogeochemischen Stoffkreisläufe auf der Erde angesehen. Schwefel<sup>2</sup> ist die Basis vieler biochemischer Systeme, die auf Redox-Reaktionen beruhen. Schwefel und seine Verbindungen sind Bestandteil vieler Proteine wie Cystein und Methionin. In chemischen Verbindungen ist der Zustand von Schwefel inwert, so dass er relativ leicht in andere Zustände übergehen kann.<sup>3</sup> Durch diese Eigenschaft erweist er sich in vielen biochemischen Prozessen als geeigneter Elektronen-Spediteur.

Die Abbildung 8 stellt schematisch dar, nach welchen grundsätzlichen Mechanismen und über welche Phasen diese Schwefelverbindungen innerhalb des globalen biogeochemischen Schwefelkreislaufes entstehen und wieder abgebaut werden, und welche Rolle sie für das Weltklima spielen.

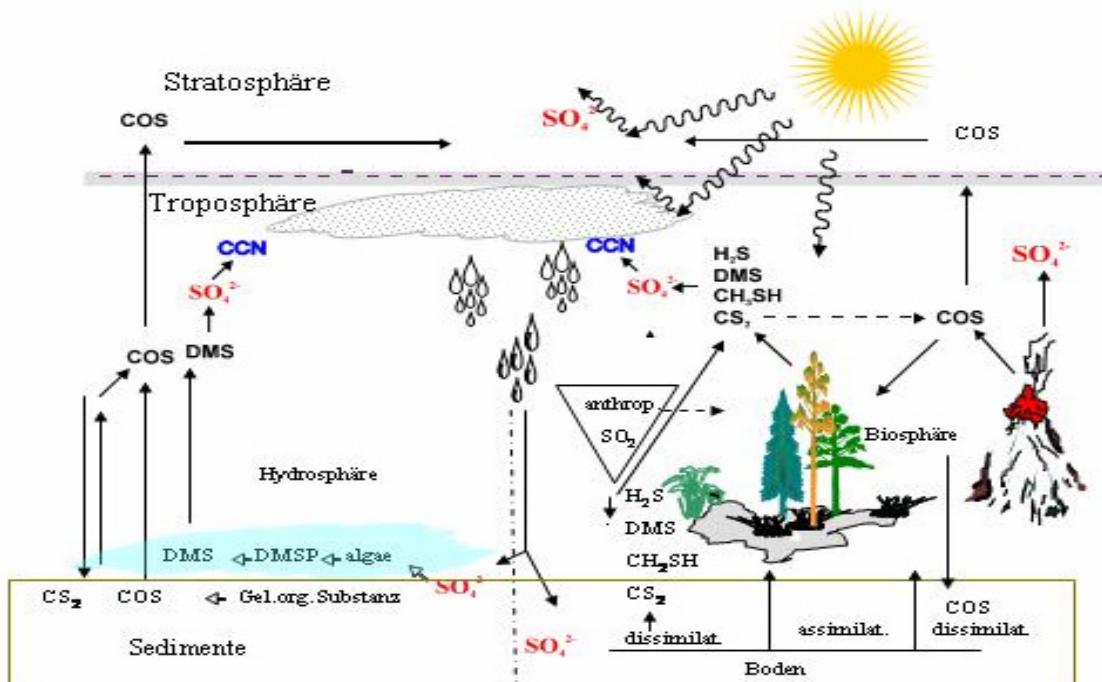


Abbildung 8 : Schematische Darstellung des globalen COS-Kreislaufs in Anlehnung an (Kuhn, 1997)

<sup>1</sup> 1777 durch den französischen Chemiker Antoine Lavoisier (1743 Auxerre †1894) identifiziert; 6-häufigstes Element der Erde (bezogen auf das Gewicht); Schwefel kommt vor allem in kristalliner Form und in chemischen Verbindungen als Sulfid oder Sulfat vor. Erhebliche Mengen sind in Erdöl, Erdgas und Kohle enthalten.

<sup>2</sup> Die geschätzten jährlichen Schwefelumsätze entsprechen denen des Stickstoffs.

<sup>3</sup> von -II (Sulfid, S<sub>2</sub><sup>-</sup>) zu + VI Sulfat, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

In der Atmosphäre wurden neben  $\text{SO}_2$  bislang folgende Schwefelgase identifiziert, die man anhand ihrer troposphärischen Verweilzeiten in 2 Gruppen aufteilen kann. Die Kurzlebige Schwefelverbindungen wie Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Dimethylsulfid ( $\text{H}_3\text{CSCH}_3$  bzw. DMS), Schwefelkohlenstoff ( $\text{CS}_2$ ) und Methylmercaptan ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ) (Junge, 1961; Maroulis und Bandy, 1977; Sandalls und Penkett, 1977). Die zweite Gruppe die Langlebige Schwefelverbindungen Carbonylsulfid ( $\text{COS}$ ) (Hans et al., 1975).

Die kurzlebigen Schwefelverbindungen (Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Dimethylsulfid ( $\text{H}_3\text{CSCH}_3$  bzw. DMS), Schwefelkohlenstoff ( $\text{CS}_2$ ) und Methylmercaptan ( $\text{CH}_3\text{SH}$ )) oxidieren in der Troposphäre unter dem Einfluss von kurzwelliger Strahlung innerhalb von einigen Stunden bis wenigen Tagen bei Präsenz von Ozon und Hydroxyradikalen (Andreae & Crutzen, 1997)<sup>1</sup>, zu  $\text{SO}_2$  und bilden zusammen mit Wasser schlussendlich Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Aus den Schwefelsäuregasen entstehen wegen ihres hohen Gleichgewichtsdampfdruckes Aerosole<sup>2</sup> (so genannte Sulfat-Aerosole) mit relativ geringer troposphärischer Lebensdauer von einigen Tagen bis Wochen. Andere Autoren postulieren dass auch DMS eine wichtige Rolle bei der Bildung der Sulfat-Aerosole in der Stratosphäre spielt (Kley et al., 1996; Kjellström, 1998).

Die Aerosole stellen als Partikel oder suspendierte Tröpfchen so genannte Wolkenkondensationskerne (engl. Cloud Condensation Nuclei-CCN) dar und beeinflussen so direkt die Wolkenbildung und Niederschläge, was sich schließlich durch die Erhöhung des Reflexionsvermögens der Atmosphäre (Albedo) auf den Strahlungshaushalt der Erde auswirkt (Wigley, 1988; 1989; Charlson et al., 1992; Andreae, 1994). Der Schwefel gelangt hauptsächlich über die so genannte nasse Deposition von  $\text{SO}_4^{2-}$  bzw.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  zur Erdoberfläche zurück. Er wird dann über die dissimilatorische Sulfatreduktion der Mikroorganismen im Boden oder über die assimilatorische Sulfatreduktion der Pflanzen in organische Verbindungen eingebettet. Reduzierte Schwefelverbindungen können sowohl durch

- direkte Emission als auch
- beim Abbau

dieser biologischen Kompartimente wieder in den Schwefel-Kreislauf gelangen.

---

<sup>1</sup> Wie auch die meisten Spurengase.

<sup>2</sup> Troposphärische Aerosole bestehen vor allem aus dem Sulfation der Schwefelsäure, Ammonium- ( $\text{NH}_3^+$ ) und Nitrationen ( $\text{NO}_3^-$ ) sowie Staub, Spurenmetallen, organischem Material und elementarem Kohlenstoff.

Die Tabelle 3 beinhaltet den geschätzten globalen Schwefelhaushalt. Bemerkenswert ist, dass heutzutage die jährlichen industriellen Schwefelemissionen<sup>1</sup> die gleiche Größenordnung der natürlichen Quellen der Ozeane, Böden, Vegetation und der Biomassenverbrennung erreicht haben (Cullis & Hirschler, 1980; Andreae & Jaeschke, 1992).

Natürliche Quellen	Emissionsrate [Tg (S) a <sup>-1</sup> ]	Schwefelkomponenten
Ozeane	20-52	DMS, COS, H <sub>2</sub> S, CS <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Vulkane	8-11	SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S
Böden und Pflanzen	4-15	H <sub>2</sub> S, DMS, CS <sub>2</sub> , COS
Biomassenverbrennung	>2,6	SO <sub>2</sub> , COS
Küsten-Feuchtgebiete	2	H <sub>2</sub> S, DMS, COS, CS <sub>2</sub>
Summe anthropogener Quellen	93 ± 15	SO <sub>2</sub> , CS <sub>2</sub> , COS, H <sub>2</sub> S

**Tabelle 3: Abschätzung der natürlichen und anthropogen verursachten globalen Schwefelemissionen (Cullis & Hirschler, 1980; Andreae & Jaeschke, 1992)**

Die Emissionen von Carbonylsulfid werden auf 0,1 bis 1,3 Tg S/a geschätzt. Quellen sind vor allem die Ozeane, Vulkane, anaerobische Böden, Pflanzen, Küstenregionen und Biomassenverbrennung (Chin & Davis, 1993).

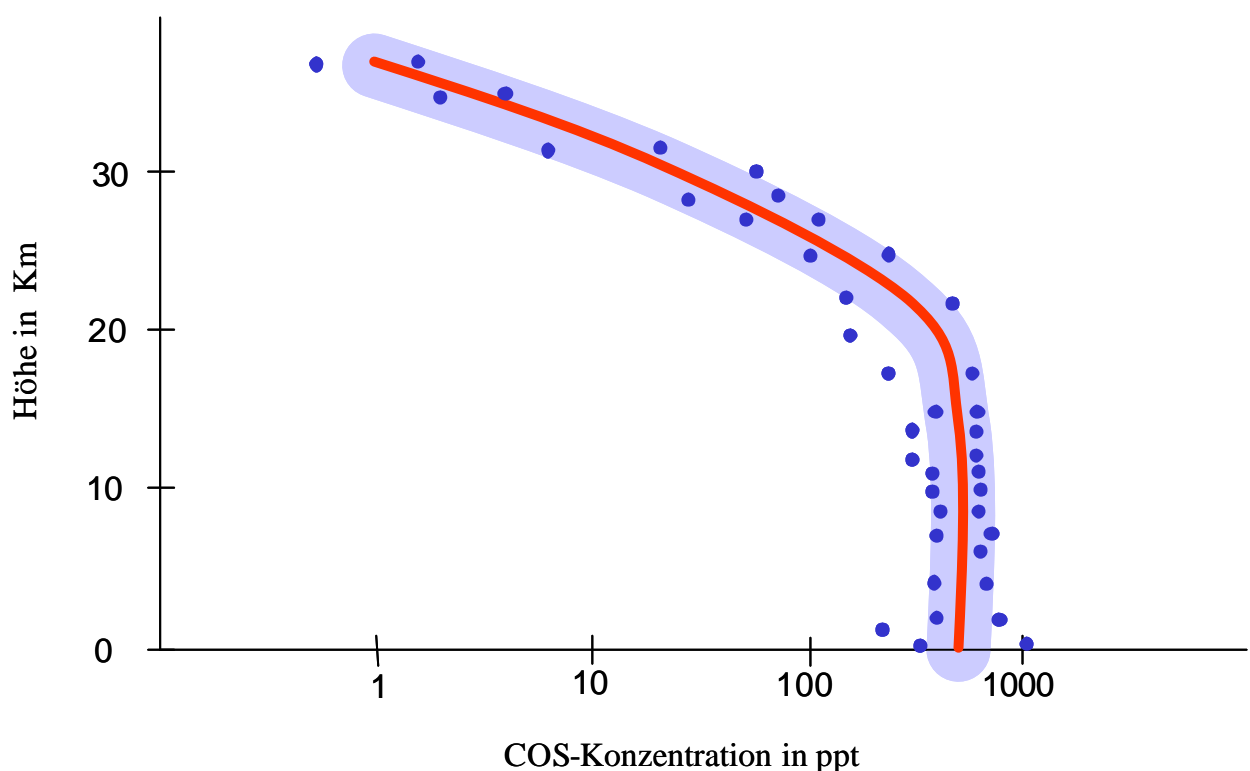
### 1.3.2 Die atmosphärische Konzentration von COS

COS ist eine langlebige Schwefelverbindung in die Atmosphäre mit einer Lebensdauer von 2-3 Jahren Griffith et al., (1998). COS wurde von Hans et al., 1975 in der Atmosphäre detektiert und im Jahr 1976 wurde von Crutzen als Quelle für die Sulfataerosole in der Stratosphäre angesehen. Kürzliche Studien zeigen, dass COS durch Konvektion bis in die

---

<sup>1</sup> Hauptsächlich in Form von SO<sub>2</sub>, als Produkt der Verbrennung fossiler Brennstoffe.

Stratosphäre transportiert wird (Kjellström, 1998; Rodhes, 2000). Die atmosphärische Konzentration der reduzierten Schwefelverbindung Carbonylsulfid (COS) beträgt annähernd 500 ppt. Messergebnisse weisen im Mittel in der Troposphäre ca. 490 ppt und in der Stratosphäre 380 ppt aus. Die Abbildung 9 stellt die Höhenabhängigkeit der COS-Konzentration dar, indem sie in Anlehnung an die Veröffentlichung von Chin und Davis, (1995) Messwerte unterschiedlicher Messkampagnen zusammenfasst. Zusätzlich wurden relevante Minimal- und Maximalwerte dieser Kampagnen für die entsprechenden Höhen als Punkte eingetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Konzentration in der Troposphäre innerhalb der angedeuteten Streuung als konstant angesehen werden kann.

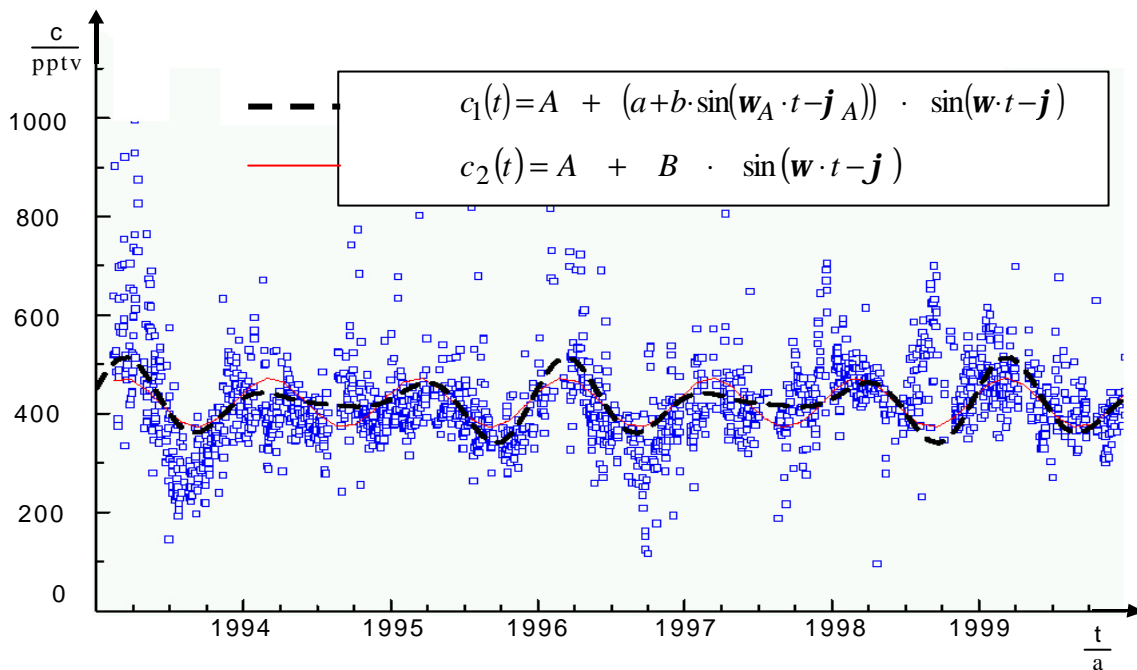


**Abbildung 9: Höhenabhängigkeit der COS-Konzentration in Anlehnung an Chin & Davis (1995)**

Auffällig bei den Messungen ist der besonders große Streubereich der Messresultate insbesondere in geringen Höhen bis 2 km. In diesen Höhen wurden COS-Konzentrationen von ca. 300 bis 1100 ppt gemessen. In geringen Höhen ist die COS-Konzentration sehr stark abhängig von der geographischen Lage, bzw. lokalen Quellen und Senken (Chin & Davis, 1995).

Der Gesamtanteil von COS in der Atmosphäre wird auf ca. 5,2 Tg geschätzt.<sup>1</sup> Entsprechend des unterschiedlichen Mischungsverhältnisses befinden sich ungefähr 4,63 Tg in der Troposphäre und 0,57 Tg in der Stratosphäre (Chin & Davis, 1995).

Neben der geographischen Abhängigkeit der COS-Konzentration sind in letzter Zeit auch die zeitlichen Variationen der COS-Konzentration analysiert worden. Die Abbildung 10 stellt die in den Jahren 1993 bis 2000 am Taunus-Observatorium gemessene COS-Konzentrationen und zwei unterschiedliche Approximationen nach Xu (2000) dar.



**Abbildung 10: Approximation gemessener COS-Konzentrationen durch zwei verschiedene Zeitreihen nach Xu (2000) .**

Die Tabelle 4 enthält die für Simulationen nach Xu (2000) notwendigen Koeffizienten der Approximationsfunktionen aus Abbildung 10.

Approximation	Amplitude				w	j	A
	a	b	w <sub>B</sub>	j <sub>B</sub>			
C <sub>1</sub> (t)	49,6	44,7	2p/3	0,11	2p	0,20	422,5
C <sub>2</sub> (t)	B				2p	0,18	422,5
	49,6						

**Tabelle 4: Koeffizienten der Aproximationsfunktionen für die zeitliche Änderung der COS-Konzentration nach Xu (2000).**

<sup>1</sup> Damit ist COS die zahlenmäßig bedeutendste reduzierte Schwefel-Verbindung (Chin & Davis) .

Nach Xu (2000) liegen 96 % aller Messwerte der COS-Konzentration innerhalb des Bandes von 100-1000 ppt. Die Approximationen heben zwei Periodizitäten der Zeitreihe hervor: 1 Jahr und 3 Jahre. Ein linearer Trend in Form eines kontinuierlichen Ansteigens oder Abfallens der atmosphärischen COS-Konzentration ist aus diesen Messungen nicht erkennbar.

### 1.3.3 Chemischer Hintergrund der Bildung von Sulfat-Aerosole aus COS

Lange Zeit nach der Entdeckung der stratosphärischen Sulfataerosolschicht durch Junge (1961), dem Junge-Layer, suchte man nach einer Erklärung, wie das stratosphärische Aerosol entsteht. Schwefelverbindungen wie  $\text{SO}_2$ , DMS oder  $\text{H}_2\text{S}$  reagieren wegen ihrer Reaktivität mit OH zu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Diese Säure bildet Partikel, die bereits erwähnten Wolkenkondensationskerne, oder kondensiert an schon vorhandenen Aerosolpartikeln. Deshalb können diese Verbindungen nicht in relevanten Größenordnungen bis in die Stratosphäre gelangen. Anders sind die Zusammenhänge bei COS, welches in der Troposphäre relativ inert ist.

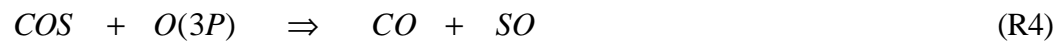
Die globale Aufenthaltsdauer von COS in der gesamten Erdatmosphäre liegt ungefähr zwischen 2 und 7 Jahren, wobei die mittlere atmosphärische (troposphärische) Lebenszeit auf 4,3 Jahre geschätzt wird (Chin & Davis, 1995; Johnson, 1981; Khalil & Rasmussen, 1984; Griffith et al., 1988). Auf diesen relativ langen Verweilzeiten von COS in der Atmosphäre beruht die klimarelevante Bedeutung von COS. Das in der Atmosphäre relativ inerte Gas kann so in die Stratosphäre gelangen, wo es in ca. 20-25 km Höhe über mehrere chemische Reaktionen in Sulfataerosol umgewandelt werden kann (Crutzen 1976, Johnson, 1981; Khalil & Rasmussen, 1984; Mihalopoulos et al., 1991; Rodríguez et al., 1991; Lacis et al., 1992; Grainier & Brasseur, 1992; Chin & Davis, 1993; Chin & Davis, 1995)

Für die Umwandlung von COS in Aerosole in der Atmosphäre werden in der Literatur folgende Reaktionen vorgeschlagen (Crutzen, 1976; Johnson, 1981; Khalil & Rasmussen, 1984; Mihalopoulos et al., 1991; Chin & Davis, 1993; Chin & Davis, 1995):

1. Photodissoziation, zersetzt Carbonylsulfid in Kohlenmonoxid und Schwefel. Voraussetzung dieser Reaktion ist, dass die Wellenlänge der Strahlung kleiner als 388 nm ist:



2. Photooxydation, zersetzt Carbonylsulfid in Kohlenmonoxid und Schwefelmonoxid:



3. Photooxidation mit OH zersetzt, Carbonylsulfid in Kohlendioxid und HS:



Die aus den oben angeführten Reaktionen von COS resultierenden Zersetzungsprodukte S, SO und HS können anschließend weiter reagieren, bis schließlich  $\text{H}_2\text{SO}_4$  entstehen kann.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kann kondensieren und Aerosole bilden. Die steile Abnahme der stratosphärischen COS-Konzentration (oberhalb der Tropopause), die bereits in der Abbildung 9 zu sehen ist, wird von den Autoren als ein Zeichen für die Wirksamkeit der Zersetzung von COS durch diese o.g. Reaktionen gewertet (Chin & Davis, 1995; Inn et al., 1979; Louisnard et al., 1983; Leifer, 1989; Engel & Schmidt, 1994; Kourtidis et al., 1995). Eine detailliertere Analyse dieser Prozesse würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, weshalb zur Vertiefung auf die bereits angeführte Literatur verwiesen wird.

#### 1.3.4 Die Rolle von Sulfataerosolen in der Atmosphäre

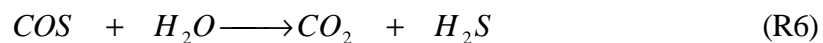
Sulfataerosole spielen eine bedeutende Rolle im Strahlungshaushalt unserer Erde. In der Troposphäre bilden Sulfataerosole die bereits mehrfach erwähnten Kondensationskerne für Wolken. Durch die Wolken verändert sich einerseits das Reflexionsvermögen der Atmosphäre für einfallendes Sonnenlicht, andererseits reflektieren Wolken die infrarote Wärmestrahlung der Erdoberfläche und wirken so dem verminderten Energieeinfall und der damit verbundenen Abkühlung entgegen. Außerdem können aus Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), und Dimethylsulfid (DMS) in der Troposphäre gebildete Sulfataerosole sauren Regen verursachen.

Sulfataerosole sind auch in der Stratosphäre klimarelevant. Die Sulfataerosole, die in der Stratosphäre aus COS gebildet werden können, erhöhen ebenfalls das Reflexionsvermögen der Atmosphäre (Albedo) für das von der Sonne einfallende kurzwellige Licht. Außerdem können sie Voraussetzung für verschiedene Reaktionen, die zur Ozonzerstörung führen, sein.

Diese Reaktionen finden auf Partikeloberflächen statt. Produkte dieser Reaktionen sind beispielsweise chlorhaltige, hochreaktive Gase, die das Ozon zersetzen können (Toon & Pollack, 1982; Lacis et al., 1992; Hartmann, 1994; Rodríguez et al., 1991; Grainier & Brasseur, 1992; Solomon et al., 1993; Graedel & Crutzen, 1994, 1996).

### 1.3.5 Bedeutung der Vegetation für die atmosphärische COS-Konzentration

Pflanzen assimilieren nicht nur CO<sub>2</sub> sondern auch COS. Seit 20 Jahren gibt es sehr deutliche Hinweise, dass die Vegetation eine wichtige Senke von COS ist (Taylor et al., 1983; Kluczewski et al., 1983, 1985;; Brown & Bell, 1986; Collins & Bell, 1986; Fall et al., 1988; Goldan et al., 1988; Hoffmann et al., 1992; Kesselmeier & Merk, 1993; Kesselmeier et al., 1993; Huber, 1994; Kuhn, 1997; Kuhn & Kesselmeier, 2000; Xu et al., 2002). Grundsätzlich kann COS in Wasser in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S gespalten werden:



Diese Reaktion verläuft allerdings im Vergleich mit anderen Prozessen in der Pflanze sehr langsam. Die Hydrolyskonstante  $h$  lässt sich nach Elliot et al., (1989) mit der folgenden zugeschnittenen Größengleichung berechnen:

$$h = e^{24,3 - \frac{10450}{T}} + e^{22,8 - \frac{6040}{T}} \cdot \frac{K_W}{a_H} \quad (\text{G1})$$

mit T...Wassertemperatur in [K]

K<sub>W</sub>...Ionenprodukt

a<sub>H</sub>...10<sup>-pH</sup> die Aktivität von H<sup>+</sup> im Wasser

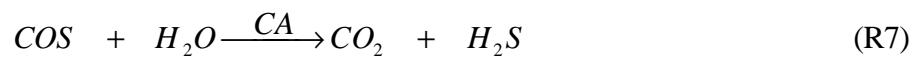
Protoschill-Krebs berichtet 1991 in ihren Untersuchungen am Enzym Carboanhydrase, welches aus Erbsen isoliert wurde, von einer massiven Beschleunigung der Hydrolyse von COS bei Anwesenheit dieses Enzyms. Sie erbrachte dadurch den Nachweis, dass Carboanhydrase die Hydrolyse von COS katalysiert.

Nach diesen Befunden wurden im Jahr 1991 Modelle für die Aufnahme von COS für die Metabolismen von C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Pflanzen publiziert (Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1992, Protoschill-Krebs et al 1996). Dabei wurde Carboanhydrase als

Schlüsselenzym des COS–Metabolismus bei höheren Pflanzen identifiziert. Das Enzym Rubisco scheidet als Katalysator für die COS-Aufnahme aufgrund der Tatsache aus, da Rubisco für CO<sub>2</sub> eine ca. 100-fach höhere Affinität als für COS besitzt. Deshalb ist es unwahrscheinlich, das Rubisco in vergleichbar relevanten Größenordnungen wie das Enzym Carboanhydrase an der COS-Aufnahme beteiligt ist, obwohl Rubisco grundsätzlich in der Lage ist, ebenfalls als Katalysator der Hydrolyse von COS zu H<sub>2</sub>S und CO<sub>2</sub> zu fungieren (Protoschill-Krebs et al., 1996). Bei C<sub>3</sub>-Pflanzen erreicht COS analog zu CO<sub>2</sub> das Chloroplastenstroma per Diffusion.

Nach Protoschill-Krebs, (1991) kann „...COS, dass bei Eintritt in die Chloroplasten nicht sofort durch die CA hydrolysiert wird,...in das Chloroplasteninnere...“ diffundieren „...und dort durch die mit der Rubisco assoziierte CA, deren Funktion in erster Linie die Dehydratation von HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ist, hydrolysiert werden. ...“

Dort wird COS durch Carboanhydrase nach der folgenden Reaktion hydrolysiert:

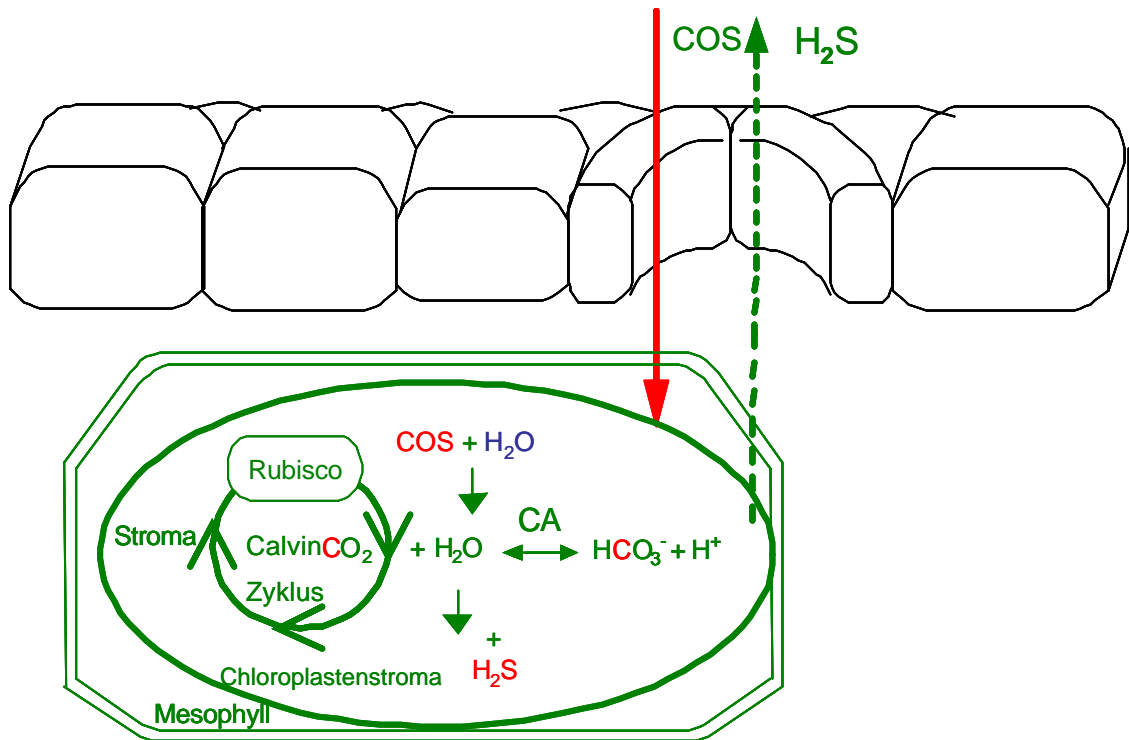


Der bei dieser Reaktion entstehende Schwefelwasserstoff wird entweder von der Pflanze emittiert oder verbleibt bei Bedarf im sog. Schwefel-Pool der Pflanze (Protoschill-Krebs, 1991; Hoffmann, 1993) Das resultierende CO<sub>2</sub> wird anschließend entweder direkt in den Calvin-Zyklus geleitet oder ebenfalls von der Carboanhydrase hydrolysiert.



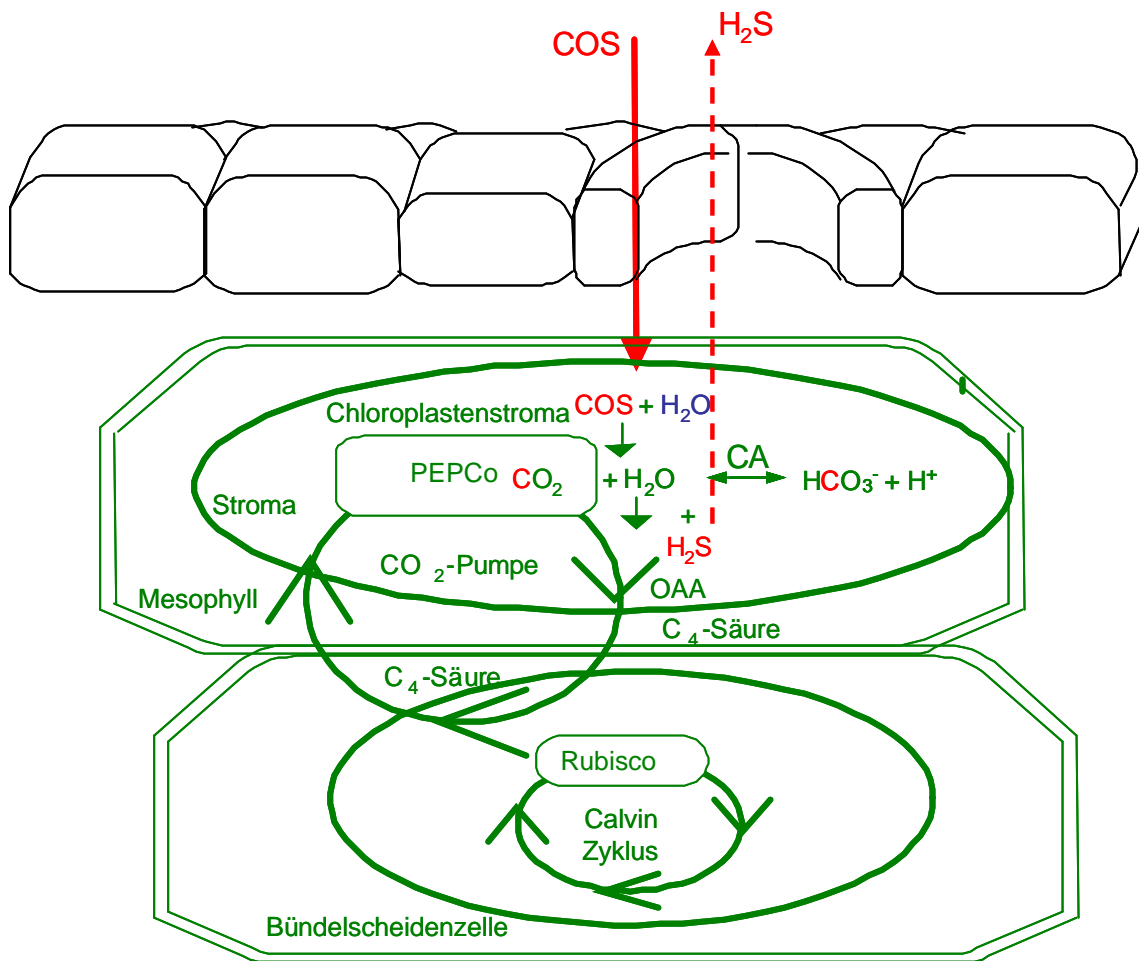
Bisherige Untersuchungen zum COS Austausch von Pflanzen zeigten, dass der COS Austausch mit dem CO<sub>2</sub> Austausch, sowie der photosynthetisch aktiven Strahlung und der Transpiration korreliert. Ausgehend von diesen Befunden haben Autoren wie Bartell et al., 1993; Kesselmeier & Merk, 1993; Kesselmeier et al., 1993; Hoffmann et al., 1993; Huber, 1994; Kuhn, 1997; Kuhn & Kesselmeier, 2000; Xu et al., 2002 die Hypothese aufgestellt, dass COS direkt durch die Stomata aufgenommen wird. Die Abbildungen 11 und 12 stellt

nach den Befunden von Protoschill-Krebs, (1991); Protoschill-Krebs & Kesselmeier, (1992) vereinfacht den Mechanismus der COS-Aufnahme von höheren Pflanzen dar.



**Abbildung 11: Schematische Darstellung der COS-Aufnahme durch  $C_3$ -Pflanzen nach Protoschill-Krebs, (1991)**

Bei  $C_4$ -Pflanzen verläuft die Hydrolyse von COS ähnlich wie bei  $C_3$ -Pflanzen, wobei hier die Lokalisierung von Carboanhydrase etwas komplizierter und auch noch umstritten ist. Das in das Zytosol diffundierte COS wird in den Mesophyllzellen von Carboanhydrase hydrolysiert. Die Abbildung unten stellt den Mechanismus der COS-Aufnahme durch  $C_4$ -Pflanzen schematisch dar.



**Abbildung 12: Vereinfachte schematische Darstellung der COS Aufnahme durch C<sub>4</sub>-  
 Pflanzen nach Protoschill-Krebs, (1991)**

Nach Protoschill-Krebs, (1991) erfolgt die COS-Fixierung in CAM-Pflanzen, nachts bei geöffneten Stomata. Dabei wird COS je nach der Lokalisation der CA bzw. dem Carboxylierungsmodus im C<sub>3</sub>- oder C<sub>4</sub>-Modus fixiert.

Zentral für die Analyse der COS-Austausch-Prozesse unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen ist die Tatsache, dass die Affinität der CA für COS etwa 1000-fach größer ist als für CO<sub>2</sub> (Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs et al., 1995). Die Untersuchungen an *Chlamydomonas reinhardtii* zeigten, dass die Aktivität der Carboanhydrase unter der Anzucht bei 0,03 % CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ca. viermal höher ist als bei der Anzucht unter 3 % CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Das Enzym Carboanhydrase arbeitet also unter niedriger CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration effizienter, um den Calvin-Zyklus mit ausreichend CO<sub>2</sub> zu versorgen. Bei höherer CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration bestünde demnach kein so starker Bedarf, nach "zusätzlicher" Versorgung der photosynthetischen Prozesse mit CO<sub>2</sub> durch das Enzym Carboanhydrase.

### 1.3.6 Globale Quellen und Senken für Carbonylsulfid in der Atmosphäre

Nach den Befunden, dass COS bis in die Stratosphäre transportiert werden kann und damit eine wichtige Quelle von Sulfataerosolen ist, wurden von verschiedenen Wissenschaftlern zuweilen stark voneinander abweichenden Quellen/Senken-Budgets für COS vorgeschlagen.

Als Hauptquellen von Carbonylsulfid wurden dabei folgende identifiziert:

- Ozeane
- Vulkane
- Böden
- Biomassenverbrennung
- Chemische Prozesse bei CS<sub>2</sub>-Konversion, DMS-Konversion sowie Niederschlägen
- Anthropogene Quellen wie Kohleverbrennung, Straßenverkehr, Reifenherstellung.

Die Tabelle 5 enthält die Abschätzungen der Hauptquellen von atmosphärischen COS unterschiedlicher Autoren:

Quelle	[Tg(COS)/a]	Autor
Ozeane	0,6 ± 0,2 0,87 0,60 (0,3-0,9) 0,64 0,25 (0,30-0,60) 0,77 0,32 (0,16-0,64) 0,25 0,15 0,15 0,30 ± 0,18 0,10 0,056 0,206-0,356	Rasmussen et al. ,(1982 c) Fereck & Andreae ,(1984) Khalil & Rasmussen, (1984) Andreae, (1986) Mihalopoulos et al., (1992) Andreae & Ferek (1992) Chin & Davis, (1993) Erickson & Eaton, (1993) Andreae & Crutzen, (1997) Ulshöfer & Andreae, (1998) Watts, (2000) Xu, (2001) von Hobe, (2001) Kettle et al., (2002)
Böden und Marsche	0,40 (0,2-0,6) 0,27 (0,14-0,52) 0,02 ± 0,01	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin & Davis, (1993) Watts, (2000)
Vulkane	0,01 - 0,05 0,02 (0,01-0,05) 0,006-0,09	Khalil & Rasmussen, (1982 b) Belviso et al., (1986) Chin & Davis, (1993)
Anthropogen COS anth. Aluminiumproduktion Straßenverkehr Schwefelrückgewinnung Kohleverbrennung Reifenproduktion	0,05 - 0,45 0,08 ± 0,02 0,009 (0,005...0,016) 0,002 (0,001...0,004) 0,0036 (0,025...0,047) 0,08 ± 0,01 0,06-0,18	Khalil & Rasmussen, (1984) Pos & Berresheim, (1993) Chin & Davis, (1993) Chin & Davis, (1993) Chin & Davis, (1993) Harnish et al., (1995 a) Watts, (2000)
Chemische Prozesse	0,06 (0,2)	Khalil & Rasmussen, (1984)
CS <sub>2</sub> -Konversion	0 - 2,0 0,34 (0,17-0,61) 0,026 0,398	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin & Davis, (1993) Watts, (2000) Kettle et al., 2002
DMS-Konversion	0,10-0,28 0,345	Barnes et al. (1994) Kettle et al., (2002)
Niederschlägen	0,13 ± 0,06	Watts (2000)
Biomassenverbrennung	0,10 - 0,50 0,14 (0,04-0,26) 0,021-0,12	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin, Davis, (1993) Watts, (2000)
Andere (nicht näher spezifiziert)	1,10 - 3,30 0,042 (0,027-0,059) 0,13 (0,06-0,21)	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin & Davis, (1993) Nuygen et al., (1995)

**Tabelle 5: Abschätzung der Quellen des atmosphärischen COS verschiedener Autoren**

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass in jüngster Zeit immer kleinere Absolutmengen des von den Quellen freigesetzten COS abgeschätzt werden. Watts (2000) präzisiert, dass der Boden unter anaeroben Bedingungen eine Quelle von COS ist. Der Autor betont in dieser jüngsten Publikation, unter welchen Bedingungen der Boden als Quelle oder Senke fungiert. Watts identifizierte ebenfalls chemische Prozesse bei marinen Niederschlägen als wichtige Quelle von atmosphärischem COS.

Die Tabelle 6 listet die Abschätzungen globaler Senkenstärken von COS verschiedener Wissenschaftler auf.

Senke	[Tg (COS)/a]	Autor
Vegetation	2-5 0,2-0,6 0,86-1,0 0,43 (0,16-0,91) 1-3,4 0,56 ± 0,10 2,3 ± 0,5 0,394-0,506	Brown & Bell , (1986) Goldan et al., (1988) Kesselmeier & Merk, (1993) Chin and Davis , (1993) Hoffmann, (1993) Watts, (2000) Xu, (2001) Kettle et al., (2002)
Boden	0,20 - 0,60 0,3 0,04 0,92 ± 0,78 0,139-0,338	Khalil & Rasmussen, (1984) Andreae & Crutzen, (1997) Brown & Bell, (1986) Watts, (2000) Kettle et al., (2002)
Reaktion mit OH	0,8 (0,1-1,15) 0,13 (0,02-0,80) 0,154-0,206	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin & Davis , (1993) Kettle et al., (2002)
Reaktion mit O	0,03 0,015 (0,009-0,026) 0,03 0,009 - 0,03	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin & Davis , (1993) Watts, 2000 Kettle et al., (2002)
Photolyse	0,10 - 0,20 0,029 (0,020-0,040) 0,021-0,039 0,020 - 0,039	Khalil & Rasmussen, (1984) Chin & Davis , (1993) Watts, 2000 Kettle et al., (2002)
Andere (unbekannt)	1,10 - 3,30	Khalil & Rasmussen (1984)

**Tabelle 6: Abschätzung der Senken des atmosphärischen COS**

Wie auch bei den Abschätzungen der Quellen von COS differieren die Angaben zu den einzelnen Senken sehr stark.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Methoden zur Abschätzung der COS-Senkenstärke der Vegetation ebenfalls stark unterscheiden, was später noch Gegenstand detaillierterer Analysen sein wird. Die offen gelegten Methoden basieren auf:

- der Verwendung der COS-Depositionsgeschwindigkeit (Brown & Bell, 1986)
- der Korrelation zwischen COS und CO<sub>2</sub>-Aufnahme (Chin & Davis, 1993, Hoffmann, 1993; Kesselmeier & Merk, 1993; Andreae & Crutzen 1995, 1997; Watts, 2000; Kettle et al., 2002)
- Zeitreihen der atmosphärischen COS-Konzentration aufgenommen mit REA-Messungen (Xu, 2001).

Kuhn, (1997); Teusch, (1998); Kuhn et al., (1999) und Kesselmeier et al., (1999) fanden bei ihren Bodenuntersuchungen unter aerobischen Bedingungen eine COS Aufnahme. Bemerkenswert an diesen Untersuchungen ist, dass die COS-Aufnahme keine Lichtabhängigkeit zeigte. Nach diesen Befunden schlagen die Autoren den Boden als eine wichtige globale Senke von atmosphärischen COS vor. Andreae und Crutzen (1997) estimieren die Senkenstärke des Bodens mit ca. 0,3 Tg (COS)/a und Watts, 2000 schätzt die COS-Senkenstärke des Bodens unter aerobischen Bedingungen mit 0,92 Tg(COS)/a ab.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass die Abschätzungen der Senkenstärke von COS immer noch unsicher sind. Detailliertere Arbeiten zu Trends, wie sich insbesondere die COS-Senkenstärken der Vegetation unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration entwickeln werden, gibt es nicht.

### **1.3.7 Mögliche Auswirkungen einer erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die COS-Senkenstärke der Vegetation**

Auf Basis der Analyse der photosynthetischen Prozesse lässt sich hypothetisch qualitativ abschätzen, dass insbesondere beim C<sub>3</sub>-Metabolismus unter zukünftig verbessertem CO<sub>2</sub>-Angebot weniger COS von den Pflanzen aufgenommen wird, als bei der heutigen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Chin und Davis (1993) schlagen für die Abschätzung der globalen COS-Aufnahme der gesamten Vegetation folgende Gleichung vor:

$$\Delta COS = \Delta CO_2 \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad (G2)$$

Hiernach wird die COS-Aufnahmerate ( $\Delta COS$ ) in Tg/a, in Abhängigkeit von:

- $\Delta CO_2$ ...globale  $CO_2$ -Aufnahmerate der gesamten Vegetation in Tg/a
- $[CO_2]$ ...atmosphärische  $CO_2$ -Umgebungskonzentration in ppm
- $[COS]$ ...atmosphärische COS-Umgebungskonzentration in ppt

ermittelt. Die Methode beruht auf der auf Beobachtungen basierenden Annahme, dass ein deterministischer Zusammenhang zwischen der  $CO_2$ - und der COS-Austauschrate von Pflanzen besteht. Die in der letzte Dekade publizierten Abschätzungen der globalen COS-Senkestärke der Vegetation (Chin & Davis, 1993, Hoffmann, 1993; Kesselmeier & Merk, 1993; Andreae & Crutzen, 1997; Watts, 2000; Kettle et al., 2002) basieren auf diesem theoretischen Modell. Das Modell von Chin und Davis, welches eine lineare Korrelation zwischen dem COS-Austausch und der  $CO_2$ -Assimilation annimmt, suggeriert, dass sich bei einer Erhöhung der  $CO_2$ -Umgebungskonzentration bei gleich bleibender  $CO_2$ -Assimilation und COS-Umgebungskonzentration, die COS Austauschrate verringern sollte. Die Verringerung der COS-Aufnahme lässt sich unter diesen Prämissen leicht nach Gleichung 3 abschätzen.

$$\frac{\Delta COS_{800}}{\Delta COS_{350}} = \frac{350 \text{ pptv}}{800 \text{ pptv}} = 0,4375 \quad (G3)$$

Die globale COS-Aufnahme der Vegetation könnte sich also nach dieser theoretischen Modellvorstellung unter einer erhöhten  $CO_2$ -Umgebungskonzentration von 800ppt auf ca. 44% reduzieren. Stützend für diese Hypothese ist die Tatsache, dass Chang, (1975), Porter und Grodzinski, (1984) sowie Arakelyan et al., (1993) unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration eine Reduktion der Aktivität der Carboanhydrase bei Baumwolle, Bohnen, Hirse sowie Algen fanden. Extrapoliert man dieses Resultat auf die Mehrheit der höheren Pflanzen, wäre unter erhöhter  $CO_2$ -Umgebungskonzentration ein Rückgang der Aktivität des Enzyms Carboanhydrase zu erwarten. Was wie in Kapitel 1.3.5 erwähnt nach Protoschill-Krebs et al., (1995) zu einer Reduktion der COS-Aufnahme führen könnte. Eine Abnahme der COS-Aufnahme wäre demnach dann auch mit einem Rückgang der Aktivität des Enzyms Carboanhydrase verbunden.

## 1.4 Zielstellung

Vor dem Hintergrund der prognostizierten Erhöhung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration soll das Verhalten der Vegetation, insbesondere der höheren Pflanzen, bezüglich des Austausches von COS präziser charakterisiert werden.

Da C<sub>3</sub>-Pflanzen wahrscheinlich am meisten von einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration profitieren und diese ca. 95 % aller heutigen Pflanzen repräsentieren, werden für die Untersuchungen zwei verschiedene Arten von C<sub>3</sub>-Pflanzen ausgewählt. Die Pflanzen werden unter kontrollierten Laborbedingungen bei zwei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen, ca. 350 ± 10 ppm (natürlich) und 800 ± 10 ppm (erhöht), aufgezogen und untersucht. Im Sinne einer aus den bereits analysierten Zusammenhängen abgeleiteten Arbeitshypothese wird erwartet, dass sich unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration die COS-Aufnahme verringern kann.

Hierfür ist es notwendig, ein bereits vorhandenes Gaswechselsystem entsprechend zu modifizieren, um eine genügend große statistische Grundgesamtheit an repräsentativen und reproduzierbaren Messergebnissen zu erhalten.

Da das Enzym Carboanhydrase bei den relevanten Prozessen eine exponierte Rolle spielt, soll ebenfalls dessen Aktivität unter den zwei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen analysiert werden. Für diese Analysen wird ebenfalls eine Arbeitshypothese aufgestellt: Extrapoliert man die an *Chamydomonas reinhardtii* gewonnenen Ergebnisse auf höhere Pflanzen, wird erwartet, dass sich unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration die Aktivität des Enzymes Carboanhydrase verringern kann.

Bis heute gibt es immer noch recht spärlich Informationen zum COS-Austausch von Pflanzen, um präzise Abschätzungen der globalen Senkenstärken von COS zu machen. Die Angaben sind immer noch relativ grob und differieren relativ stark von Autor zu Autor. Deshalb werden im Sinne einer Präzisierung der COS-Senkenstärken die Messergebnisse an bereits publizierten Daten gespiegelt und systematisch weiterverarbeitet, um globale Trends zur Entwicklung des COS-Haushaltes der Erde besser eruieren zu können.

## 2 MATERIAL UND METHODEN

Dieses Kapitel beschreibt die für die Untersuchungen verwendeten Materialien und die Methoden.

### 2.1 Botanisches Material

Die Laboruntersuchungen zur Analyse des COS-Austausches der Vegetation unter zwei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Regimen wurden hauptsächlich an zwei Baumspezies der C<sub>3</sub>-Pflanzen in den Jahren 1998, 1999 und 2000 durchgeführt. Die Versuchspflanzen wurden im März 1998 in die Anzucht-kammern gebracht. Verwendet wurden die Steineiche, *Quercus ilex* L. und die Rotbuche, *Fagus sylvatica* L.. Sowohl *Fagus sylvatica* L. als auch *Quercus ilex* L. gehören der Ordnung der Fagales an (Engler, 1964; Fitschen, 1987; Strasburger, 1998; Schönfelder & Schönfelder, 1990).

#### 2.1.1 Die Steineiche - *Quercus ilex* L.

Die Steineiche, *Quercus ilex* L., aus der Familie der Fagaceae, ist ein waldbildender, immergrüner Baum, der eine Höhe von 25 Metern erreichen kann. Typische Merkmale sind die braungraue Rinde und die Behaarung der jungen Sprosse. Die Form der gestielten Blätter kann von länglich-eiförmig bis lanzettlich stark variieren. Es handelt sich um eine im Mittelmeerraum weit verbreitete, im Osten seltenere Art, die an die mediterranen klimatischen Verhältnisse mit den sommerlichen Dürreperioden und feuchtemäßigten Wintern angepasst ist (Schönfelder & Schönfelder, 1990).

#### 2.1.2 Die Rotbuche - *Fagus sylvatica* L.

Die Rotbuche, *Fagus sylvatica* L., gehört ebenso zu der Familie der Fagaceae und ist über die ganze Nordhemisphäre verbreitet. Der waldbildende, sommergrüne Baum kann eine Höhe von 40 Metern erreichen. Typische Merkmale sind die glattgraue Rinde und die lang

gezogenen Knospen (spindelförmig bis stechend) mit 10 oder mehr spiralförmig angeordneten Knospenschuppen. Die Form der gestielten Blätter variiert von breit lanzettlich bis elliptisch oder auch lineal. Sie werden bis mindestens 6 mm breit. Die sommergrüne, dünnblättrige Gattung *Fagus* hat drei Verbreitungsgebiete: Ostasien, Nordamerika und den europäisch-südwestasiatischen Raum. *Fagus sylvatica* L. kommt besonders im kontinentalen Osten und in Trockenräumen (z.B. in der ungarischen Tiefebene) vor. "...Den Namen Rotbuche erhielt die Spezies *Fagus sylvatica* L. durch die rötliche Farbe ihres Holzes" (Strasburger, 1998; Engler, 1964).

## 2.2 Herkunft, Alter und Aufzuchtbedingungen

Die verwendeten Pflanzen (*Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L.) stammen aus Cornwall, England (Burncoose Nurseries, Gwennap, Redruth, Cornwall TR 16 6BJ). Das Alter der Bäume betrug zu Beginn der Versuche im Oktober 1997 ca. 3 bis 3,5 Jahre. Sie waren ca. 100-120 cm hoch. Zur Aufzucht wurden die Pflanzen in 20-l-Töpfen in Pflanzenerde (Kompost des Botanischen Gartens) gehalten. Für die Steineiche wurde um den Wasserabfluss zu verbessern eine Mischung aus Sand und Pflanzenerde (1:2) , verwendet.

Um Vergleiche zwischen den Baumarten unter ca. 350 und 800 ppm atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration ziehen zu können, war es notwendig die Versuchspflanzen unter folgenden Bedingungen aufzuziehen:

- Temperatur: 25°C,
- relative Feuchte: 70 %,
- Lichtintensität: 600 μE/(m<sup>2</sup> s)

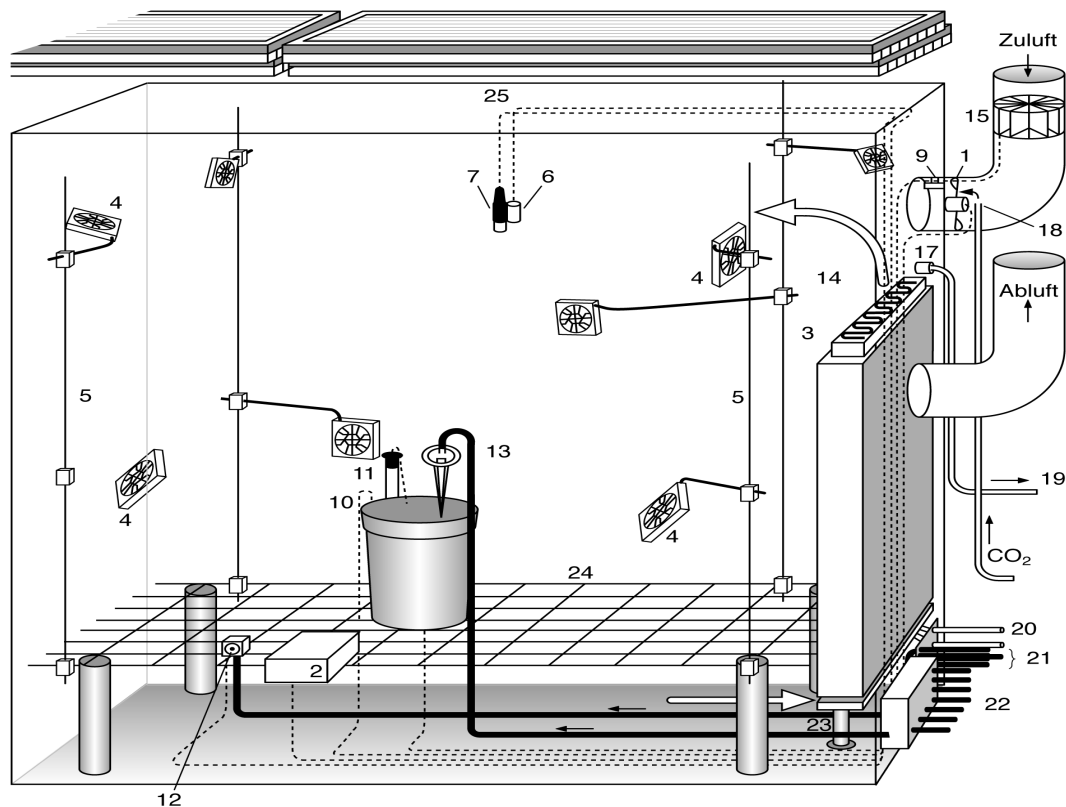
Die Aufzucht erfolgte im Gaswechselsystem des Gewächshauses des Instituts für Allgemeine Botanik der Johannes Gutenberg Universität Mainz.

Die Bäume wurden mit kommerziellem Dünger der Marke Baumfit (Fa. Spiess-Urania, BRD) gedüngt.

## 2.3 System zur Aufzucht von Pflanzen unter kontrollierten Umweltbedingungen

### 2.3.1 Die Klimakammern

Die ausgewählten Spezies wurden in zwei Anzucht Klimakammern des Botanischen Instituts (Universität Mainz) aufgezogen, in denen die einzelnen Umweltparameter computergesteuert reguliert und konstant gehalten werden können. Die Messwerte wurden über ein Datennetz an einen zweiten Computer zur Auswertung übertragen. Die Abbildung 13 stellt eine Kammer schematisch dar.



1	Lüfter für Zuluft	14	Umluftheizung
2	Lüfter für Umluft	15	Zuluftheizung
3	Querstromlüfter für Wärmetauscher	16	Umluft-Wärmetauscher
4	Lüfter für Umluft	17	Gasentnahmesonde
5	variable Stative	18	Begasungsdüse für CO <sub>2</sub>
6	Kammer-Temperatursensor	19	Zuleitung zum CO <sub>2</sub> -Sensor
7	Luftfeuchtesensor	20	Vor- und Rücklauf des Kaltwasserkreislaufs (Kühlsystem)
8	Zuluft-Temperatursensor	21	Zuleitungen für Ultraschall-Flüssigkeitszerstäuber und Bewässerungsstränge
9	Luftstromsensor	22	Elektrische Verbindungen
10	Wurzelraum-Temperatursensor	23	Ablaufsiphon, gasdicht
11	Tensiometer	24	Gitterrost, höhenverstellbar
12	Ultraschall-Flüssigkeitszerstäuber	25	Beleuchtungseinrichtung
13	Sprühstift für Bewässerung		

Abbildung 13: Übersichtsschema der Klimakammer (des Botanischen Instituts der Universität Mainz) nach Peuser ,1995.

Die Versuchskammern aus UV-durchlässigem Plexiglas haben eine Länge von 1,5 m, eine Höhe von 1,5 m und eine Tiefe von 0,8 m.

„...Die Versuchsanlage besitzt ein offenes Belüftungssystem, das über Ventilatoren und Lüftungsrohre direkt mit der Außenluft verbunden ist. Die einströmende Luft kann vortemperiert werden und erreicht natürliche mittlere Windgeschwindigkeiten von ca. 1 m/s. Zahlreiche Lüfter im Inneren der Kammern sorgen für Verwirbelungen, um den Grenzschichtwiderstand an den Blattoberflächen herabzusetzen“...(Peuser, 1995) Die Abbildung 14 zeigt eine Photographie der verwendeten Klimakammern.

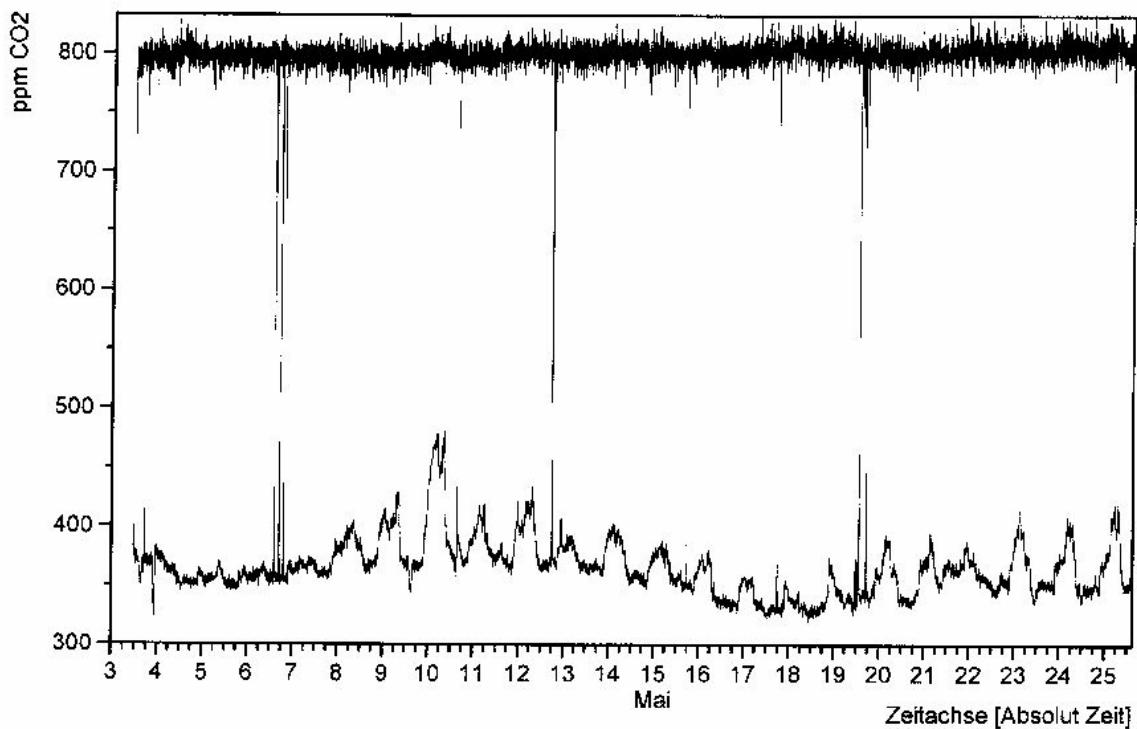


Abbildung 14 : Anzucht-Klimakammern mit *Quercus ilex* L. und *Fagus sylvatica* L.

In der vorderen der beiden Klimakammern waren die Versuchspflanzen erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, in der hinteren Kammer normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration kontrolliert ausgesetzt.

### 2.3.2 Die Regulation der Kohlendioxidkonzentration

Die Kohlendioxidkonzentration wird in beiden Kammern jeweils über einen Sensor erfaßt und an einen Computer weitergeleitet. Dieser steuert dann mit dem Softwaremodul DAGO ein Ventil, welches die Zugabe von reinem Kohlendioxid in die Zuluftrohre zu den Versuchskammern reguliert (Peuser, 1995). Die Abbildung 15 zeigt den zeitlichen Verlauf der geregelten Kohlendioxidkonzentration in den beiden Kammern im Mai 1998.



**Abbildung 15: Kohlendioxidkonzentration in den beiden Klimakammern im Mai 1998**

Wie oben zu sehen wurde die Kohlendioxidkonzentration auf 800 ppm bzw. ca. 350 ppm ausgeregelt. In der Abbildung gibt es synchron in beiden Verläufen der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen Ausreißer, die ihre Ursache im Öffnen der Klimakammer haben. Die größeren Schwankungen in der CO<sub>2</sub>-Kurve für die natürliche CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration haben ihre Ursache in technischen Begrenzungen des "CO<sub>2</sub>-Regelkreises" der Klimakammer (Peuser, 1995).

## 2.4 Technische Systeme zur Analyse des Gasaustausches von höheren Pflanzen

Dieser Abschnitt stellt die verwendeten technischen Systeme zur Analyse des  $\text{CO}_2$ -Austausches von höheren Pflanzen detailliert vor. Es werden die notwendigen Anpassungen der beiden bereits vorhandenen Systeme (Hofmann et al., 1992; Kuhn, 1997; von Hobe, 2000; von Hobe et al., 2000) für die Experimente beschrieben.

### 2.4.1 Funktionsprinzip der Gaswechselanlage

Um den  $\text{CO}_2$ -Austausch der ausgewählten Spezies zu analysieren, bietet sich ein offenes Gaswechselsystem, das von einem kontinuierlichen Luftstrom mit definierter Flussrate durchflossen wird, an. Als Trägerluft dient konditionierte bzw. aufbereitete Pressluft. Die Austauschprozesse, Abgabe oder Aufnahme von Gasen, lassen sich über Differenzbildung der Konzentration von ( $\text{CO}_2$ -,  $\text{H}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen) zwischen einer leeren Referenzküvette und einer Messküvette, in der sich die zu analysierenden Versuchsobjekte befinden, erfassen. Die Abbildung 16 stellt die Komponenten des Systems sowie den prinzipiellen Aufbau schematisch dar. Die Pfeile geben die Gasflussrichtung an.

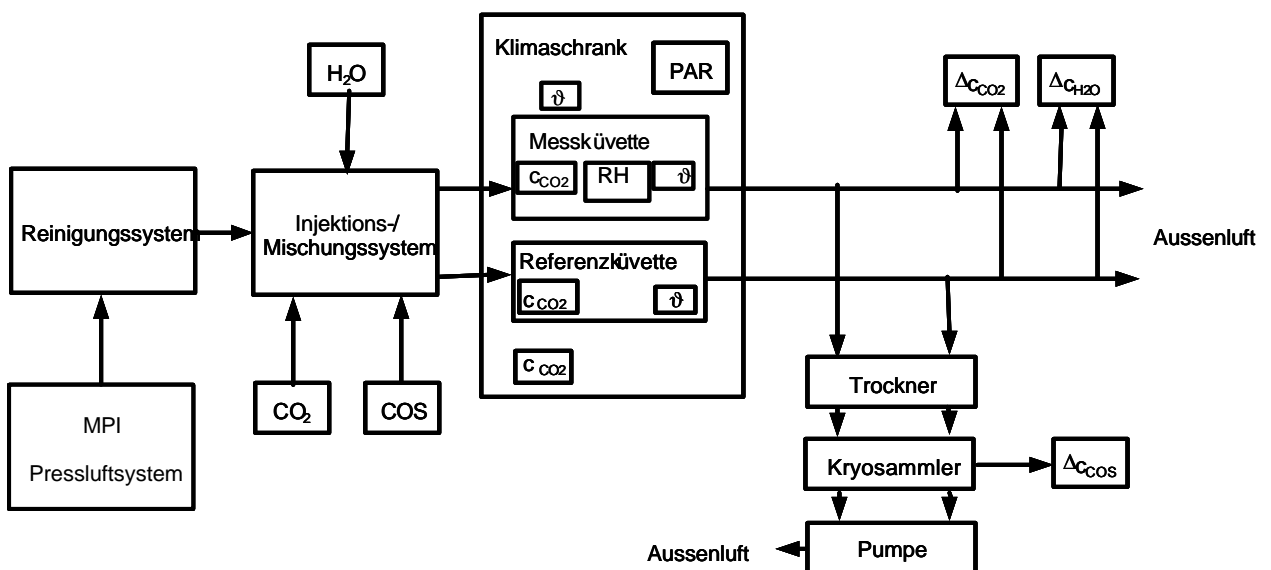


Abbildung 16: Übersichtsschema des Analyse-Systems zum Gasaustausch von Pflanzen

Die Methode des „offenen Systemes“ erfordert, dass die Umweltbedingungen konstant gehalten werden, um das System im stationären Zustand, englisch (steady state), zu betreiben. Die dazu notwendige definierte Umgebungsluft wird wie folgt erzeugt: Zunächst durchstößt die Pressluft, wie in der Abbildung 16 zu sehen, die Reinigungsanlage, wo sie von CO<sub>2</sub>, COS und anderen Spurengasen befreit wird und gelangt dann in das Mischungssystem. Dort wird sie definiert befeuchtet, indem sie durch ein Gefäß mit Wasser geleitet wird. Später werden die Spurengase CO<sub>2</sub> und COS wieder in definierten Raten beigemischt. Diese Reihenfolge verhindert Schwankungen der COS-Konzentration in der Umgebungsluft, da COS und CO<sub>2</sub> in Wasser dissoziieren können. Die so erhaltene Umgebungsluft ist somit konstant konditioniert und kann für stationäre Zustandsuntersuchungen verwendet werden.

Mit dem System und der nachgeordneten Verarbeitung können grundsätzlich folgende Basis-Messgrößen zur Charakterisierung der Austauschprozesse bestimmt werden:

$\vartheta$ ...Temperatur

PAR...photosynthetisch aktive Strahlung

RH...Feuchte, relative Feuchte

$c_{\text{CO}_2}$  ...CO<sub>2</sub>-Konzentration

$c_{\text{H}_2\text{O}}$ ...H<sub>2</sub>O-Konzentration

$c_{\text{COS}}$ ...COS-Konzentration

Q ...Durchflussrate

V ...Sammelvolumen.

Die Messgrößen werden in einen Datenlogger (Modell 21 X, Fa. Campbell Scientific Inc., Großbritannien) aufgenommen, digitalisiert und in einem zentralen Computer gespeichert. Hilfsparameter wie Temperatur, Luftfeuchte, Lichtintensität und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen werden mit konventionellen Geräten, die im Folgenden näher bezeichnet sind, erfasst.

Die Tabelle 7 präzisiert die Angaben der angeführten Parameter, deren Messgeräte und Messorte.

Vor der kryogenen Fixierung von COS muss die feuchte Luft getrocknet werden (Hoffman, 1993), um einerseits das Einfrieren der Kryofalle und andererseits die Absorption von schwefelhaltigen Gasen an feuchten Oberflächen zu verhindern.

Parameter	Sollwert	Gerät	Messorte
COS in pptv	500-600	GC (HP5890 II ) Detektor FPD DELSI	$\Delta$ Mess- & Referenzküvette
$\Delta\text{CO}_2$ in mmol	-----	LICOR LI-6262, CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O-Analyzer	$\Delta$ Mess- & Referenzküvette
$\Delta\text{H}_2\text{O}$ in $\mu\text{mol}$	-----	LICOR LI-6262, CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O-Analyzer	$\Delta$ Mess- & Referenzküvette
$\vartheta$ in °C	-----	Thermoelemente (Typ Chrom-Konstantan)	Blatt (oben, unten), Küvetten
CO <sub>2</sub> in ppm	350 und 800	ADC 2250 LICOR CO <sub>2</sub> Analyzer	Umgebung
$\vartheta_{\text{in}}$ °C	25	Konv. Thermometer VAISALA (133Y)	Umgebung, Luftstrom im Gasschlauch
RH in %	70	VAISALA (133Y)	Luftstrom im Gasschlauch
Q <sub>Luft</sub> in l/min	5	MKS -Flowcontroller	1 x Küvetteninput
Q <sub>luft</sub> in l/min	100	MKS -Flowcontroller	2 x Küvettenoutput
V <sub>luft</sub> in l/min	100	MKS Massenflussmeter	2 x Küvettenoutput
Strahlung in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{sec}$	600	LICOR: Li 190 sz Quantumsensor	Außerhalb der Küvette

**Tabelle 7: Hilfsparameter, Messgeräte und Messorte**

Die Bestimmung der COS-Konzentration erfolgte mit Proben, die mit Kryotechnologie gesammelt wurden. Das heißt, der Luftstrom wird in eine Kryofalle geleitet, deren Temperatur so tief ist, dass COS dort ausfriert. Anschliessend wird die Probe verdampft und mit dem Spülgas Helium in die Säule des Gaschromatographen geleitet, wo die Bestandteile der Probe getrennt und mit Hilfe eines Flammen-Photometrischen-Detektors (FPD) quantitativ bestimmt werden.

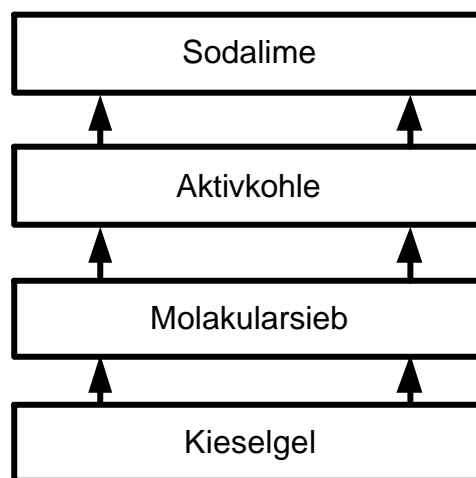
Bei dieser Anordnung herrscht in den Küvetten ein leichter Überdruck, um ein Eindringen von Außenluft zu verhindern. Ventilatoren, die Luftverwirbelungen in Klimakammer und Küvetten erzeugen, setzen den Blattgrenzschichtwiderstand stark herab. Die

Membranvakuumpumpe ist hinter dem Kryosammler angeordnet, um Verschmutzungen der Probe durch den Pumpvorgang zu vermeiden. Alle Elemente vor dem Probensammler, die nicht aus Teflon bestehen, insbesondere die Glaskryofallen, wurden durch Silanisierung mit 5%-igem Dimethyldichlorsilan chemisch inaktiviert d.h. Reaktionen mit COS, die in die so genannten aktiven Oberfläche des Glases stattfinden können, werden dadurch verhindert. (Grob and Grob, 1979; Jennings, 1987; Hoffman, 1993)

#### 2.4.2 Reinigungssystem

Zur Gewährleistung, dass das offene System im stationären Zustand betrieben wird, wurden die Schwankungen der COS- und CO<sub>2</sub>-Konzentration des MPI-Pressluftsystems ausgeglichen. Dazu war es zunächst notwendig (Kesselmeier et al., 1999) die Pressluft zu reinigen. Im Anschluss daran wurden die herausgefilterten Gase definiert wieder beigemischt.

Das Reinigungssystem war dabei wie in Abbildung 17 dargestellt aufgebaut.



**Abbildung 17: Übersichtsschema des Reinigungssystems**

Wie dargestellt bestand das Reinigungssystem aus vier hintereinander geschalteten Reinigungssäulen (Eigenbau MPCH). Die Säulen enthielten folgende Filtermaterialien, die von der Pressluft in der unten angeführten Reihenfolge durchflossen wurden.

3L-Plexiglaszylinder mit Kieselgel mit Feuchtigkeitsindikator (Fa. Merck, Darmstadt, K26642725)

3L-Plexiglas-Kolonnen mit Molekularsieb (0,5 nm, Fa. Merck, Darmstadt, K21042503826)

3L Glaskolonnen mit grob gekörnter Aktivkohle (Fa. Merck, Darmstadt,)

3L Glaskolonnen mit Natronkalk-Plättchen mit Indikator (Fa. Merck, Darmstadt, K270484439).

Die Hauspressluft durchströmte kontinuierlich das Reinigungssystem mit einem Fluss von 6 l/min mit einem Druck von ca. 1,5 bar. Aus Sicherheitsgründen waren die Säulen in einem separaten Schrank außerhalb des Gaswechselsystems installiert.

Kieselgel diente als Trocknungsmittel. Das Molekularsieb diente als Trocknungsmittel und filtert winzige Partikel, einige Gase und bestimmte Radikale wie Ozon heraus. Aktivkohle filtert COS heraus. Sodalime säubert die Pressluft von CO<sub>2</sub>.

In regelmäßigen Abständen wurde das Kieselgel zur Regeneration auf 100 °C aufgeheizt, das Molekularsieb auf 300 °C und die Aktivkohle auf 100 °C. Die Aktivkohle wurde zusätzlich während des Aufheizens mit einem Luftstrom von Stickstoff 5,0 (ca. 100 ml/min) gespült.

### 2.4.3 COS- und CO<sub>2</sub>-Begasung

COS- und CO<sub>2</sub> wurde mit Hilfe einer Permeationsanlage (COS) und einer Druckflasche (CO<sub>2</sub>) zugeführt. Sowohl die Umgebungsluft des Versuchsaufbaus als auch die Luft der Versuchskammer, in der die Pflanze inkubiert war, wurde unter 350 oder 800 ppm CO<sub>2</sub> Konzentration gehalten.

Bei CO<sub>2</sub> reichte es aus, die Dosierung mit einem konventionellem Massendurchflussregler der Fa. MKS zu regeln. Damit war es möglich, die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf konstante Werte von 350 ppm bzw. 800 ppm einzustellen.

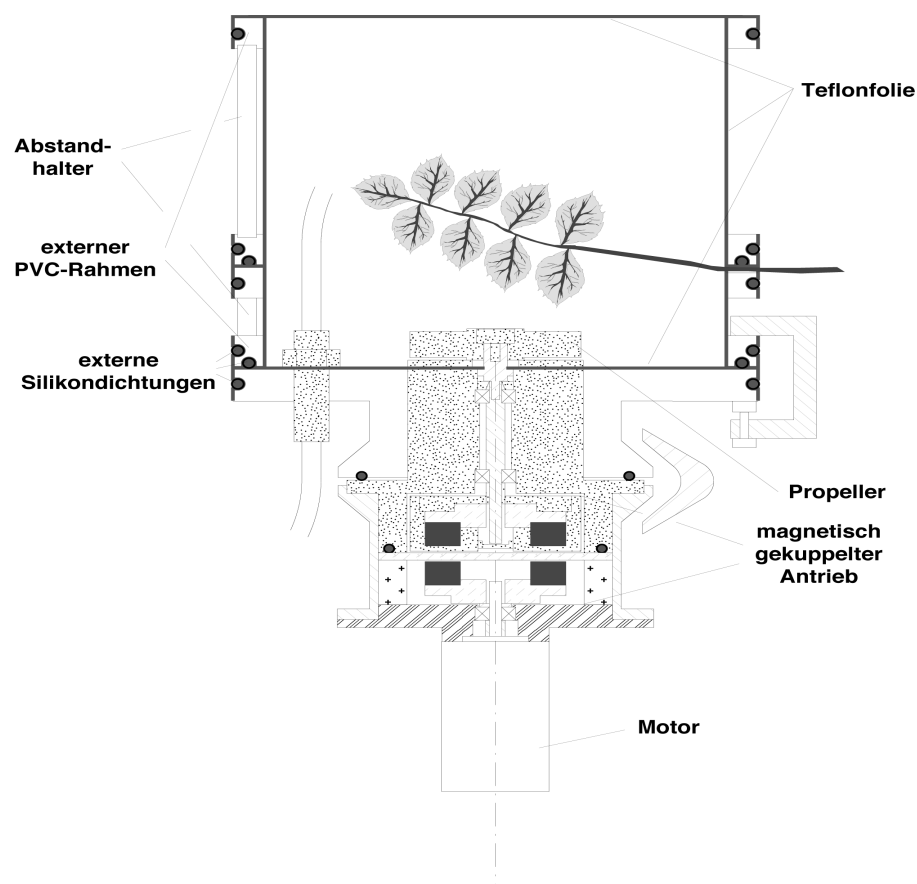
Die COS-Dosierung musste, wegen der äußerst geringen Konzentrationen (ca. 500-600 ppt), mit einer Permeationsanlage erfolgen. Kernelement dieser Anlage war ein Permeationsröhrchen (50 F2 136281, Fa. VICI Metronics, Kalifornien, USA), welches in einem separaten Permeationsofen auf exakt 30 °C temperiert wurde. Auf diese Weise konnte erreicht werden, dass das Permeationsröhrchen eine konstante COS-Menge an den das

Röhrchen mit einem Fluss von ca. 100 ml/min umspülenden Stickstoff (5,0 ; Messer Griesheim) abgab.

Die COS Permeationsrate wurde monatlich mit Hilfe des Gewichtsverlustes des Permeationsröhrchens (gravimetrisch) bestimmt. Das Gasgemisch wurde über einen elektronischen Massendurchflussregler der Fa. MKS, (Massachusetts) in die gereinigte Pressluft zugeleitet.

#### 2.4.4 Küvettenystem zur Bestimmung des Gaswechsels

Um den Einfluss einer höheren atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den COS-Austausch von höheren Pflanzen abschätzen zu können, wurde das Küvettenystem von Kuhn, (1997) benutzt. Die Küvetten ermöglichen es einen kleinen Ast eines Baumes in den Gaswechselraum einzubringen, ohne ihn vom Baum abzutrennen. Die Abbildung 18 zeigt einen Schematischen Schnitt durch eine der verwendeten Küvetten.



**Abbildung 18: Schnitt durch die Pflanzen-Küvette nach Kuhn, (1997)**

Die innere Oberfläche der Küvetten bestanden aus dem chemisch inerten Teflon, das insbesondere für die Untersuchungen an Schwefelverbindungen geeignet ist (Kesselmeier et al., 1996; Kuhn, 1997). Bei anderen Materialien kann es zur Aufnahme und Abgabe von COS kommen (Kuster & Goldan, 1987). Die Abbildung (19) zeigt die Stützgerüste, welche die durchsichtige Folie halten. Die Abmessungen der Küvetten waren:  $\varnothing = 0,145$  m und Höhe = 0,14 m.

Durch eine U-förmige Aussparung in einem der Stützringe war das knautschfreie Einbringen eines Astes möglich. Die entstehende Undichtigkeit an der Aussparung wurde mit Teflonband abgedichtet. Der etwas höhere Druck innerhalb der Küvette verhinderte das Eindringen von Außenluft. Die Abbildung 19 zeigt das Küvettensystem während die Laboruntersuchung.

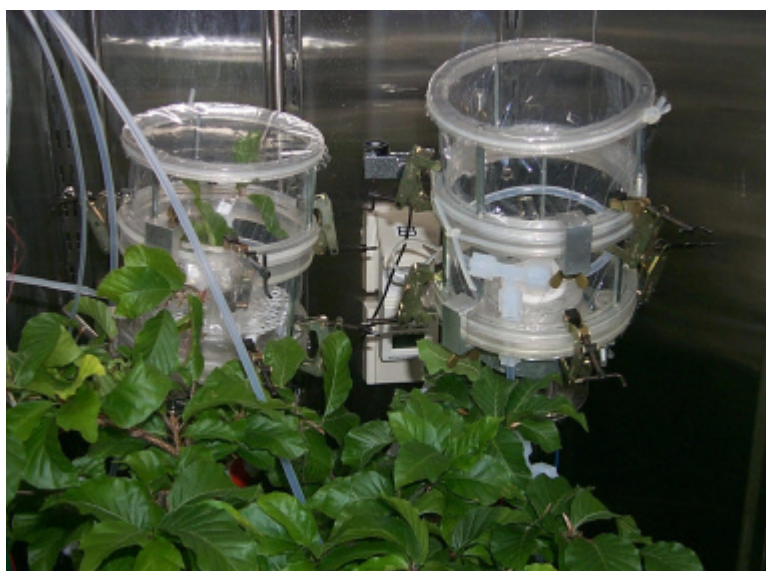


Abbildung 19: Küvettensystem mit den Spezies *Quercus ilex* L. und *Fagus sylvatica* L.

### 2.4.5 Probenentnahme der zwei COS Sammelsysteme

Für die Sammlung der Proben wurden zwei verschiedene Systeme verwendet:

Halbautomatisches Gasanalyzesystem "ARGON" analog zu Hofmann et al., 1992.

Vollautomatisches Gasanalyzesystem "SUGAR" (SUIfurGasAnalyzeR) nach von Hobe et al., (2001)

Beide Systeme wurden in MPCH-Werkstätten in Mainz gebaut. Sie beruhen auf dem Prinzip der kryogenen Fixierung der Spurengase in gekühlten Sammelfallen und anschließender chromatographischer Trennung in einer Säule. Der Unterschied der beiden Systeme liegt im technischen Aufbau der Kryofallen, dem zeitlichen Ablauf der Probenentnahme und der Injektion der Proben in den Gaschromatograph.

Den Kryosammler "ARGON" von Hofmann et al., 1992 stellt die Abbildung 20 dar. Die Sammelfalle besteht aus Glas, deren Oberfläche mit 5 %igem Dimethyldichlorsilan silanisiert wurde. Ventile steuern den Gasfluss durch den Sammler. Am Boden der Falle befindet sich silanisierte Glaswolle, die einen mechanischen Schutz gegen Durchbruch der kondensierten Komponenten darstellt. Die Fixierung des COS erfolgte durch Kühlung der Kryofalle mit flüssigem Argon auf  $-186\text{ °C}$ .

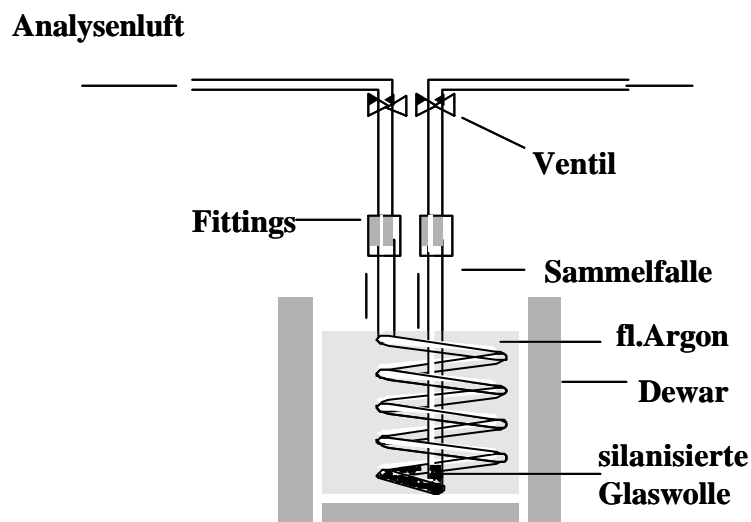
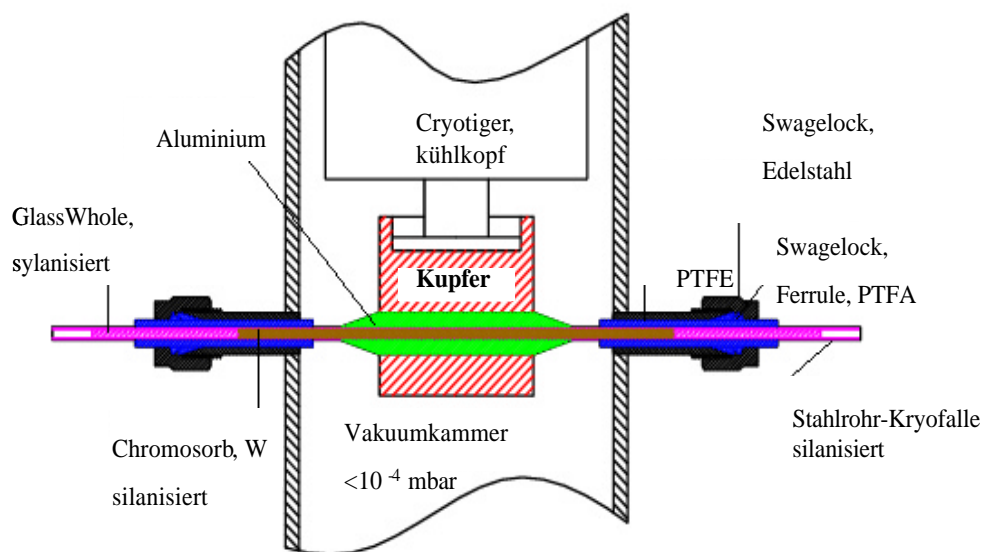


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Glaskryofalle (Hofmann et al., 1992)

Das System besteht aus 8 Kryofallen, von denen zwei zeitgleich von den abgezweigten Gasströmen aus der Referenz- und Messküvette durchflossen werden. (Der Durchfluss durch die 8 Kryofallen wird automatisch gesteuert). Die anschließende Injektion in das Analysesystem erfolgt manuell.

Zusätzliche Untersuchungen wurden mit einem, am Max Planck Institut für Chemie MPI entwickelten, vollautomatischen Sulphur-Gas-Analysator, "SUGAR", durchgeführt. Das vollautomatische Messsystem von von Hobe et al. (2000) unterscheidet sich vom oben beschriebenen im Sammel- und Injektionssystem. Als Kryofalle diente ein silanisiertes, rostfreies Stahlrohr (Silcosteel, Resteck Länge =20 cm, Ø = 2mm) mit einer inneren, ebenfalls silanisierten Glassoberfläche. Die Kryofalle wurde mit dem kommerziellen Produkt 45/60-Chromosorb W der Fa. Supelco gefüllt. Die Abbildung 21 stellt die Stahlrohr-Kryofalle dar. Für die Abkühlung während der kryogenen Probenanreicherung wird ein Kühlaggregat (Cryotiger der Fa. APD Cryogenics, USA), verwendet.



**Abbildung 21: Schematische Darstellung der Stahlrohr-Kryofalle nach von Hobe, (2000)**

Die Kryofalle wird mit Hilfe des CRYOTIGER-Kühlgerätes bis auf  $-150\text{ °C}$  abgekühlt. Dieses System besteht nur aus einer Kryofalle. Die Sammlung und Analyse von Referenz und Messküvette erfolgt sequentiell. Injektion in das Gasanalysesystem erfolgt anschließend automatisch. Somit ist es möglich, kontinuierlich Messungen durchzuführen, ohne manuell eingreifen zu müssen.

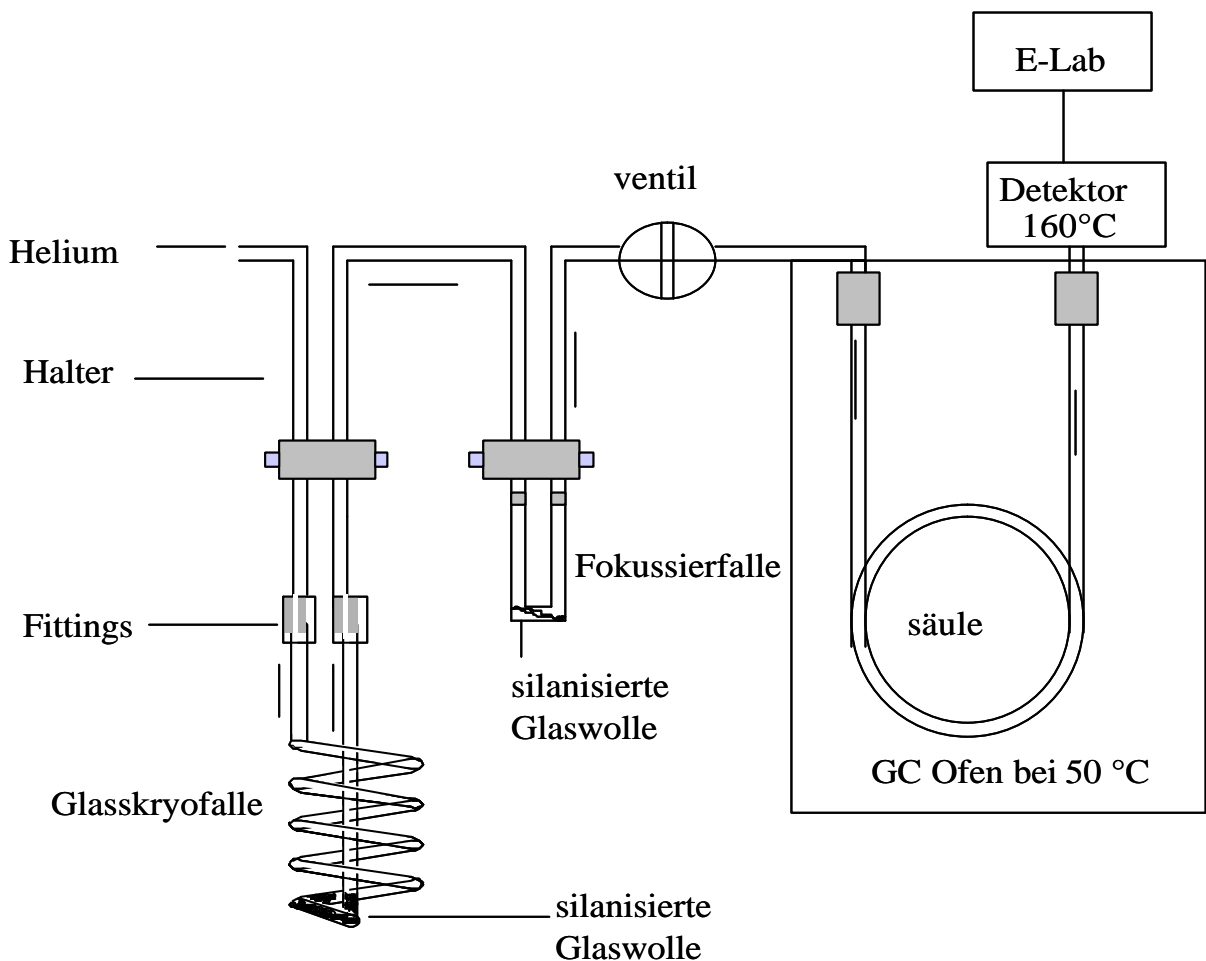
Die Tabelle 8 enthält einen Vergleich der in beiden Messsystemen verwendeten Komponenten.

	ARGON	SUGAR
Gaschromatograph	GC (HP5890 II )	Prototyp MPI Eigenbau
Detektor	Detektor FPD DELSI	Detektor FPD DELSI
Säule	Teflonschlauch, 1,8 m x 1/8 " (MSD, Galtek, München)	Teflonschlauch, 1,8 m x 1/8 " (MSD, Galtek, München)
Material der Säule	60-80 Carbopack B/1,5 % XE-60/1,0 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (Supelco Inc., USA)	60-80 Carbopack B/1,5 % XE-60/1,0 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (Supelco Inc., USA)
Säulentemperatur	von 50 °C bis 100°C	von 50 °C bis 100 °C
Analysetemperatur	bei 50 °C	bei 50 °C
Trägergas	Helium 5,6	Helium 5,6
Trägerfluss	30 ml	30 ml
Detektortemperatur	160 °C	160 °C
Retentionzeit	ca. 2 min	ca. 2 min
Integrator	E-Lab (OMS Tech., Miami)	E-Lab (OMS Tech., Miami)
Injektionsmethode	Manuell mit Wasser erwärmt	Automatisch mit elektrischem Impuls ca. 1s, 200 A, 1,5 V.
Kryotechnik	Flussiges Argon -186°C	Kühlaggregat Cryotiger (-150 °C)
Falle	Glassfalle 20 cm lang, am Boden gefüllt mit silanisierter Glasswolle.	Stahlkryofalle 7 cm lang, gefüllt mit 45/60 Chromosorb W. (Fa. Supelco Inc., USA).
Fokussierfalle	10 cm Glasrohr, gefüllt mit silanisierter Glaswolle.	keine
Durchfluss	100 ml min <sup>-1</sup>	100 ml min <sup>-1</sup>
Sammelvolumen	1,5 l	1,0 l
Sammelmethode & Sammelrate	zeitsynchron-parallele Probenentnahme jeweils in Mess- und Referenzküvette: 4x/h	sequentielle Probenentnahme zuerst in Mess- danach in Referenzküvette usw.; 4x/h

**Tabelle 8: Komponenten und Methoden der verwendeten Analysensysteme**

### 2.4.6 Quantitative Bestimmung von COS

Die halb- und vollautomatisch gesammelten Proben werden auf Schwefelverbindungen mit Hilfe eines Gaschromatograph-Ofens der Fa. HP (Modell 5890 II) und einem Eigenbau-Prototypen eines GC vom MPI analysiert. Die Konzentration der Schwefelverbindungen wurden mit einem zweiflammigen flammenphotometrischen Detektor (FPD Fa. Delsi, DI 2000) nachgewiesen. Die Abbildung 22 zeigt den Anschluss der Glaskryofalle an das GC-System mit dem flammenphotometrischen Detektor (FPD) des Systems ARGON.



**Abbildung 22: Schematische Darstellung der analytischen Methode des ARGON Messsystems.**

Bei dem System ARGON erfolgte die Probeentnahme mit Hilfe von flüssigem Argon (-186 °C) über eine Glaskryofalle (siehe Abbildung 22). Mit einer Pumpe wurde ein kontinuierlicher Fluss von 100 ml /min über 15 Minuten durch die Kryofalle geleitet. Anschliessend wurde die Kryofalle mit dem ausgefrorenen COS unter Erwärmung mit dem

Trägergas Helium 5.0 für ca. 2 min gespült und nach der cryogener Fokussierung in der Fokussierfalle sofort an den GC weitergeleitet, wo dann das Gasgemisch in die Säule des GC injiziert wurde. Die chromatographische Trennung von COS erfolgte mit einer 1,8 m langen FEP-Säule, mit einem Außendurchmesser von 3,2 mm und einen inneren Durchmesser von 1,6 mm) die mit 60/80 Mesh Carbopack B / 1,5 % XE 60 / 1,0 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> der Fa. Supelco gefüllt war, bei einer isothermen Temperatur von 50 °C. Als Trägergasfluß wurde 30 ml He/min benutzt. Typische Chromatogramme sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Retentionszeit von COS bei 50 °C lag bei 2 Minuten, die chromatographische Analyse für COS dauerte ca. 5 Minuten.

Bei SUGAR erfolgte die Probeentnahme automatisch über der Stahlrohr-Kryofalle (siehe Abbildung 21). Durch die Kryofalle wurde wieder mittels einer Pumpe ein Durchfluss von 100 ml /min über 10 Minuten erzeugt. Die in der abgekühlten Kryofalle automatisch gesammelten Proben wurden danach auch automatisch injiziert. Die Quantifizierung der Probe erfolgte chromatographisch wie bei dem System ARGON. Die Sequenz der Temperaturen bei SUGAR war während der chromatographischen Bestimmung wie folgt programmiert:

- 1,8 min 50 °C, Aufheizung mit 30 °C/min
- 2 min 85 °C, Aufheizung 30 °C/min
- 2,5 min 120 °C.

„...Das Nachweisprinzip beruht auf der Bildung angeregter S<sub>2</sub>-Moleküle bei der Verbrennung der Schwefelkomponenten in einer wasserstoffreichen Sauerstoff- oder Luftflamme, die unter Aussendung von Chemilumineszenzstrahlung bei 394 nm wieder in den Grundzustand übergehen (Farwell & Barinaga, 1986). Die Strahlung wird nach Passage eines Filters von einem Photomultiplier in ein Stromsignal umgesetzt. Da für die detektierbare Strahlung jeweils 2 Schwefelatome nötig sind, ist die Detektorcharakteristik annähernd quadratisch (Cardwell & Marriott, 1982)...“ (Kuhn, 1997).

Die Abbildung 23 zeigt Chromatogramme, die sich bei der Kalibration mit einer COS-Eichprobe (a) und einer Probe der Pflanzenküvette (b) ergeben. Das Chromatogramm der Probe der Pflanzenküvette enthält zusätzlich einen CO<sub>2</sub>-Peak.



Um aus den Peak-Flächen die Konzentration zu ermitteln, ist es notwendig den flammenphotometrischen Detektor (FPD) regelmäßig mit Standardproben zu kalibrieren. Die Kalibrationsmethode wird im folgenden Kapitel dargestellt.

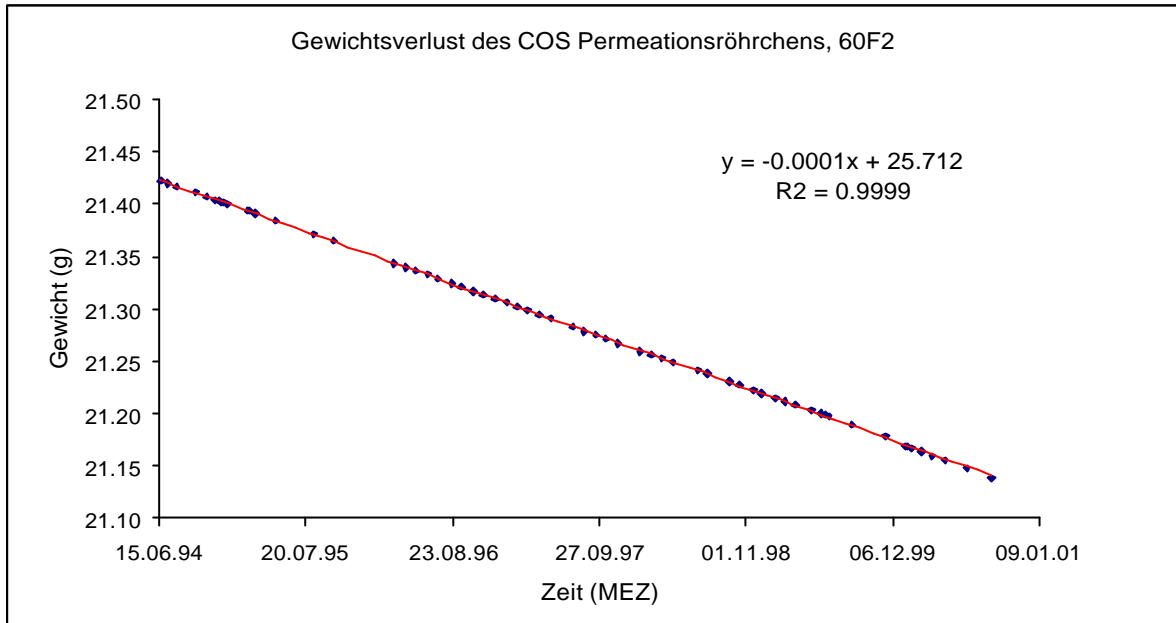
#### **2.4.7 Kalibration des Detektors und Fehlerbetrachtungen**

Beide Systeme, das halbautomatische und das vollautomatische, wurden nach der gleichen Methode kalibriert, bei der sequentiell kleine Volumina eines Eichgases mit einer bestimmten Konzentration in die chromatographische Trennsäulen des GC injiziert wurden. Das halbautomatische Messsystem wurde mit Kalibrierschleifen von 0,5 bis 3,0 ml kalibriert. Die Kalibrierung des vollautomatischen Messsystems erfolgte ebenfalls durch Injektion verschiedener Volumina, die direkt aus der COS-Permeationsanlage via Massendurchflussregler alle 15 Minuten in die chromatographische Trennsäule gegeben wurden.

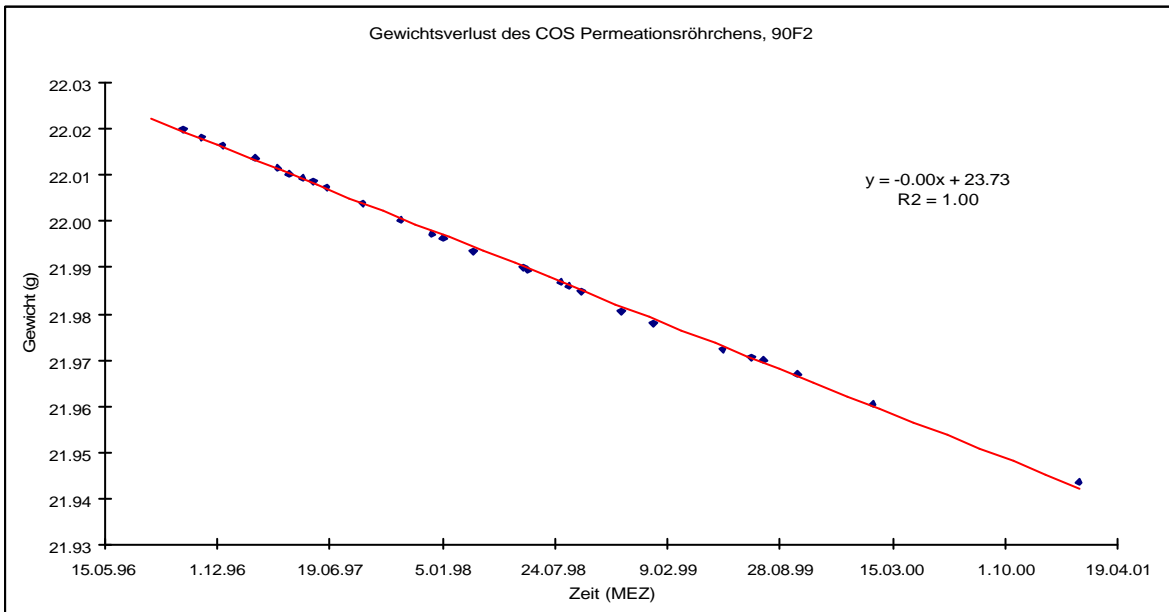
Aus den logarithmierten COS-Standard Eichkonzentrationen und den entsprechenden, ebenfalls logarithmierten, Peakflächen wird per linearer Regression eine Kalibrationskurve bestimmt (Kuhn, 1997; von Hobe, 2001), mit der später aus den Flächen der Peaks der Referenz- und Pflanzenküvette direkt die COS-Konzentration in beiden Küvetten ermittelt werden kann.

Zur Herstellung der Eichproben wurden Permeationsanlagen der Fa. Haunold, (Frankfurt) sowie einem MPCH-Eigenbau und einem Permeationsröhrchen der Fa. VICI Metronics, (Kalifornien, USA) verwendet. Die Konzentration im Eichgas wurde mittels der Permeationsrate und dem N<sub>2</sub>-Fluss durch die Permeationsanlage bestimmt. Die Permeationsrate wird gravimetrisch bestimmt, d.h. durch Wägung der Permeationsröhrchen in regelmäßigen Zeitabständen analog zu Kapitel 2.4.3 ermittelt.

Die beiden Abbildungen 24 und 25 zeigen den Gewichtsverlust der für die Kalibration des halbautomatischen (No. 60 F2) und des vollautomatischen (No. 60 F1) Systems verwendeten Permeationsröhrchen.



**Abbildung 24: Gewichtsverlust der Permeationsröhrchen für die Kalibration des halbautomatischen Systems**



**Abbildung 25: Gewichtsverlust der Permeationsröhrchen für die Kalibration des vollautomatischen Systems**

Der relative Fehler bei der gravimetrischen Methode beträgt ca. 2,9 %, (siehe auch von Hobe, 2000). Die Abbildung 26 zeigt eine exemplarische Kalibrationskurve für den

Flammenphotodetektor. Die Kalibrationskurve wurde mit dem oben genannten Datenerfassungs- und Auswertesystem, E-LAB, ermittelt und dargestellt.

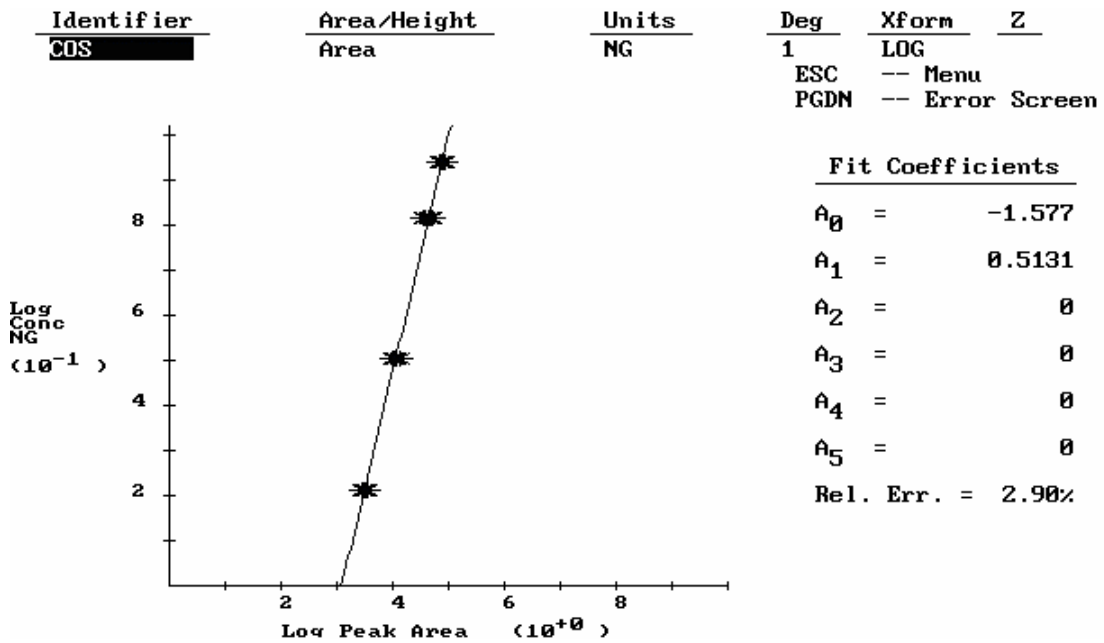


Abbildung 26: COS-Kalibrationskurve für den FPD durch das Programm E-LAB.

Der FPD Detektor besitzt einen nichtlinearen funktionellen Zusammenhang zwischen Peakfläche und Konzentration der Analyte. Deshalb wird die COS Kalibrationskurve aus den logarithmierten Werten der Peakfläche und der Konzentration der Analyte (COS) bestimmt.

Aus den oben darstellten Kalibrationskurven kann man einfach den relativen Fehler (rel. Error) entnehmen. Die Kalibration des FPD wurde täglich überprüft und gegebenenfalls nachgeführt, sodass der relative Fehler bei der quantitativen COS-Bestimmung unter 6% gehalten werden konnte (Kuhn, 1997) und (von Hobe et al., 2000).

## 2.5 Versuchsbeschreibungen

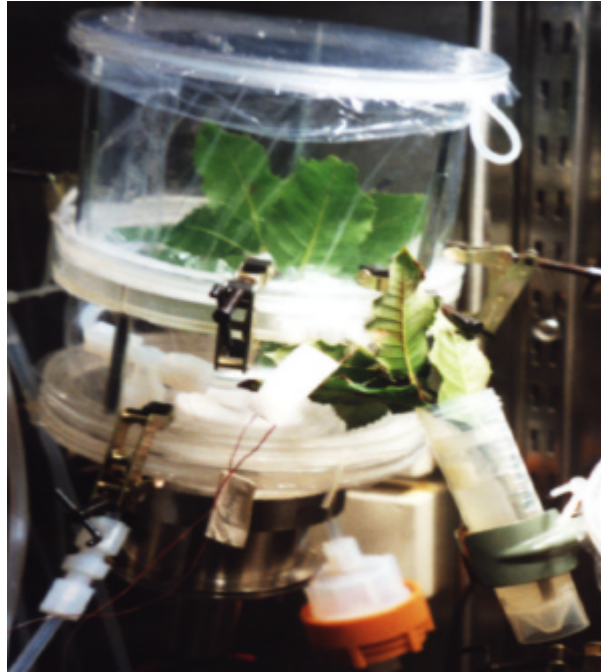
### 2.5.1 Untersuchung des COS Austausches

Zur Analyse der Gasaustauschparameter wurden die Pflanzen zum Max Planck Institut für Chemie transportiert und dort sofort in die zweite Klimakammer, die in das bereits beschriebene Analysesystem integriert war, gestellt. In der Kammer wurden die Pflanzen bei gleichen Umweltparametern wie am Botanischen Institut gehalten: Umgebungstemperatur 25 °C, relative Luftfeuchte 70 %, photosynthetisch aktive Strahlung bei ca. 600  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \text{s})$ , COS-Umgebungskonzentration ca. 600 ppt sowie einer entsprechenden  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration von 350 ppm bzw. 800 ppm. Die Versuchsäste wurden mindestens einen Tag vor Messbeginn in die Messküvette gebracht ohne sie vom Stamm zu trennen, wo sie dann für 2 bis 5 Tage untersucht wurden.

### 2.5.2 Methode zur Beeinflussung der stomatären Leitfähigkeit

Bisherige Untersuchungen zum COS-Austausch von Pflanzen zeigen, dass der COS-Austausch im Zusammenhang mit dem Prozess der Photosynthese während des Tages beobachtet wurde. Ausgehend von diesen Befunden haben Autoren wie Taylor et. al., (1983); Kluczewski et.al., (1985); Brown & Bell (1986); Fall et.al., (1988); Goldan et al., (1988); Kesselmeier & Merk, (1993); Kesselmeier et al, (1993); Hoffmann, (1993); Huber, 1994; Collins & Bell. (1996); Kuhn, (1997) und Xu, (2001) die Hypothese aufgestellt, dass COS direkt durch die Stomata aufgenommen wird. Das im Folgenden beschriebene Experiment dient der weiteren Fundamentierung der Hypothese, dass COS wie  $\text{CO}_2$  über die Stomata aufgenommen wird. Ob die Austauschprozesse von COS durch die Aktivität der Stomata reguliert werden, soll durch die Applizierung des Phytohormon Abscisinsäure (ABA) geprüft werden. Dazu werden am Tag unter voller Lichteinstrahlung die Stomata mit ABA geschlossen. Wenn COS über die selben Wege wie  $\text{CO}_2$  über die Stomata aufgenommen wird, ist zu erwarten, dass die COS-Aufnahme und die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme auf Werte um Null fallen. Ebenso die Transpiration.

Die Abbildung 29 zeigt eine fotografische Darstellung des Versuches mit einem abgeschnittenen Ast von *Quercus ilex* L. in einer Nährlösung, die bereits das Phytohormon Abscisinsäure (ABA) enthält.



**Abbildung 27: Abgeschnittener Ast von *Quercus ilex* L. in Nährlösung während die Applizierung des Phytohormones Abscisinsäure (ABA)**

Die Versuchsdurchführung erfolgt in Anlehnung an die von Gerlach (1997) beschriebene Methode, nach der die Applizierung von Abscisinsäure (ABA) zum Verschluss der Stomata führt Honour et al., (1995); Strasburger, (1998). Die Versuchssäste wurden mindestens einen Tag vor Messbeginn in die Klimakammer gebracht. Am zweiten oder dritte Tag wurde der Versuchsaast der Pflanze abgetrennt. Dazu wurde zuerst die gewünschte Stelle, an welcher der Schnitt ausgeführt werden sollte, mit Isopropanol desinfiziert und danach in die Nährlösung eingetaucht. Später wurde der Ast mit einem Skalpell an der gewünschten Stelle in der Nährlösung abgeschnitten, um zu vermeiden, dass Luft in die Gefäße des Astes eindringt.

Zur Herstellung der Nährlösung mit den folgenden Endkonzentrationen von:

- 1,0 mM KCl
- 0,1 mM NaCl
- 0,1 mM CaCl<sub>2</sub>

wurden die Reagenzien mittels einer analytischen Waage, Fa. Sartorius, Göttingen, gewogen und in einen Messkolben gegeben und mit Milli-Q-Wasser (HPLC-Grade, R 18 M $\Omega$ ) zu einem Liter aufgefüllt.

Während einer Meßreihe wurde die Nährlösung täglich gewechselt. Für die Applizierung des Phytohormons Abscisinsäure (ABA) wurde in die Nährlösung zusätzlich 0,1 mM ABA (Sigma) zugesetzt. Die Applizierung des Phytohormons erfolgte am dritten Tag der Probennahme, indem der Versuchsaast in die ABA-Nährlösung eingetaucht wurde und der Austausch von CO<sub>2</sub> sowie die physiologischen Parameter CO<sub>2</sub>-Assimilation und Transpirationsrate kontinuierlich aufgenommen wurden.

### 2.5.3 Bestimmung der Aktivität des Enzyms Carboanhydrase (CA)

Die Bestimmung der Aktivität des Enzyms Carboanhydrase -zu deutsch: Kohlensäureanhydratase (Borris & Libbert, 1985) - erfolgte elektrometrisch nach der Methode von Wilbur & Anderson, (1948). Diese Methode beruht auf dem Prinzip der pH-Erniedrigung durch die katalysierende Wirkung der CA auf die CO<sub>2</sub>-Dissoziation. Dabei wird die Zeit bestimmt, in der sich der pH-Wert eines Puffers bzw. Ansatzes (mit und ohne Enzym) bei 0 °C durch Zugabe einer CO<sub>2</sub>-gesättigten Lösung von einem Startwert von ca. pH 8,2 auf ca. 7,7 erniedrigt. Die Aktivität des Enzyms Carboanhydrase (Aktivität<sub>CA</sub>) wird in dimensionslosen Einheiten (Units) angegeben und nach der Gleichung 4 wie folgt berechnet Porter & Grodzinski, (1984):

$$\text{Aktivität}_{CA} = \frac{t_0}{t_E} - 1 \quad (\text{G4})$$

Dabei sind:

- t<sub>0</sub> ...die Zeit, die ein Ansatz ohne Enzym für eine pH-Abnahme um 0,5 benötigt,
- t<sub>E</sub> ...die Zeit, die ein Ansatz mit Enzym für eine pH-Abnahme um 0,5 benötigt.

Nach dieser Methode sind somit folgende Schritte notwendig:

- a) Extraktion des Enzyms Carboanhydrase
- b) Herstellung einer CO<sub>2</sub>-haltigen Lösung
- c) Elektrometrische Bestimmung der Aktivität der Carboanhydrase.

Die Methode und die verwendeten Chemikalien werden im Folgenden detailliert beschrieben.

a) Extraktion der Carboanhydrase

Die frischen Blätter von *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. wurden dabei in 9 Schritten wie folgt behandelt:

- Einfrieren der Blätter in flüssigem Stickstoff
- Zerkleinern der gefrorenen Blätter zu feinem Pulver in einem Mörser.
- Abwiegen von ca. 1,0 - 2,0 g der Probe
- Zugabe von bis zu 20 ml des Isoliermediums, das Bicine mit einem pH-Wert von 8,2
- Zugabe 5 % ( Polyvinylpyrrolidon (Poly-1-vinyl-2-pyrrolidon)) (SERVA Feinbiochemica)
- Homogenisieren des Mediums
- Zentrifugieren des Gemisches ca. 30 Minuten bei max. 4 °C und 20000 rpm
- Dekantieren des Überstandes

Der dekantierte Überstand enthält das extrahierte Enzym Carboanhydrase.

Zur Herstellung des Bicine-Puffers mit den folgenden Endkonzentrationen von :

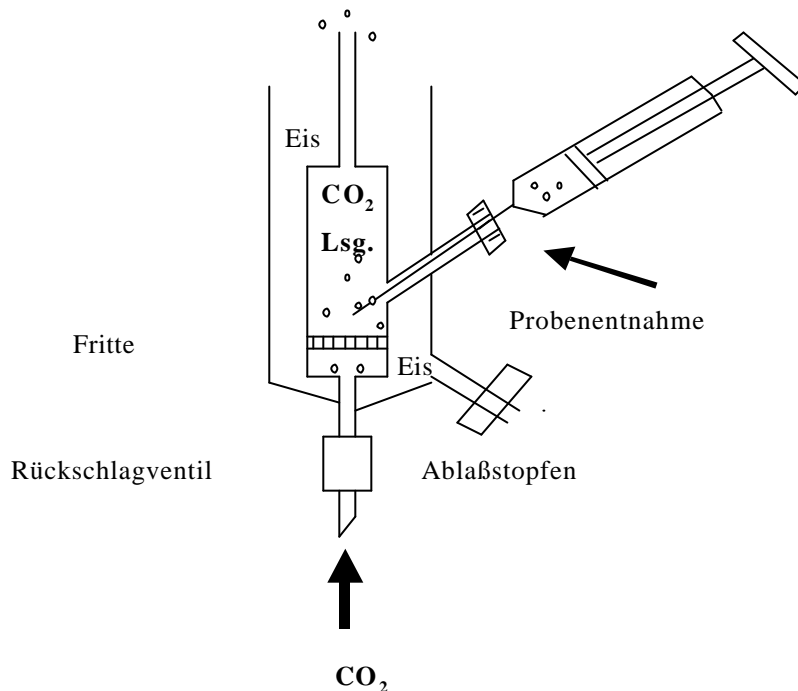
- 50 mM Bicine  $C_6H_{13}NO_4$  (pKs 8.35)
- 10 mM NaCl
- 1 mM EDTA
- 0,1 mM PMSF (8-Phenylmethylsulphonylfluorid)
- 1 M NaOH Merk

wurden die Reagenzien mittels einer analytischen Waage, Fa. Sartorius, Göttingen , gewogen und in einen Messkolben zu gegeben und mit Milli-Q-Wasser (HPLC-Grade, R 18 M $\Omega$  ) zu einem Liter aufgefüllt.

Da 8-Phenylmethylsulphonylfluorid (PMSF) nicht wasserlöslich ist, wurde es zunächst eine Lösung in Isopropanol hergestellt und die entsprechende Volumina der PMSF Stammlösung in die Pufferlösung gegeben. Anschliessend wurde die Pufferlösung mit Hilfe von 1 M Natriumhydroxidlösung auf einen pH-Wert von 8,2 eingestellt.

## b) Herstellung einer CO<sub>2</sub>-haltigen Lösung

Die CO<sub>2</sub>-Lösung wurde mit der Apparatur, welche die Abbildung 28 zeigt, hergestellt. Dabei wurde deionisiertes Wasser mindestens 40 Minuten mit 100 %igem CO<sub>2</sub> ( 99,995 Vol % Klasse1, Messer Griesheim) begast. Nach Gmelin, (1977) ergibt sich bei 0 °C und Normaldruck eine CO<sub>2</sub> Konzentration von 76 mM.



**Abbildung 28: Eisgekühltes Begasungsgefäß zur Herstellung einer CO<sub>2</sub>-haltigen Lösung**

Die CO<sub>2</sub>-haltige Lösung mit der gewünschten Konzentration wird mit einer 1000 µl HPLC-Spritze (Fa. Hamilton, Schweiz) aus dem Begasungsgefäß entnommen.

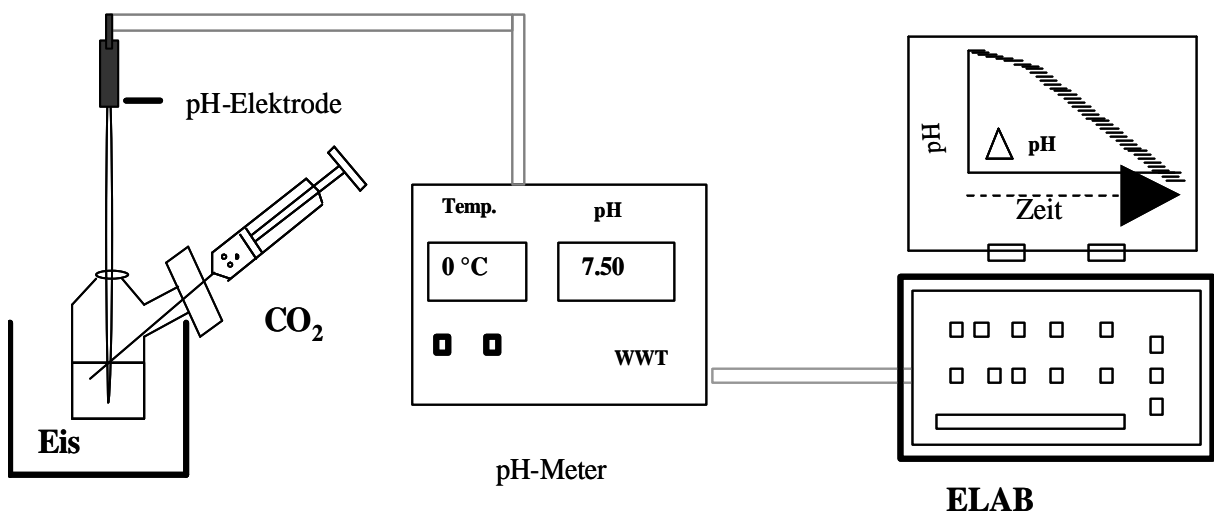
## c) Elektrometrische Bestimmung der Aktivität der Carboanhydrase

Die Bestimmung der Aktivität des Enzyms erfolgte bei 0 °C mit einer gut vorgekühlten Elektrode. Das Testgefäß (Vol. 11 ml) besaß eine abgedichtete Öffnung für die Elektrode sowie eine mit einem Septum versehene Schraubkappe, über die 1 ml CO<sub>2</sub>-haltige Lösung in das Gefäß eingespritzt werden konnte. Es wurden 4 ml BICINE-Puffer (T<sub>0</sub>) bzw. 4 ml Pflanzenextrakt (T<sub>E</sub>) in das Versuchsgefäß gebracht und 2 Minuten inkubiert bis sich der pH-

Wert stabilisierte. Mit Hilfe des elektronischen Rührers Multipoint HP (VARIOMAG) und eines Permanentmagnetes konnte die Versuchslösung kontinuierlich homogenisiert werden. Durch Zugabe von 1 ml der CO<sub>2</sub>-gesättigten Lösung in ca. 0°C kaltem Wasser wurde die Reaktion gestartet.

Der pH-Wert wurde mit einem pH-Meter mit Temperaturfühler (pH-Meter 537 der Fa. WWT, Weilheim) und einer pH-Elektrode (INGOLD U-455-ST der Fa. Ingold) gemessen und anschliessend an die digitale Messwertverarbeitungskarte ELAB (OMS Tech.Inc., Miami) die in einem PC installiert ist, übertragen. Die Kalibration der pH-Elektrode erfolgte mit Pufferlösungen pH4, pH7, pH9 (Fa. WWT, Weilheim).

Die Abbildung 29 stellt die Apparatur für die Bestimmung der Aktivität des Enzyms Carboanhydrase schematisch dar.



**Abbildung 29: Schematische Darstellung der Apparatur für die Bestimmung der Aktivität der Carboanhydrase**

Die pH-Erniedrigung konnte nun anhand des Zeitverlaufes der digitalisierten pH-Messwerte ermittelt werden.

## 2.6 Berechnungen der Gasaustausch-Parameter

Für die Untersuchungen wurden folgende Gasaustausch-Parameter berechnet:

- $c_{\text{COS}}$ ...COS-Konzentration
- $F_{\text{COS}}$ ...COS-Spurengasfluss
- $T_{\text{H}_2\text{O}}$ ...Transpirationsrate
- $L_{\text{Stomata}}$ ...stomatäre Leitfähigkeit
- $A_{\text{CO}_2}$ ...CO<sub>2</sub>-Austauschrate (Assimilationsrate)
- $v_{\text{DCOS}}, v_{\text{DCO}_2}$ ...Depositionsgeschwindigkeit für COS bzw. CO<sub>2</sub>.

### 2.6.1 Berechnung der COS-Konzentration der Umgebungsluft

Die COS Konzentration,  $c_{\text{COS}}$  in mol<sub>COS</sub>/mol<sub>Luft</sub>, der Umgebungsluft kann aus folgenden Angaben direkt nach der Gleichung (G5) berechnet werden:

$$c_{\text{COS}} = \frac{m_{\text{COS}}}{V_s} \cdot \frac{M_v}{M_{\text{COS}}} \quad (\text{G5})$$

Dabei sind:

- $m_{\text{COS}}$ ...gemessene Masse von COS aus der gaschromatographischen Analyseverfahren in [g]
- $V_s$ ...Volumen der Probe unter Standardbedingungen (0 °C und 1013 mbar) in [l]
- $M_v$ ...Molvolumen von Luft in [l/mol] unter Standardbedingungen (0°C und 1013 mbar)
- $M_{\text{COS}}$ ...Molekulargewicht von COS in [g/mol]

### 2.6.2 Berechnung der COS-Austauschrate

Der Netto-Spurengasfluss von COS,  $F_{\text{COS}}$  in [pmol/(m<sup>2</sup> s)], wurde direkt nach der Gleichung (G6) berechnet:

$$F_{\text{COS}} = \frac{m_{\text{MESS}} - m_{\text{REF}}}{V_s \cdot M_{\text{COS}}} \cdot \frac{Q}{A_{\text{Blatt}}} \quad (\text{G6})$$

Dabei sind:

- $m_{\text{MESS}}$  und  $m_{\text{REF}}$  gemessene Massen von COS aus der gaschromatographischen Analysemethode in [ng] aus den Proben der Referenz und Messküvette
- $V_s$  Volumen der Probe unter Standardbedingungen (0°C und 1013 mbar) in [l]
- $M_{\text{COS}}$  Molekulargewicht von COS in [g/mol]
- $A_{\text{Blatt}}$  Blattoberfläche der in der Messküvette eingeschlossenen Blätter in [m<sup>2</sup>]
- $Q$  Kammerdurchflussrate bei Standardbedingungen (0 °C und 1013 mbar) in [l/min]

### 2.6.3 Berechnung der Depositionsgeschwindigkeiten

Die Depositionsgeschwindigkeiten für COS und CO<sub>2</sub> ( $v_{\text{DCOS}}$  und  $v_{\text{DCO}_2}$  in [mm/s]) lassen sich aus den Gleichungen (G7a, G7b) berechnen (Finlayson-Pitts & Pitts, 1986). Hierfür werden nur die Spurengasflüsse von COS und CO<sub>2</sub> ( $F_{\text{COS}}$  und  $A_{\text{CO}_2}$ ) und deren Umgebungskonzentrationen ( $c_{\text{COS}}$  und  $c_{\text{CO}_2}$ ) benötigt.

$$v_{\text{DCOS}} = \frac{F_{\text{COS}}}{c_{\text{COS}}} \quad v_{\text{DCO}_2} = \frac{A_{\text{CO}_2}}{c_{\text{CO}_2}} \quad (\text{G7a, G7b})$$

Für die COS-Konzentrationen wurden die Konzentrationen in den Referenzküvetten verwendet.

### 2.6.4 Berechnung der Transpirationsrate

Die Berechnung der Transpirationsrate,  $T_{H_2O}$  in [pmol/(m<sup>2</sup> s)], wurde direkt nach Gleichung (G8) berechnet:

$$T_{H_2O} = \frac{\Delta c_{H_2O}}{M_V} \cdot \frac{Q}{A_{Blatt}} \quad (G8)$$

Dabei sind:

- $\Delta c_{H_2O}$  gemessene Differenz der Konzentrationen [ppmv] zwischen den Proben der Referenz- und Messküvette
- $V_s$  Volumen der Probe unter Standardbedingungen (0 °C und 1013 mbar) in [l]
- $M_V$  Molvolumen von Luft in [l/mol]
- $A_{Blatt}$  Blattoberfläche der in der Messküvette eingeschlossenen Blätter in [m<sup>2</sup>]
- $Q$  Kammerdurchflussrate bei Standardbedingungen (0 °C und 1013 mbar) in [l/min]

### 2.6.5 Berechnung der Assimilationsrate

Die Berechnung der Assimilationsrate,  $A_{CO_2}$  in [μmol/(m<sup>2</sup> min)], wurde direkt nach Gleichung (G9) berechnet:

$$A_{CO_2} = \frac{\Delta c_{CO_2}}{M_V} \cdot \frac{Q}{A_{Blatt}} \quad (G9)$$

Dabei sind:

- $\Delta c_{CO_2}$  gemessene Differenz der Konzentrationen [ppm] zwischen den Proben der Referenz- und Messküvette

- $V_s$  Volumen der Probe unter Standardbedingungen (0 °C und 1013 mbar) in [l]
- $M_V$  Molvolumen von Luft in [l/mol]
- $A_{\text{Blatt}}$  Blattoberfläche der in der Messküvette eingeschlossenen Blätter in [m<sup>2</sup>]
- $Q$  Kammerdurchflussrate bei Standardbedingungen (0°C und 1013 mbar) in [l/min]

### 2.6.6 Berechnung der stomatären Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit,  $G_{\text{Stomata}}$ , wird für die Charakterisierung des stomatären Öffnungszustandes, der von der Anzahl und der individuellen Öffnungsweite der Stomata abhängt, verwendet. Für die Berechnung der nicht direkt messbaren Grösse mit Hilfe der Gleichung (G10) berechnet. Dafür werden folgende Angaben benötigt:

- $F_{\text{H}_2\text{O}}$  Transpirationsrate in [mmol/(m<sup>2</sup> min)]
- $a_{\text{FBlatt}}$  und  $a_{\text{FKüv}}$  absolute Luftfeuchte innerhalb des Blattes und in der Küvettenluft in [kg/m<sup>3</sup>]

$$G_{\text{Stomata}} = \frac{T_{\text{H}_2\text{O}}}{a_{\text{FBlatt}} - a_{\text{FKüv}}} \quad (\text{G10})$$

Für die Berechnung der stomatären Leitfähigkeit ( $G_s$ ) werden die absoluten Luftfeuchten inner- und ausserhalb des Blattes nach nach der Gleichung (G11) ermittelt.

$$a_F = \frac{E \cdot H_{\text{rel}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{R \cdot 1000 \cdot (T_N + T)} \quad (\text{G11})$$

Dabei ist

- $a_F$  absolute Feuchte in [kg/m<sup>3</sup>]

- $E$  Sättigungsdampfdruck in [hPa]
- $H_{\text{rel}}$  relative Feuchte in [%]
- $M_{\text{H}_2\text{O}}$  molare Masse des Wassers in [g/mol] (18,016 g/mol)
- $T_{\text{N}}$  Normaltemperatur in [K] (273,15 K)
- $R$  allgemeine Gaskonstante in [J/(mol K)] ( $R=8,314$  J/(mol K))
- $T$  Temperatur in [°C]

Für die Berechnung von  $a_{\text{FKüv}}$ , der absoluten Feuchte in der Küvette, ist die in der Küvette gemessene relative Luftfeuchte,  $H_{\text{rel}}$ , zu verwenden. Die Berechnung von  $a_{\text{FBlatt}}$ , der absoluten Feuchte im Blatt, erfolgt unter der Annahme<sup>1</sup>, dass die relative Luftfeuchte,  $H_{\text{rel}}$ , innerhalb der stomatären Höhle 100 % beträgt (Kesselmeier & Bode, 1997). Für  $H_{\text{rel}}$  also ist in diesem Fall 100% zu verwenden.

Der Sättigungsdampfdruck kann nach Gleichung (G12) berechnet werden:

$$E = 6,1078 \cdot e^{\frac{17,08085T}{234,175+T}} \quad (\text{G12})$$

Dabei sind:

- $E$  Sättigungsdampfdruck in [hPa] und
- $T$  Temperatur in [°C].

Für den Sättigungsdampfdruck in [hPa] in der stomatären Höhle wird die Blattemperatur auf der Unterseite des Blattes verwendet sowie die Temperatur der Küvettenluft im Küvetteninneren.

---

<sup>1</sup> der pflanzliche Apoplast bildet die Quelle des Transpirationswassers

### 2.6.7 Fehlerfortpflanzung

Die Fehlerfortpflanzung in einer Formel  $f(x_1, \dots, x_N)$ , deren Variablen,  $x_1, \dots, x_N$ , nur mit einem gewissen Fehler bzw. einer Standardabweichung,  $\sigma_1 \dots \sigma_N$ , bestimmt werden können, ist leicht nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauss zu ermitteln. Bei  $N$  gegebenen Variablen und deren Standardabweichungen berechnet sich die resultierende Standardabweichung nach Gleichung (G13).

$$s_{f(x_1, \dots, x_N)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{d f(x_1, \dots, x_N)}{dx_i} \right)^2 \cdot s_i^2} \quad (\text{G13})$$

Die folgenden Ausführungen behandeln die konkrete Berechnung der Fehlerfortpflanzung bei der zentralen Grösse, dem COS-Spurengasfluss ( $F_{\text{COS}}$ ).

Nach den Regeln der Berechnung der Fehlerfortpflanzung nach Gauss muss die Gleichung für die Berechnung des Spurengasflusses (G14) nach den folgenden Variablen partiell abgeleitet werden, da diese nur mit einem Fehler bestimmt werden können:  $m_{\text{MESS}}$ ,  $m_{\text{REF}}$ ,  $V_s$ ,  $A_{\text{Blatt}}$ , und  $Q$ .

$$F_{\text{COS}}(m_{\text{MESS}}, m_{\text{REF}}, Q, V_s, A_{\text{Blatt}}) = \frac{m_{\text{MESS}} - m_{\text{REF}}}{V_s \cdot M_{\text{COS}}} \cdot \frac{Q}{A_{\text{Blatt}}} \quad (\text{G14})$$

Die Tabelle 9 enthält die partiellen Ableitungen der Gleichung (G12), exemplarische Messwerte und die Messefehler für die einzelnen Messgrößen. Der Beitrag der einzelnen Komponenten ( $\sigma_{\text{FCOS}_i}$ ) zum Gesamtfehler in % ist auf den COS-Spurengasfluss ( $F_{\text{COS}}$ ) bezogen.

Index	Variable $x_i$	Werte in [ $x_i$ .]	Fehler	$\sigma_I$ in	$\left  \frac{d F_{COS}}{dx_i} \right $	$S_{F_{COS}_i}$ in [%]
			in [%]	[ $x_i$ .]		
1	$m_{MESS}$	1,184 ng	5	0,059 ng	$\frac{Q}{V_S \cdot M_{COS} \cdot A_{Blatt}}$	13,177
2	$m_{REF}$	1,908 ng	5	0,095 ng	$\frac{Q}{V_S \cdot M_{COS} \cdot A_{Blatt}}$	8,177
3	$V_s$	1,5 l	1	0,015 l	$\frac{ m_{MESS} - m_{REF} }{V_S^2 \cdot M_{COS}} \cdot \frac{Q}{A_{Blatt}}$	1,000
4	$A_{Blatt}$	84,45 cm <sup>2</sup>	2	1,69 cm <sup>2</sup>	$\frac{ m_{MESS} - m_{REF} }{V_S \cdot M_{COS}} \cdot \frac{Q}{A_{Blatt}^2}$	2,000
5	$Q$	2,2 l/min	5	0,1 l/min	$\frac{ m_{MESS} - m_{REF} }{V_S \cdot M_{COS}} \cdot \frac{1}{A_{Blatt}}$	5,000

**Tabelle 9: Beiträge der Fehler der Einzelkomponenten zum Gesamtfehler des COS-Spurengasflusses (Definition der Variablen siehe Kapitel 2.6.2)**

Die Werten in der letzten Spalte wurden nach der Gleichung (G15) berechnet. Sie sind die propagierten Standardabweichungen der entsprechenden Komponente in % bezogen auf  $F_{COS}$ .

$$S_{F_{COS}_i} = \left| \frac{d F_{COS}}{dx_i} \right| \cdot s_{x_i} \quad (G15)$$

Die Standardabweichung des propagierten Gesamtfehlers ergibt sich somit aus der Gleichung (G16):

$$s_{F_{COS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{F_{COS}_i}^2} \quad (G16)$$

Der resultierende Gesamtfehler, der sich aus den in der Tabelle 8 angegebenen einzelnen Fehlerkomponenten ( $s_{F_{CO_2}}$ ) ergibt, beträgt 16,5 %.

Die Analyse zeigt, dass der Hauptanteil des resultierenden Gesamtfehlers bei der Berechnung des Spurengasflusses aus der Bestimmung von CO<sub>2</sub> herrührt.

## 2.7 Statistische Methoden

In dieser Arbeit wurden für die Beurteilung der Messwerte folgende statistische Methoden benutzt:

- der Ausreissertest von Nalimov
- der t-Test für Mittelwerte
- der F-Test für Varianzen.
- die Korrelationsanalyse.

Im Weiteren wird beschrieben, wie diese Methoden verwendet worden sind.

### 2.7.1 Der Ausreissertest von Nalimov

Für die statistische Beurteilung von Daten ist es notwendig, diese von Ausreißern zu säubern. Für diesen Zweck wurde auf den Ausreissertest von Nalimov zurückgegriffen. Dieser Test ist für diese Untersuchungen gut geeignet, da er schon bei geringen Datenmengen sehr scharf ist (Sachs, 1969; 1984; Kaiser & Gottschalk, 1971; Kreyzig, 1979, Miller & Miller, 1984). Man benötigt für diesen Test:

- mindestens 3 Wiederhol- bzw. Vergleichsmessungen
- die Standardabweichung,  $\sigma$
- die Anzahl der Messungen, N

Der Test wird durchgeführt, indem mit dem ausreisserverdächtigen Wert  $x^*$  nach der Gleichung (G17) die Entscheidungsgröße  $r^*$  berechnet wird.

$$r^* = \frac{|x^* - m|}{s} \cdot \sqrt{\frac{N}{N-1}} \quad (\text{G17})$$

wobei

$$m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n$$

$$s = \pm \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m)^2}$$

Die Entscheidung wird gefällt, indem man  $r^*$  mit dem Wert  $r(N, P \%)$ , der eine Funktion von  $N$  und der statistischen Sicherheit  $P \%$  ist, vergleicht und nach dem unten angegebenen Schema interpretiert. Die Tabelle 10 enthält außerdem die für die unterschiedlichen Signifikanzniveaus (wahrscheinlich, signifikant und hochsignifikant) verwendeten statistischen Sicherheiten. Tabellierte Werte von  $r$  enthält z.B Kaiser & Gottschalk, (1971)

Kriterium	Entscheid
$r^* < r(N, 95\%)$	$x^*$ ist kein Ausreisser
$r(N, 95\%) = r^* < r(N, 99\%)$	$\mu_1$ und $\mu_2$ unterscheiden sich wahrscheinlich
$r(N, 99\%) = r^* < r(N, 99,9\%)$	$\mu_1$ und $\mu_2$ unterscheiden sich signifikant
$r^* > r(N, 99,9\%)$	$\mu_1$ und $\mu_2$ unterscheiden sich hochsignifikant

**Tabelle 10: Entscheidungstabelle für den Ausreissertest nach Nalimov in Anlehnung an Kaiser & Gottschalk, (1971)**

Eine Datenreihe ist ausreisserfrei, wenn sie keine signifikanten Ausreisser mehr enthält.

### 2.7.2 Vergleich von Mittelwerten mit dem t-Test

Für die objektive Beurteilung, ob sich zwei Mittelwerte  $\mu_1$  und  $\mu_2$  zweier ausreisserfreier Datengruppen  $X_1$  und  $X_2$  unterscheiden, wird in dieser Arbeit der t-Test verwendet. Man benötigt für diesen Test:

- die Standardabweichungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$
- die Anzahl der Messungen  $N_1$  und  $N_2$
- sowie das Ergebnis des F-Test's

Der Test wird durchgeführt, indem man mit den oben genannten Werten abhängig davon, ob die Varianzen gleich oder ungleich sind, und den entsprechenden, unten stehenden Formeln die Entscheidungsgröße  $\tau$  berechnet.

$s_1 = s_2$	$s_1 \neq s_2$
$t = \left  \frac{m_1 - m_2}{s_D} \right  \cdot \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2}{N_1 + N_2}}$ $s_D = \sqrt{\frac{(N_1 - 1) \cdot s_1^2 + (N_2 - 1) \cdot s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$ $f = N_1 + N_2 - 2$	$t =  m_1 - m_2  \cdot \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2}{N_1 \cdot s_2^2 + N_2 \cdot s_1^2}}$ $f = \frac{(s_1^2 / N_1 + s_2^2 / N_2)^2}{\frac{(s_1^2 / N_1)^2}{N_1 + 1} + \frac{(s_2^2 / N_2)^2}{N_2 + 1}}$

**Tabelle 11: Berechnung der Entscheidungsgröße t in Abhängigkeit der Standardabweichungen Kaiser & Gottschalk, (1971) ; Sachs, (1969).**

Die Entscheidung wird gefällt, indem man  $\tau$  mit dem Wert  $t(f,P\%)$ , der eine Funktion vom Freiheitsgrad und der statistischen Sicherheit P% ist, vergleicht und nach dem unten angegebenen Schema interpretiert. Die Tabelle 12 enthält die verwendeten statistischen Sicherheiten für die unterschiedlichen Signifikanzniveaus wahrscheinlich, signifikant und hochsignifikant. Tabellierte Werte von t enthält z.B. Kaiser & Gottschalk, (1971).

Kriterium	Entscheid
$\tau < t(f, 95\%)$	Kein Unterschied zwischen $\mu_1$ und $\mu_2$ feststellbar
$t(f, 95\%) = \tau < t(f, 99\%)$	$\mu_1$ und $\mu_2$ unterscheiden sich wahrscheinlich
$t(f, 99\%) = \tau < t(f, 99,9\%)$	$\mu_1$ und $\mu_2$ unterscheiden sich signifikant
$\tau > t(f, 99,9\%)$	$\mu_1$ und $\mu_2$ unterscheiden sich hochsignifikant

**Tabelle 12: Entscheidungstabelle für den t-Test in Anlehnung an (Kaiser & Gottschalk, 1971)**

Die Mittelwerte  $\mu_1$  und  $\mu_2$  dürfen aus statistischer Sicht zu einem Gesamtmittelwert zusammengefasst werden, wenn kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Werten festgestellt wird.

### 2.7.3 Vergleich von Varianzen mit dem F-Test

Für die objektive Beurteilung, ob sich die Varianzen  $\sigma_1^2$  und  $\sigma_2^2$  zweier ausreisserfreien Datengruppen  $X_1$  und  $X_2$  unterscheiden wird in dieser Arbeit der F-Test verwendet. Man benötigt für diesen Test:

- die Standardabweichungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$
- die Anzahl der Messungen  $N_1$  und  $N_2$ .

Der Test wird durchgeführt, indem man mit den oben genannten Werten nach der Gleichung (G18) die Entscheidungsgrösse PF berechnet.

$$PF = \left( \frac{s_1^2}{s_2^2} \right)^2 \quad (G18)$$

Wobei die Standardabweichungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  so in die Formel eingesetzt werden müssen, dass  $s_1 > s_2$  immer sichergestellt ist! Die Entscheidung wird gefällt, indem man PF mit dem Wert  $F(f_1, f_2, P\%)$ , der eine Funktion der Freiheitsgrade  $f_1=N_1-1$  und  $f_2=N_2-1$  sowie der statistischen Sicherheit  $P\%$  ist, vergleicht und nach dem unten angegebenen Schema interpretiert. Tabellierte Werte von  $t$  enthält z.B. Kaiser & Gottschalk, (1971).

Kriterium	Entscheid
$PF < F(f_1, f_2, 95\%)$	Kein Unterschied zwischen $\sigma_1$ und $\sigma_2$ feststellbar
$F(f_1, f_2, 95\%) = PF < F(f_1, f_2, 99\%)$	$\sigma_1$ und $\sigma_2$ unterscheiden sich wahrscheinlich
$F(f_1, f_2, 99\%) = PF < F(f_1, f_2, 99,9\%)$	$\sigma_1$ und $\sigma_2$ unterscheiden sich signifikant
$PF > F(f_1, f_2, 99,9\%)$	$\sigma_1$ und $\sigma_2$ unterscheiden sich hochsignifikant

**Tabelle 13: Entscheidungstabelle für den f-Test in Anlehnung an (Kaiser & Gottschalk, 1971)**

Die Mittelwerte  $\mu_1$  und  $\mu_2$  dürfen statistisch zu einem Gesamtmittelwert zusammengefasst werden, wenn kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Varianzen festgestellt wird.

#### 2.7.4 Korrelationsanalyse

Für die Korrelationsanalyse wird grundsätzlich der von Pearson vorgeschlagene Korrelationskoeffizient  $R$  verwendet. Er wird nach Gleichung (G19) berechnet:

$$R = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (x_n - \mathbf{m}_x) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (y_n - \mathbf{m}_y)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (x_n - \mathbf{m}_x)^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (y_n - \mathbf{m}_y)^2}} \quad (\text{G19})$$

$$\text{mit} \quad \mathbf{m}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad \mathbf{m}_y = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n$$

Der Koeffizient gibt die Güte der linearen Abhängigkeit an. Er liegt zwischen -1 und 1. Liegt der Wert von R in der Nähe von 1, ist der Trend linear. Ist er nahe 0, liegt keine lineare Korrelation der Messdaten vor.

**2.7.5 Zusammenfassen von Mittelwerten und Medianwerte**

Mittelwerte  $\mu_0, \mu_1$  und  $\mu_N$  der Datenreihen  $X_0, X_1$  und  $X_N$  lassen sich zu einem resultierenden Mittelwert  $\mu$  nach Gleichung 20 zusammenfassen, wenn dies nach dem t-Test und F-Test für Mittelwerte zulässig ist und die Datenreihen ausreisserfrei sind.

$$m_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x_{0n} \quad m_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{n=0}^{N_1-1} x_{1n} \quad m_N = \frac{1}{N_N} \sum_{n=0}^{N_N-1} x_{Nn}$$

(G20)

$$m = \frac{N_0 \cdot m_0 + N_1 \cdot m_1 + \dots + N_N \cdot m_N}{N_0 + N_1 + \dots + N_N}$$

Ist ein Zusammenfassen der Mittelwerte nicht möglich, wird in den folgenden Untersuchungen der Medianwert anstelle des zusammengefassten Mittelwertes als resultierender Repräsentant aller Mittelwerte der Datenreihen verwendet.

Der Zentralwert oder Medianwert ( $\mu$ ) einer Datenreihe X mit N Elementen ( $x_0 \dots x_{N-1}$ ) wird gebildet, in dem man die einzelnen Werte zunächst der Größe nach ordnet. Der Medianwert ist dann der Wert aus der Mitte der geordneten Datenreihe. Dabei ist nach Tabelle 14 zu berücksichtigen, ob die Anzahl der Elemente der Datenreihe gerade oder ungerade ist.

<i>N...gerade</i>	<i>N...ungerade</i>
$m = \frac{x_{\frac{N}{2}} + x_{\frac{N}{2}+1}}{2}$	$m = x_{\frac{N}{2}+1}$

**Tabelle 14 : Berechnung der Medianwerte einer Datenreihe (Bartsch, 1984; Sachs, 1969)**

### 2.7.6 Nachweis der Vergleichbarkeit von Messreihen

Werden Datenreihen mit unterschiedlichen Systemen gewonnen, ist der Nachweis der Vergleichbarkeit der Messreihen zu führen. Sind Parallelmessungen an Referenzobjekten nicht möglich, sind sog. Ringversuche durchzuführen (Kaiser & Gottschalk, 1971). Für diese Art des Nachweises benötigt man die sog. Vergleichsstandardabweichung  $\sigma_R$ . Mit dieser Vergleichsstandardabweichung wird dann eine Entscheidungsgrösse R unter Verwendung der statistischen Sicherheit P=95% nach Formel (21) gebildet.

$$R = t(95\%) \cdot \sqrt{2} \cdot s_R \quad (\text{G21})$$

Unterscheiden sich die Vergleichsmessungen um weniger als den Wert R, dann gelten beide Vergleichsmessungen als gleichwertig (Kaiser & Gottschalk, 1971).

In dieser Arbeit wurden für den Nachweis der Vergleichbarkeit Parallelmessungen durchgeführt, sodass die der Vollständigkeit halber angeführten sog. Ringversuche entfallen konnten.

### 3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum COS-Austausch an *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L., die mit den zwei unterschiedlichen Analysesystemen "ARGON" und "SUGAR" gewonnen wurden, präsentiert. Da die zu messenden Konzentrationen insbesondere von COS sehr gering sind, ist die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen eine Grundvoraussetzung für die Übertragbarkeit und Verallgemeinerung der Resultate. Deshalb wird zunächst anhand von Vergleichsmessungen die Gleichwertigkeit der mit beiden Systemen erzielten Ergebnisse nachgewiesen.

Die Lichtabhängigkeit der COS-Aufnahme wird als Indiz dafür angesehen, dass COS auf denselben Wegen wie CO<sub>2</sub> aufgenommen wird (Goldan et al., 1988; Kluczewski et al., 1987; Kesselmeier & Merk 1993; Kesselmeier et al., 1993; Protoschill-Krebs et al., 1996; Huber, 1994; Kuhn, 1997). Dieses Kapitel präsentiert erstmals an *Quercus ilex* L. kontinuierlich aufgezeichnete Tagesgänge des COS-Spurengasflusses, die die stomatäre Aufnahme von COS belegen.

Im Hauptteil werden die Ergebnisse der verschiedenen Messkampagnen der Jahre 1998, 1999 und 2000 mit den beiden Spezies *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter verschiedenen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen strukturiert präsentiert und zusammengefasst.

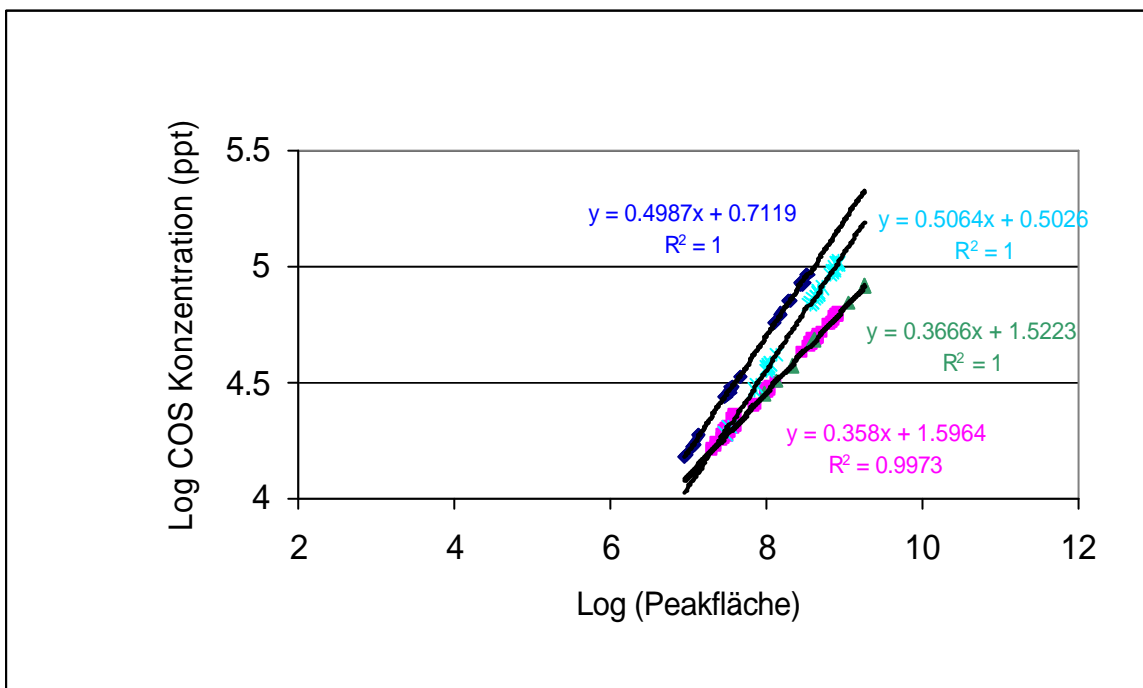
Die experimentellen Ergebnisse zum enzymatischen Hintergrund des COS-Austausches bilden den Abschluss dieses Kapitels und komplettieren das Fundament für die Diskussion, Interpretation und Prognose zur Auswirkung einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf den COS-Austausch von höheren Pflanzen.

Die präsentierten Ergebnisse sind später sowohl Basis einer Präzisierung der Abschätzung der aktuellen globalen COS-Senkenstärke der Vegetation als auch einer Prognose zu deren Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten.

### 3.1 Vergleichbarkeit der verwendeten COS-Messmethoden

Für die Messungen, der im ppt-Bereich liegenden atmosphärischen COS-Konzentrationen, wurden die zwei unterschiedlichen, im Kapitel 2.4.5 vorgestellten, COS-Messsysteme "ARGON" und "SUGAR" verwendet.

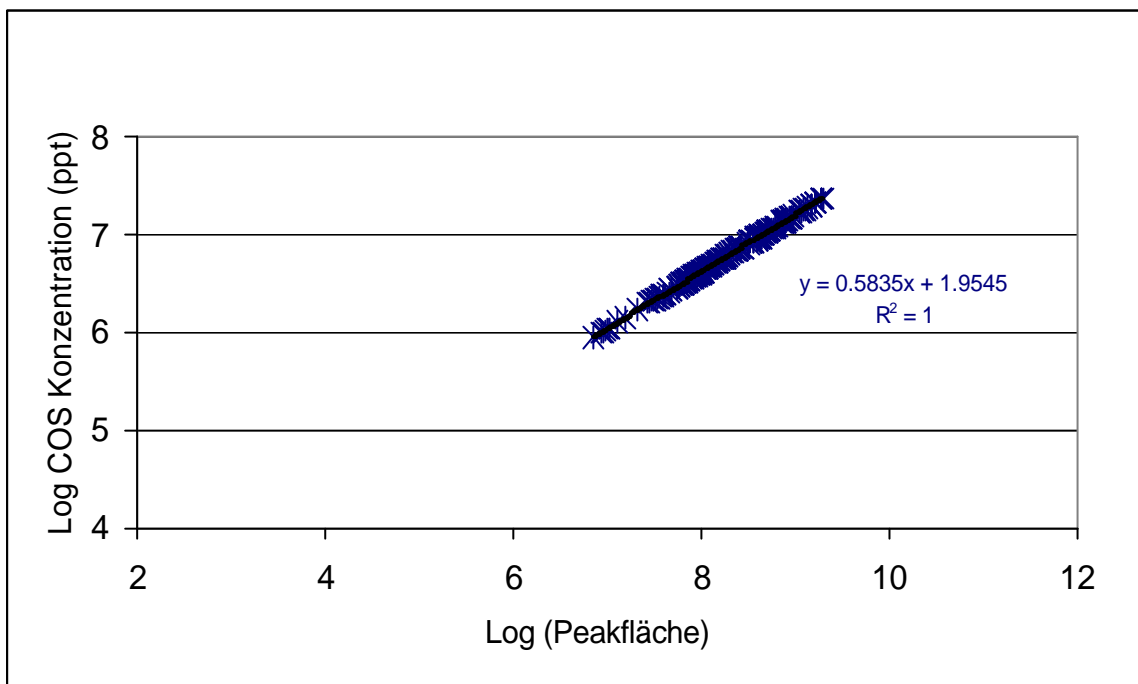
Die Absolutwerte der COS-Konzentrationen in Referenz- und Messküvette werden über die im Kapitel 2.4.7 behandelte Kalibrationsgerade für den FP-Detektor, aus den entsprechenden Flächen des sog. "COS-Peaks" ermittelt. Diese Kalibrationsgerade muss in regelmässigen Abständen mit Eichschleifen, aufgrund systeminterner Parameterdriften neu aufgenommen werden. Die Abbildung 30 stellt die im Zeitraum vom 28.10.1999 bis zum 1.11.1999 aufgenommenen Kalibrationsgeraden für die COS-Bestimmung des halbautomatisierten COS-Messsystems "ARGON" dar.



**Abbildung 30: Kalibrationsgeraden für den FP-Detektor des halbautomatisierten COS-Messsystemes "ARGON" im Zeitraum vom 28.10.1999 bis zum 1.11.1999**

Die unterschiedliche Lage der Kalibrationsgeraden belegt die Drift der Regressionsparameter der Kalibrationsgeraden und somit die Notwendigkeit einer regelmässigen Kalibration. Im Untersuchungszeitraum war es ausreichend, das System "ARGON" täglich zu kalibrieren.

Auch beim vollautomatischen System "SUGAR" wurde täglich die Kalibrationsgerade für den FP-Detektor aufgenommen. Die Abbildung 31 fasst alle Kalibrationsgeraden des vollautomatischen Systems vom 17.1.2000 bis 8.2.2000 zusammen.

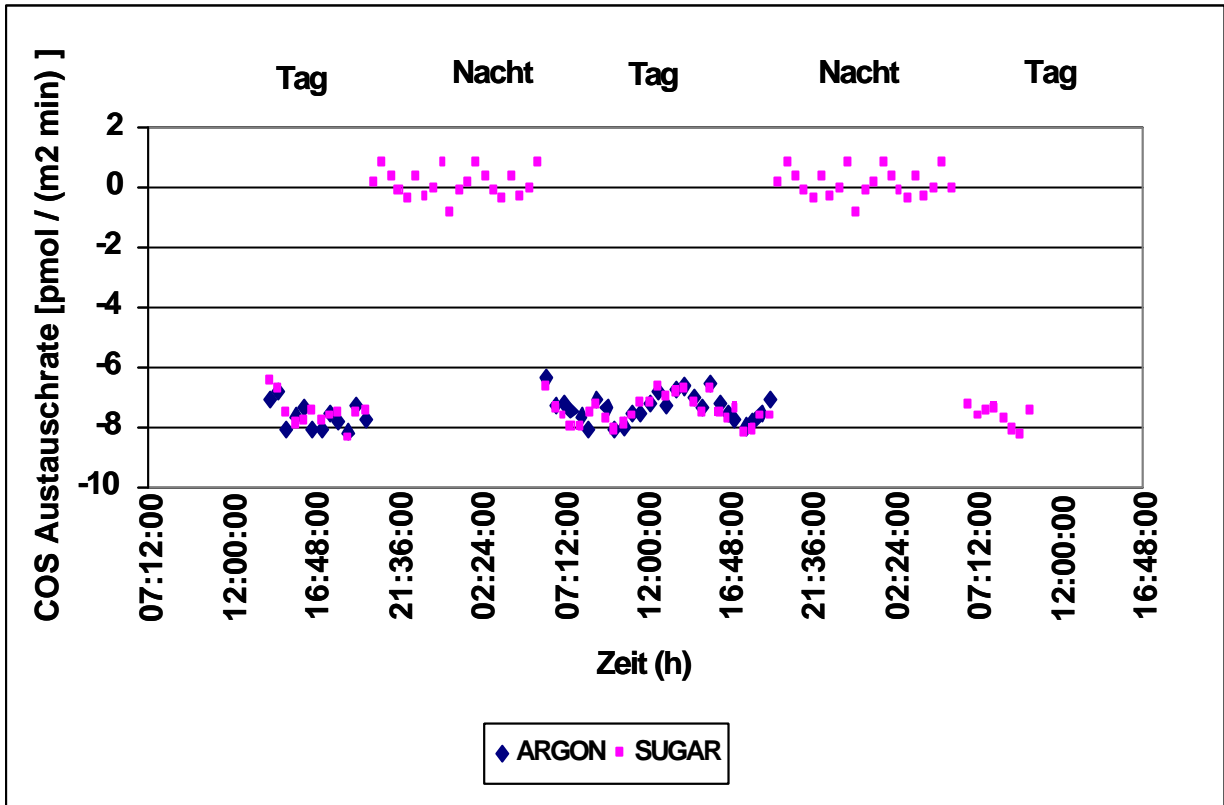


**Abbildung 31: Kalibrationsgerade für den FP-Detektor des vollautomatisierten COS-Messsystemes "SUGAR" im Zeitraum vom 17.1.2000 bis zum 8.2.2000**

Die Streuung der einzelnen Kalibrationspunkte ist bei dem vollautomatischen System "SUGAR" geringer als beim halbautomatischen System "ARGON". Unterschiede zwischen den im Zeitraum aufgenommenen Kalibrationsgeraden sind verglichen zur Nachweisgrenze für COS vernachlässigbar. Der Korrelationskoeffizient der resultierenden Kalibrationsgeraden ist 1.

Für den Zweck des Nachweises der Vergleichbarkeit der mit den beiden Messsystemen "ARGON" und "SUGAR" gemessenen COS-Austauschraten wurden kontinuierliche

Parallelmessungen an den beiden Bäumen durchgeführt. Die Abbildung 32 stellt exemplarisch die Ergebnisse einer Parallelmessung der COS-Austauschrate an *Fagus sylvatica L.* mit den beiden Messsystemen "ARGON" und "SUGAR" dar.



**Abbildung 32: COS-Austauschraten in pmol/(s m<sup>2</sup>) die mit dem halbautomatischen COS-Messsystem ARGON und dem vollautomatischen Messsystem SUGAR aufgenommen wurden**

Die Abbildung 32 dokumentiert zunächst qualitativ die Vergleichbarkeit der mit beiden Systemen gewonnenen COS-Austauschraten unter stationären Bedingungen. Die Mittelwerte und Streuungen der COS-Messungen der beiden Systeme liegen am Tag<sup>1</sup> im selben Bereich und unterscheiden sich nach dem f- und t-Test statistisch nicht voneinander.

Die in der Nacht gemessenen COS-Konzentrationen liegen im Bereich um den Nullpunkt. Die Ursache für das rauschartige Oszillieren der COS-Austauschrate in der Nacht um den Nullpunkt, was bei leeren Küvetten nicht mit dieser Intensität beobachtet wurde, liegt

<sup>1</sup> In der Nacht wurde nur mit dem System "SUGAR" gemessen.

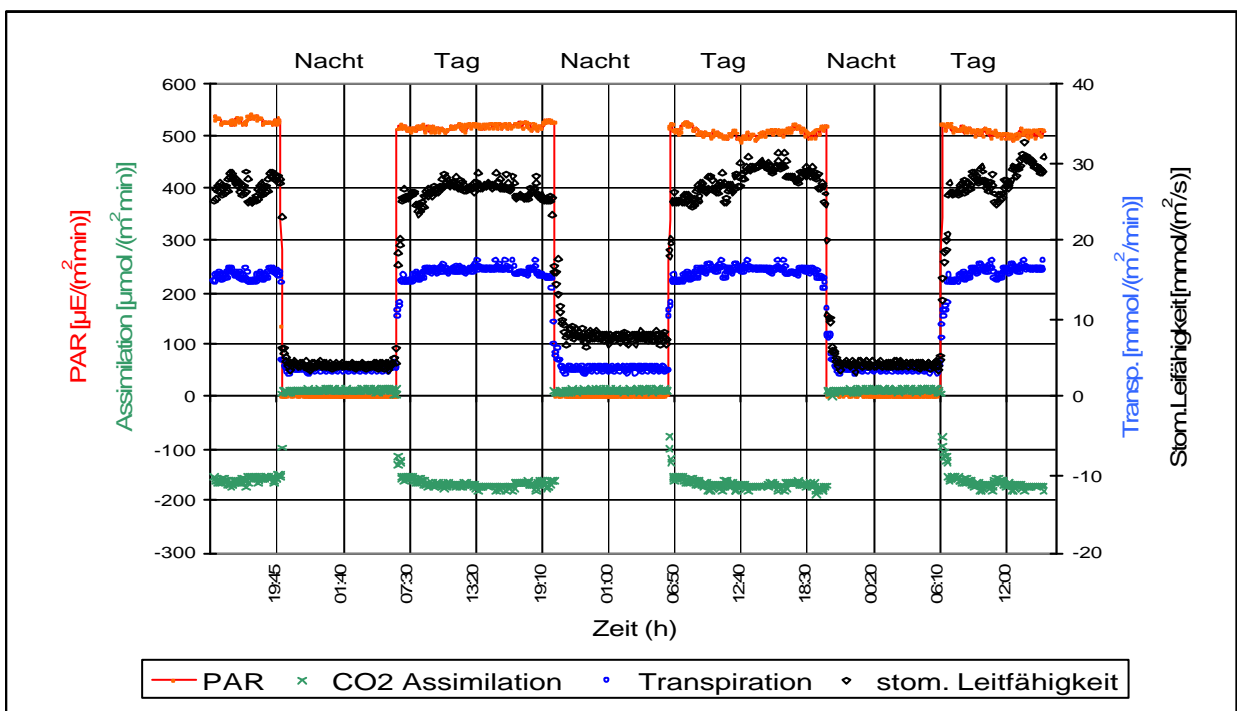
wahrscheinlich in pflanzlichen Depositionsprozessen, die nicht stomatär reguliert sind, begründet. Um detailliertere Aussagen zu gewinnen, muss die Nachweisgrenze der COS-Messungen deutlich verringert werden.

Die Vergleichsmessung demonstriert, dass das System "SUGAR" trotz sequentieller Probenentnahme für Messungen mit Küvettentchnik unter stationären Bedingungen mit den o.g. Restriktionen bei Zustandsänderungen einsetzbar ist. Wegen der höheren Stabilität der Kalibration und der einfacheren Handhabung, wurden weiteren Messungen nur noch mit diesem System durchgeführt.



Es ist deutlich zu sehen, dass ab ca. 6:00 Uhr bei Einschalten der Beleuchtung die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Messküvette, in der der Ast des untersuchten Baumes eingeschlossen ist, um ca. 100 ppt gegenüber der leeren Referenzküvette abfällt d.h. die in der Küvette eingeschlossenen Pflanzenteile nehmen CO<sub>2</sub> auf. Nach Abschalten der Beleuchtung gegen 20:00 Uhr stellte sich dann in der Nacht sehr schnell in Referenz- und Messküvette wieder ein nahezu gleicher Wert der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ein. Die in der Küvette eingeschlossenen Pflanzenteile nehmen kein CO<sub>2</sub> mehr auf.

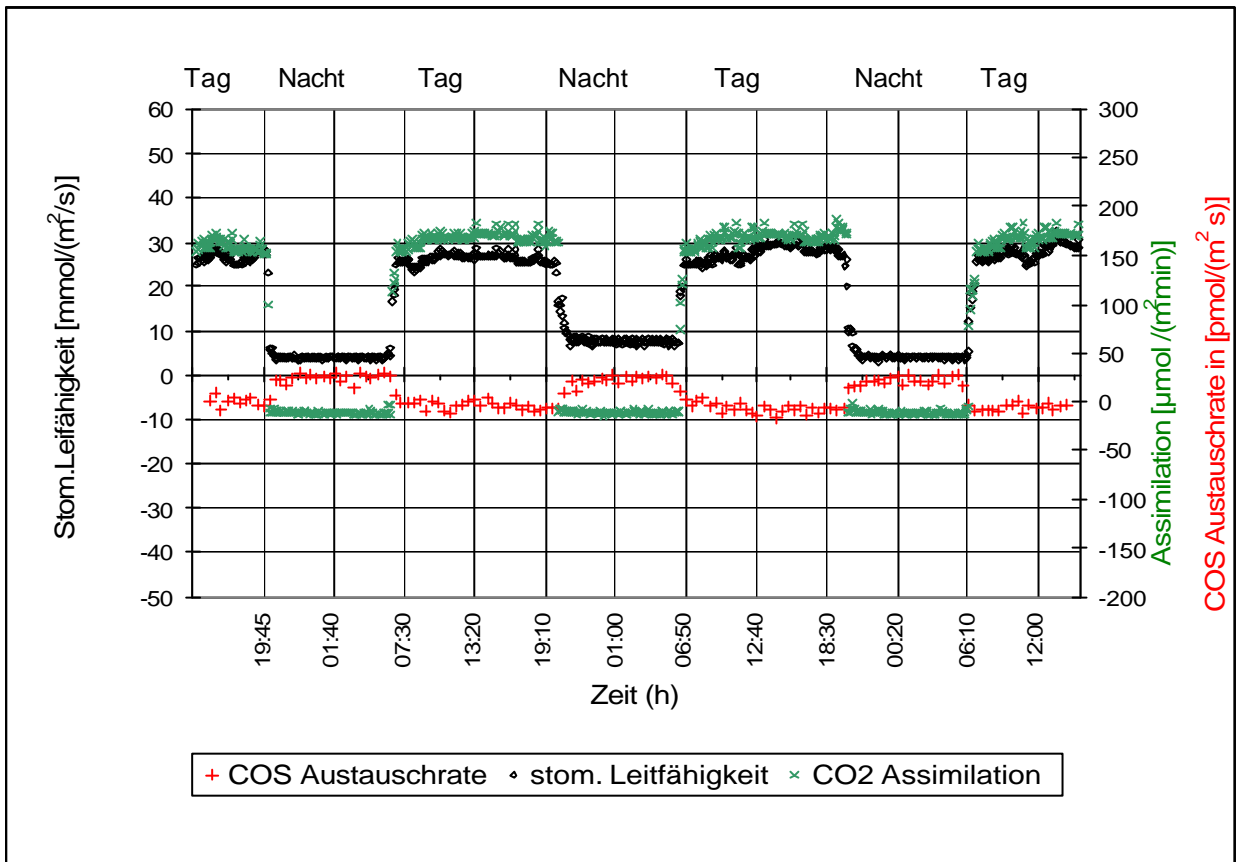
In Abbildung 34 sind die während des gleichen Zeitraumes aufgezeichneten Tagesgänge der physiologischen Parameter CO<sub>2</sub>-Assimilation, Transpiration, Lichtintensität und stomatäre Leitfähigkeit des ausgewählten intakten Astes unter normalen Umgebungsbedingungen dargestellt. Diese sind ebenfalls repräsentativ, und zeigen das typische Verhalten der ausgewählten Spezies.



**Abbildung 34: Photosynthetische aktiv strahlung (PAR) , der CO<sub>2</sub> Assimilationsrate und der Transpirationrate bei *Fagus sylvatica* L., 29. Oktober bis zum 1. November 1999**

Zur Darstellung 34 ist anzumerken, dass die als Referenz dienende Assimilationsrate im Diagramm 33 aus Gründen der Sichtbarkeit, negativ, d.h. nach Multiplikation mit -1, dargestellt wurde.

Die Abbildung 35 stellt die streng mit der Lichtintensität korrelierte CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate, die COS-Austauschrate und die stomatäre Leitfähigkeit dar.



**Abbildung 35: Kontinuierlich gemessene Verläufe des COS-Austausches, der Assimilationsrat und stomatären Leitfähigkeit bei *Fagus sylvatica* L., 29. Oktober bis zum 1. November 1999**

Die aufgezeichneten Tagesgänge zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Assimilations-, die Transpirations- und die COS-Austauschrate, sowie auch die stomatäre Leitfähigkeit streng mit dem Ein- und Ausschalten der Lichtquelle korreliert sind.

Die in den Abbildung 35 zu sehende Korrelation der COS-Aufnahme mit der Lichteinstrahlung wurde ebenfalls bereits in anderen Arbeiten festgestellt (Lamb et al., 1987; Gunther, 1989; Kesselmeier & Merk, 1993; Kesselmeier et al., 1993; Hoffmann, 1993; Huber, 1994; Kuhn, 1997). Dieser Zusammenhang wird als ein Beleg für die Hypothese angesehen, dass COS auf den gleichen Wegen wie CO<sub>2</sub>, also über die Stomata, aufgenommen wird (Goldan et al., 1988; Kluczewski et al., 1987; Kesselmeier & Merk, 1993; Huber, 1994;

Kuhn, (1997). Diese Hypothese gilt nur wenn das verantwortliche Enzym Licht unabhängig ist. Wie schon die Arbeiten von Protoschill-Krebs (1991); Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1992 und Protoschill-Krebs et al. 1996 belegen.

Zur qualitativen Auswertung der Prozesse werden nachfolgend die Mittelwerte der Verläufe der Gasaustauschparameter am Tag und in der Nacht tabellarisch zusammengefasst.

	Nacht	Tag
$A_{CO_2}$ in mmol/(m <sup>2</sup> min)	12	-164
$S_{CO_2}$ in mmol/(m <sup>2</sup> min)	2	10
$T_{H_2O}$ in mmol/(m <sup>2</sup> min)	4	15
$S_{H_2O}$ in mmol/(m <sup>2</sup> min)	0,9	0,6
$g_s$ in mol/(m <sup>2</sup> s)	0,006	0,027
$S_{gs}$ in mol/(m <sup>2</sup> s)	0,002	0,002
$F_{COS}$ in pmol/(s m <sup>2</sup> )	nicht detektierbar	-7
$S_{COS}$ in pmol/(s m <sup>2</sup> )	-	1

**Tabelle 14: Parameter der Gasaustausches von *Fagus sylvatica* L. 3, Verlauf vom 29.Oktober bis zum 1 November 1999**

Das in den vorangegangenen Abbildungen zu beobachtende typische Verhalten der Pflanzen unter normalen Umweltbedingungen kann wie folgt zusammengefasst werden: Die in der Tabelle (14) angegebenen Grössen, Assimilationsrate, Transpirationsrate, stomatare Leitfähigkeit der Blätter sowie die COS-Austauschrate stiegen parallel zur Lichtintensität, die bei Einschalten der Beleuchtung sprunghaft ca. 600  $\mu E/(m^2 s)$  erreichte und während des Tages etwa konstant blieb, auf die oben tabellierten Tagesmittelwerte an. In der Nacht fielen die Grössen mit Abschalten des Lichtes auf die entsprechenden tabellierten Werte. In der Nacht lagen die Werte des COS-Konzentration von Referenz- und Messküvette so nah beieinander, dass die Differenz zwischen Referenz- und Messküvette im Fehlerbereich der Messmethode lag. In diesem Fall wurde die Grösse  $F_{COS}$  als nicht detektierbar bezeichnet. In der Nacht konnte bei diesen Randbedingungen also kein signifikanter COS-Austausch festgestellt werden. Da das Enzym CA prinzipiell lichtunabhängig ist muss die stomatare

leitfähigkeit die grundsätzliche Regulation darstellen. Die stomatäre Leitfähigkeit ist also streng mit der CO<sub>2</sub>-Assimilation und dem COS-Austausch gekoppelt.

### 3.3 Nachweis der stomatären Regulation des COS-Austausches

Zur weiteren Vertiefung der Kenntnisse über den Mechanismus der COS-Aufnahme von höheren Pflanzen werden im Folgenden die Resultate des in Kapitel 2.5.3 vorgestellten Experiments beschrieben.

Für das Verständnis der COS-Austauschprozesse höherer Pflanzen werden in diesem Zusammenhang folgende Punkte analysiert:

- Physiologie bei Versorgung abgeschnittener Äste durch Nährlösung
- Physiologie bei Versorgung durch Nährlösung, die mit Abscisinsäure versetzt war.

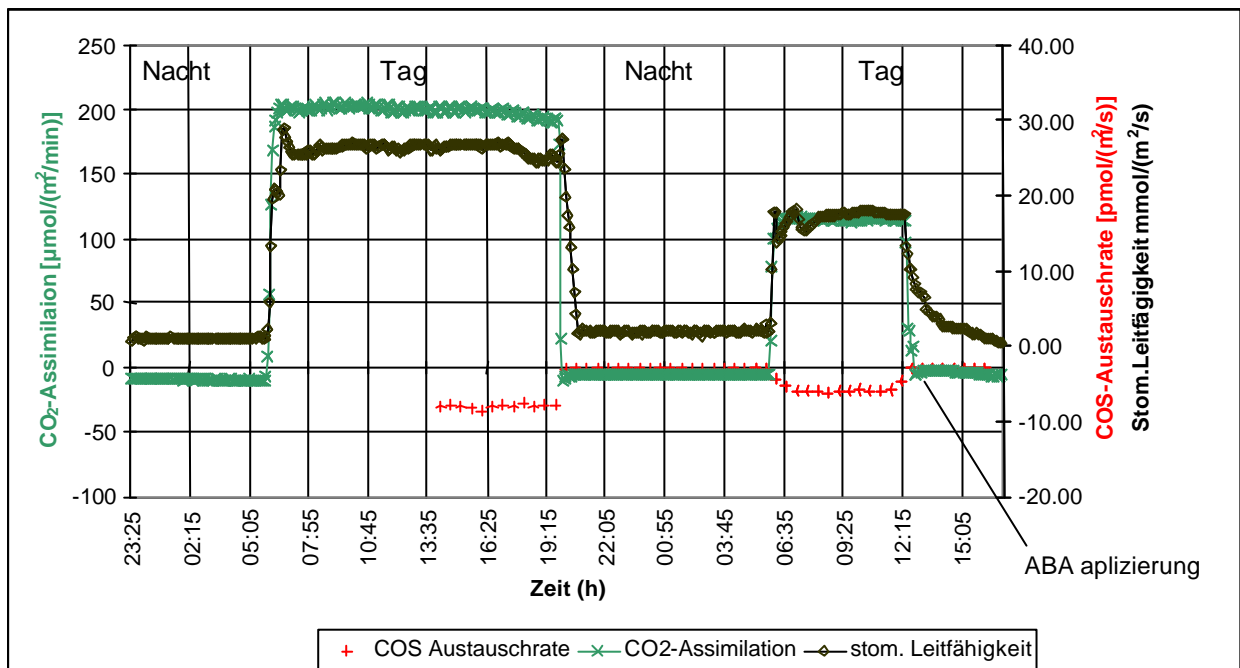
Dabei wurden wie bereits erwähnt, die Stomata der Pflanzen mit Hilfe des Phytohormons Abscisinsäure (ABA) am Tage bei voller Lichteinstrahlung und ansonsten gleich bleibenden Bedingungen geschlossen. Es wird erwartet, dass sowohl der CO<sub>2</sub>-Austausch als auch der COS-Austausch auf Werte um Null zurückgehen, da bei verschlossenen Stomata kein Gasaustausch erfolgen kann.

Die Experimente wurden an zwei Individuen der Spezies *Quercus ilex* L. unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration (ca. 350 ppm CO<sub>2</sub>) durchgeführt. Die Bäume wurden in die Klimakammer zur Akklimation gebracht und nach Abwischen des Versuchsstammes mit deionisiertem Wasser in die Messküvette eingespannt. In den folgenden 24 Stunden wurden der COS-Austausch und die physiologischen Parameter kontinuierlich gemessen. Die Lichtintensität (photosynthetisch-aktive Strahlung, PAR) während des Experiments betrug ca. 600 μE/(m<sup>2</sup> s) und die Temperatur ca. 25 °C ± 2 °C. Der COS-Austausch und die physiologischen Parameter wurden parallel aufgezeichnet.

Das Experiment "Applizierung des Phytohormons Abscisinsäure an *Quercus ilex* L." wurde wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben im Zeitraum vom 16. bis 18. Juli 2000 an *Quercus ilex* L. durchgeführt und vom 19. bis zum 21. August 2000 wiederholt.

Der Versuchsaast von *Quercus ilex L.* wurde in die Küvette eingespannt und später am 16. Juli 2000 in der Nährlösung abgeschnitten. Die physiologischen Parameter wurden ab dem 16. Juli ab ca 21:00 Uhr aufgezeichnet. Ab 17. Juli um 12:45 Uhr wurde der Austausch von COS aufgezeichnet. Am 18. Juli um 10:35 Uhr wurde der Versuchsaast in ABA-Nährlösung eingetaucht, d.h. die Stomata wurden mittels ABA geschlossen.

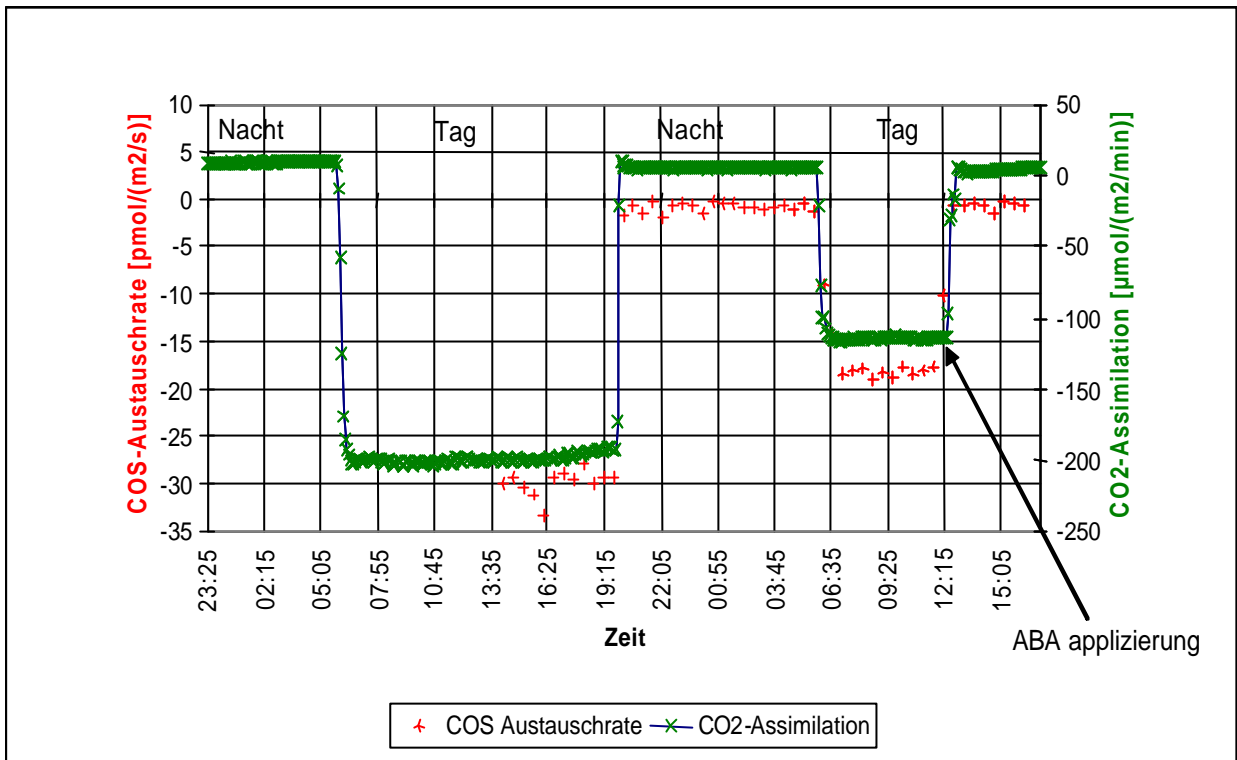
Die Abbildung 36 stellt die Messergebnisse der Laboruntersuchungen, den COS-Austausch, die CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate und die stomatäre Leitfähigkeit dar.



**Abbildung 36: Verlauf von COS-Austausch und CO<sub>2</sub>-Assimilation von *Quercus ilex L.* während des Experimentes mit Abscisinsäure.**

Aus der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass nach Verschluss der Stomata durch das Phytohormon Abscisinsäure sowohl die CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate als auch die COS-Austauschrate abrupt auf Werte um Null fallen. Das verzögerte Abfallen der stomatären Leitfähigkeit hatte im speziellen Fall hauptsächlich messtechnische Ursachen, die mit der Bestimmung des Wasserdampfesgehaltes im Zusammenhang steht (verzögert einsetzende Kondensation).

Die Abbildung 37 stellt die Korrelation zwischen die CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate und den COS-Austauschrate aussagekräftiger dar.



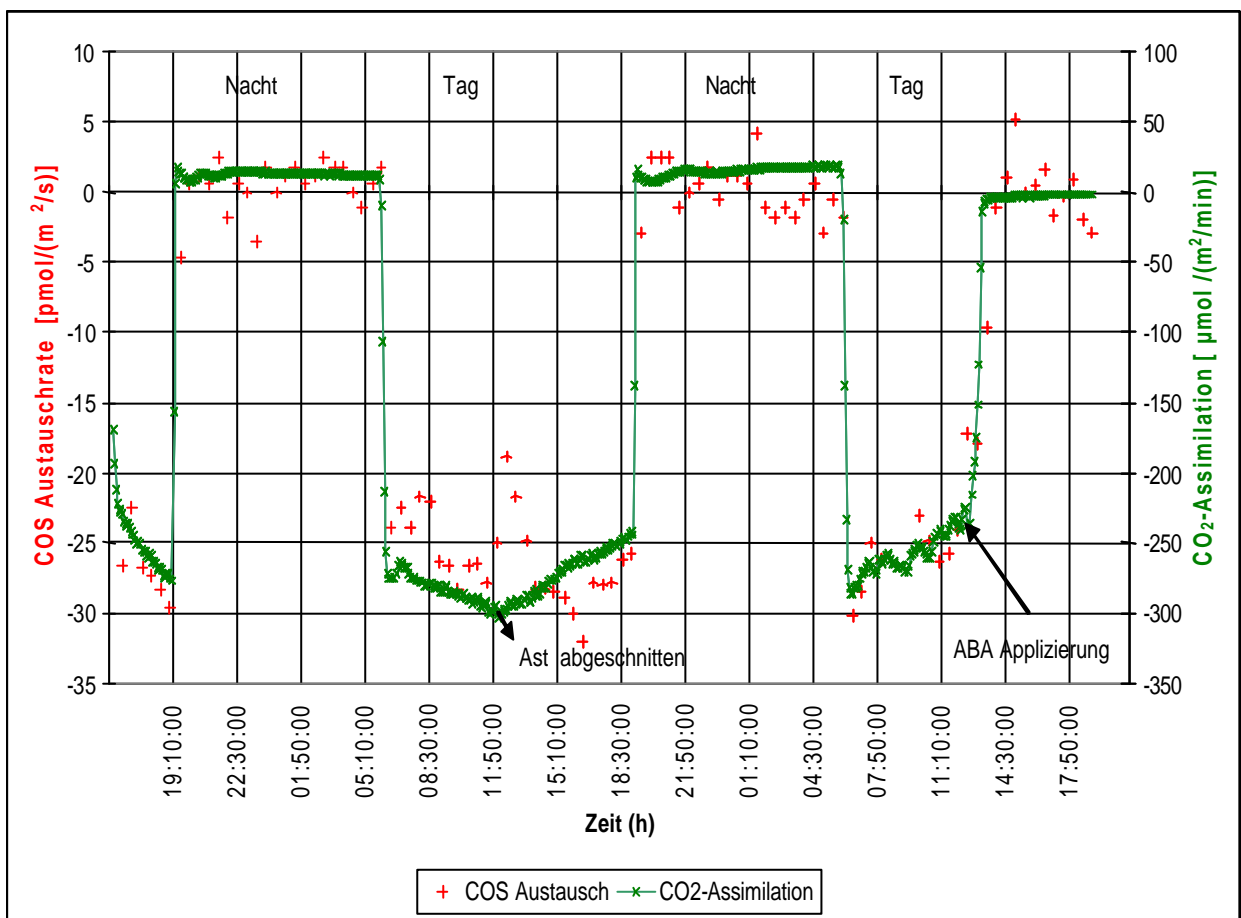
**Abbildung 37: Verlauf von COS-Austausch und CO<sub>2</sub>-Assimilation von *Quercus ilex* L. während des Experimentes mit Abscisinsäure**

Kurze Zeit nach Applizierung von Abscisinsäure (ABA), am 19. Juli 2000 um 10:35 Uhr, sinken die Werte der CO<sub>2</sub>-Assimilation und des COS-Austausches bei voller Lichteinstrahlung und gleich bleibender Nährstoffsituation auf Werte um Null ab. Dieses Resultat liefert eine weitere Bestätigung der Hypothese, dass COS ebenso wie CO<sub>2</sub> über die Stomata aufgenommen wird. Auf das Abschneiden und Versetzen in eine Nährlösung reagiert der Ast bei diesem Experiment mit einer Reduktion der physiologischen Aktivität und was in einer Absenkung der CO<sub>2</sub>-Assimilation und COS-Aufnahme seinen Ausdruck findet.

Einer Zweite Versuchsast von *Quercus ilex* L. wurde am 19. August 2000 um ca 16:00 Uhr in die Küvette eingespannt. Im Unterschied zum ersten Experimenten wurden der COS-Austausch und die physiologischen Parametern bereits nach dem Einspannen, d.h. vor dem Abschneiden des Astes aufgezeichnet. Diese Aufzeichnungen ermöglichen den Vergleich des COS-Austauschs des intakten und des abgeschnitten Astes in Nährlösung. Es ist sichtbar, dass der Ast nach dem Abschneiden mit einem Einbruch des COS-Aufnahme reagiert. (Der

eingespannte Versuchsstange wurde am 20. August um circa 12:30 Uhr nach der bereits in Kapitel 2 beschriebenen Methode in Nährlösung abgeschnitten.) Am dritten Tag den 21. August wurde der Versuchsstange um ca. 13:05 Uhr mit Abscisinsäure behandelt.

Die Abbildung 38 stellt den COS-Austausch angegeben in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{s})$  sowie Assimilation in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$  des mit Abscisinsäure behandelten Versuchsstanges von *Quercus ilex* L. dar.



**Abbildung 38:** Verläufe der COS-Austauschrate in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{s})$ , und Assimilationsrate in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{min})$  bei *Quercus ilex* L. während des Experimentes mit Abscisinsäure (ABA), Verlauf vom 19 bis zum 21 August 2000

Bemerkenswert an diesem Experiment ist, dass zu Beginn des Experimentes der abgeschnittene Ast von *Quercus ilex* L. in der Nährlösung das gleiche Verhalten wie der noch intakte Ast vor dem Abschneiden zeigt. Ab dem Moment des Abschneidens um ca. 12:30 Uhr reagiert der Ast mit einer kurzzeitigen Verringerung der COS-Austauschrate.

Die COS-Aufnahme korreliert an den beiden ersten Tagen wie bereits oben festgestellt, mit der Lichteinstrahlung. Der Ast nimmt während der Lichtperiode COS auf. Am letzten Tag werden durch die Applizierung von Abscisinsäure die Stomata gegen 13:05 Uhr geschlossen. Kurz darauf stellt der Ast die COS-Aufnahme ein. In Referenz- und Messküvette werden dann die gleichen COS-Konzentrationen gemessen. Die  $\text{CO}_2$ -Assimilation und die COS Austauschrate sind nach 13:05 Uhr bei voller Lichtintensität bei ansonsten gleich bleibenden Bedingungen auf den Wert Null gefallen.

Eine detailliertere Analyse der physiologischen Parameter  $\text{CO}_2$ -Assimilation und Transpiration bestätigt die erwartete Korrelation mit der  $\text{CO}_2$ -Assimilation und der Transpiration. Es ist deutlich zu sehen, dass sich bei voller Lichteinstrahlung nach der Applizierung von Abscisinsäure die COS-Aufnahme synchron zur  $\text{CO}_2$ -Assimilation ändert. Der Ast nimmt nach einigen Minuten weder  $\text{CO}_2$  noch COS auf.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass die experimentellen Resultate belegen, dass die COS-Austauschprozesse bei höheren Pflanzen ohne Zweifel stomatär reguliert sind.

### 3.4 Einfluss der COS-Umgebungskonzentration auf den COS-Austausch

Die COS-Konzentration in den unteren Regionen der Troposphäre ändert sich im Bereich von 370 ppt bis 800 ppt (Cox & Sheppard, 1980; Mihalopoulos, 1991; Chin & Davis, 1993; Chin & Davis, 1995; Xu, 2000) und kann einen starken Tagesgang zeigen Kuhn et al., (1999). Deshalb wird in diesem Abschnitt anhand exemplarischer aber repräsentativer Messergebnisse analysiert, welchen Einfluss die COS-Umgebungskonzentration auf den COS-Austausch unter beiden CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen bei den beiden Spezies *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. hat und wie dieser Zusammenhang vereinfacht approximiert werden kann. Die in diesem Kapitel eingeführten Parameter für die mathematische Approximation der Zusammenhänge werden im folgenden Abschnitt für die quantitative Analyse weiterverwendet. Dies ist notwendig, da sich im Untersuchungszeitraum auch unter den Laborbedingungen die COS-Umgebungskonzentration innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite änderte.

Versuchsergebnisse an *Fagus sylvatica* L.:

Die Abbildung 39 stellt die nach Formel 3 berechneten Werte für den COS-Spurenfluss, versus COS-Umgebungskonzentration unter 350ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration dar.

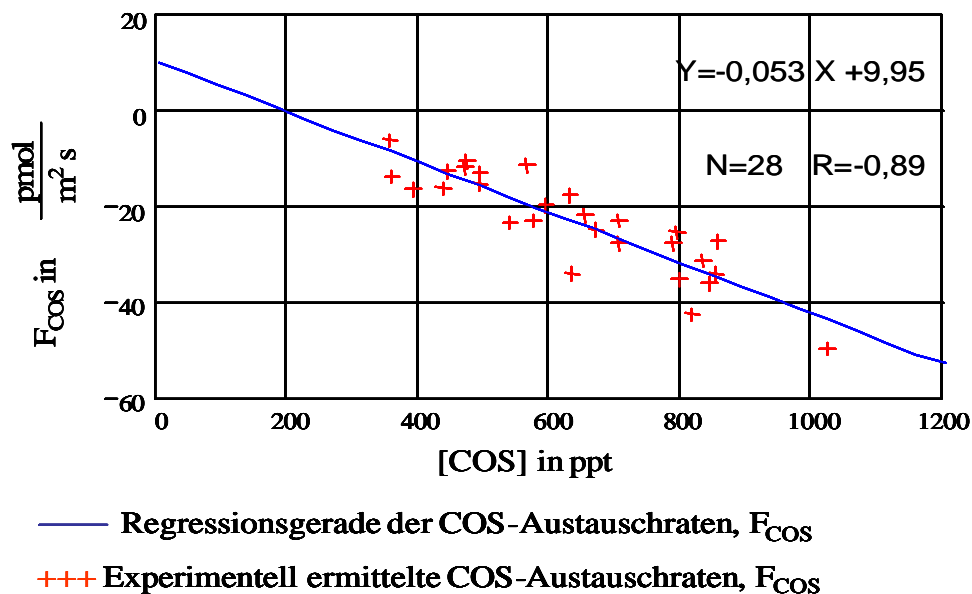
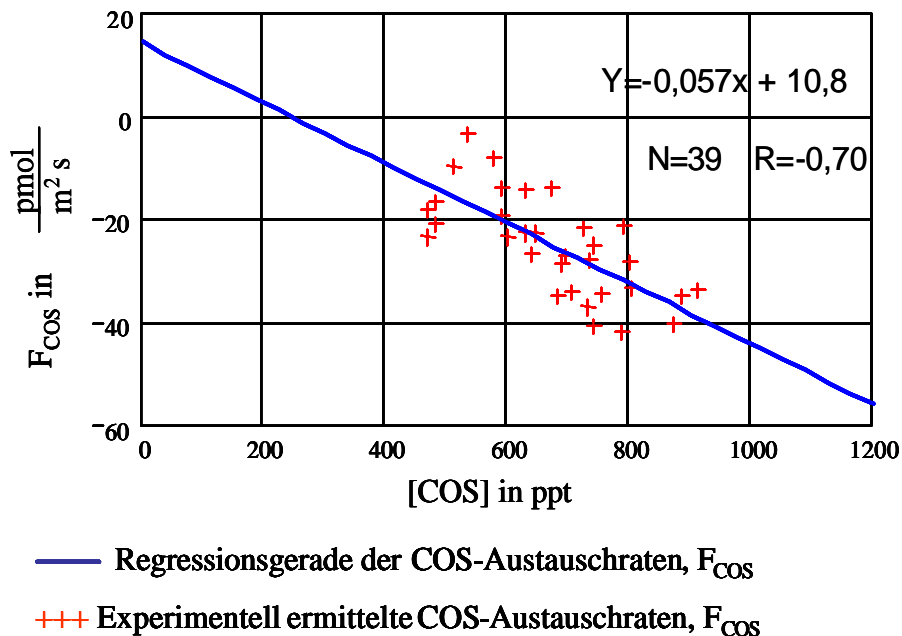


Abbildung 39: COS-Austausch ( $F_{\text{COS}}$ ), versus COS-Umgebungskonzentration bei *Fagus sylvatica* L. 1 während der Messreihe Sommer 1999 bei  $[\text{CO}_2]=350$  ppm

Die betragsmässige Zunahme der COS-Austauschrate bei steigender der COS-Umgebungskonzentration lässt sich in untersuchten Messbereich durch eine Gerade annähern. Die lineare Approximation durch eine Gerade ist statistisch begründet, da der Betrag des Korrelationskoeffizienten ( $R = -0,89$ ) nahe bei 1 liegt. Die Messung deckt einen Bereich der COS-Umgebungskonzentration von ca. 350 ppt bis ca. 1000 ppt ab.

Die Abbildung 40 stellt die nach Formel 3 berechneten Werte für den COS Spurengasfluss,  $F_{\text{COS}}$ , in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  versus COS-Umgebungskonzentration,  $c_{\text{COS}}$ , in ppt von *Fagus sylvatica* L. 4 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration im Jahr 1999 dar.



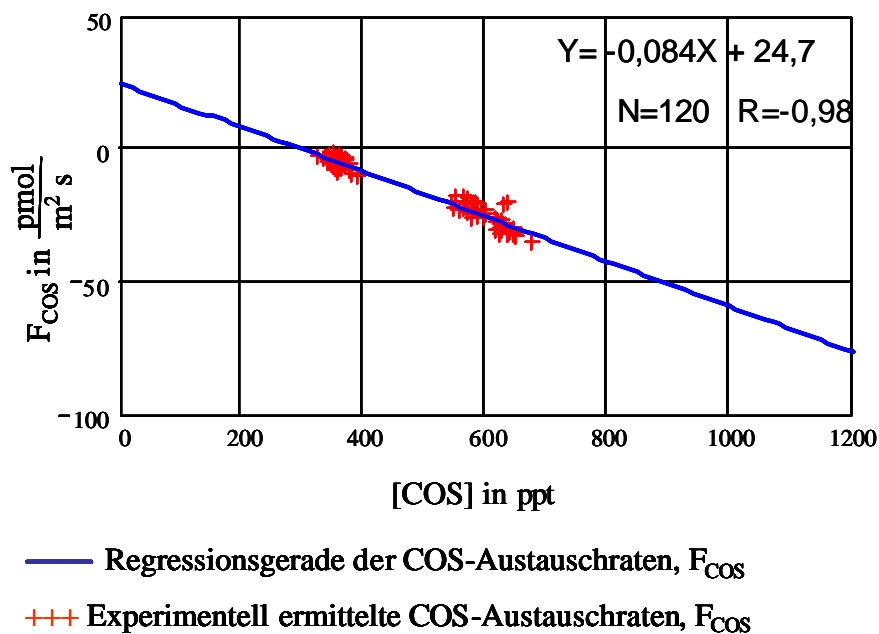
**Abbildung 40: COS-Austausch, ( $F_{\text{COS}}$ ), versus COS-Umgebungskonzentration bei *Fagus sylvatica* L. 4 während der Messreihe Sommer 1999 bei  $[\text{CO}_2]=800 \text{ ppm}$**

Wie bei *Fagus sylvatica* L.1 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, zeigen die Ergebnisse an *Fagus sylvatica* L. 4 unter erhöhter  $\text{CO}_2$  Umgebungskonzentration auch eine betragsmässige Zunahme des COS-Austausches bei steigender COS-Umgebungskonzentration. Die Messung deckt einen Bereich der COS-Umgebungskonzentration von ca. 450 ppt bis ca. 900 ppt ab. Der Korrelationskoeffizient ( $R$ ) beträgt  $-0,70$ ; was ebenfalls eine lineare Approximation durch eine Gerade nahe legt.

Die Ergebnisse an *Fagus sylvatica* L. wurden mit Hilfe des Messsystems "ARGON" gewonnen. Bei beiden CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen ist qualitativ der gleiche deterministische Zusammenhang zwischen der COS-Umgebungskonzentration und der COS-Austauschrate sichtbar: bei zunehmender COS-Umgebungskonzentration steigt der Betrag der COS-Austauschrate.

Versuchsergebnisse an *Quercus ilex* L.:

Die Abbildung 41 stellt die nach Formel 3 berechneten Werte für den COS Spurengasfluss  $F_{\text{COS}}$  in pmol/(m<sup>2</sup> s) versus COS-Umgebungskonzentration  $c_{\text{COS}}$  in ppt von *Quercus ilex* L. 2 bei 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration im Jahr 2000 dar.

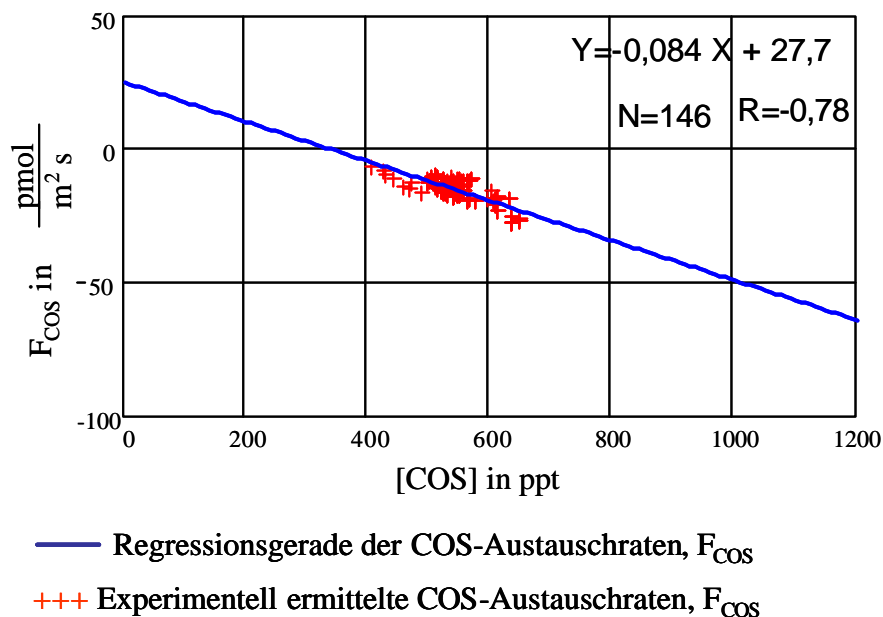


**Abbildung 41: COS-Austausch,  $F_{\text{COS}}$ , versus COS-Umgebungskonzentration bei *Quercus ilex* L. 2 während der Messreihe 2000 bei [CO<sub>2</sub>]=350 ppm**

Wie bei *Fagus sylvatica* L. unter 350 ppm und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, zeigen die Ergebnisse an *Quercus ilex* L. 2 unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration eine betragsmäßige Zunahme des COS-Austausches bei Ansteigen der COS-Umgebungskonzentration. Der Betrag des Korrelationskoeffizienten, R, von 0,98, legt

ebenfalls eine lineare Approximation nahe. Die Messung deckt einen Bereich der COS-Umgebungskonzentration von ca. 300 ppt bis ca. 700 ppt ab.

Die Abbildung 42 stellt die nach Formel (3) berechneten Werte für den COS Spurengasfluss,  $F_{\text{COS}}$ , in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  versus COS-Umgebungskonzentration,  $c_{\text{COS}}$ , in ppt von *Quercus ilex* L. 6 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$  Umgebungskonzentration im Jahr 2000 dar.



**Abbildung 42: COS-Austausch,  $F_{\text{COS}}$ , versus COS-Umgebungskonzentration bei *Quercus ilex* L. 6 während der Messreihe 2000 bei  $[\text{CO}_2]=800$  ppm**

Wie bei vorangegangenen Abbildungen, zeigen die Ergebnisse an *Quercus ilex* L. 2 unter normaler  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration ebenfalls eine betragsmässige Zunahme des COS-Austausches bei Erhöhung der COS-Umgebungskonzentration. Der Korrelationskoeffizient,  $R$ , von -0.78, legt ebenfalls eine lineare Approximation nahe. Die Messung deckt einen Bereich der COS-Umgebungskonzentration von ca. 400 ppt bis ca. 650 ppt ab.

Die Ergebnisse an *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter 350 und 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration belegen eine deterministische Abhängigkeit des COS-Austausches von der COS-Umgebungskonzentration. Diese Abhängigkeit wurde ebenfalls von anderen Autoren beobachtet und publiziert. (Kesselmeier & Merk., 1993; Hoffmann, 1993; Huber, 1994 )

Die Messungen legen aufgrund der Tatsache, dass der Korrelationskoeffizient  $R$  in der Nähe von 1 liegt, die Approximation durch eine Gerade nahe. Der Vollständigkeit halber sind im Folgenden die in der Arbeit weiter verwendeten Gleichungen angegeben.

$$y = m \cdot x + b \quad (\text{G22})$$

$$F_{\text{COS}} = m \cdot c_{\text{REF}} + b \quad (\text{G23})$$

Der Koeffizient  $m$  entspricht dabei dem Anstieg der Geraden und der Koeffizient  $b$  dem Schnittpunkt mit der Ordinate. Die Berechnung der Regressionskoeffizienten  $m$  und  $b$  erfolgte dabei mit Hilfe der Software MathCAD Version 8.0 unter Nutzung der Gleichung 22.

$$\begin{bmatrix} b \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N 1 & \sum_{n=1}^N c_{\text{REF } n} \\ \sum_{n=1}^N c_{\text{REF } n} & \sum_{n=1}^N c_{\text{REF } n}^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N F_{\text{COS } n} \\ \sum_{n=1}^N F_{\text{COS } n} \cdot c_{\text{REF } n} \end{bmatrix} \quad (\text{G24})$$

Für alle Messreihen wurden die Regressionsparameter  $m$  und  $b$  berechnet. Mit Hilfe der Regressionsparameter kann dann der so genannte Kompensationspunkt, KP, für den COS-Austausch extrapoliert werden. Der Kompensationspunkt für den COS-Austausch wurde analog zum Kompensationspunkt für den  $\text{CO}_2$ -Austausch definiert.<sup>1</sup> Die Formel für die Extrapolation des Kompensationspunktes (KP) bei  $y = 0$  bzw.  $F_{\text{COS}} = 0$ , lautet:

$$KP = -\frac{b}{m} \quad (\text{G25})$$

Es sei an dieser Stelle besonders darauf hingewiesen, dass der Kompensationspunkt extrapoliert und nicht experimentell bestimmt wurde. Denn unter den sich aus der Themenstellung abgeleitenden Rahmenbedingungen für die Analyse des COS-Austausches unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration (wie beispielsweise Arbeitspunkt der COS-Umgebungskonzentration, Genauigkeit der Analysetechnik usw.) wurde eine Abgabe von COS von den untersuchten biotischen Kompartimenten nicht festgestellt.

---

<sup>1</sup> Der Kompensationspunkt ist der Punkt, an dem sich Aufnahme und Abgabe von  $\text{CO}_2$  die Waage halten, also der Wert bei dem der resultierende Austausch den Wert null annimmt Borris, (1985).

Um den funktionalen Zusammenhang zwischen COS-Spurengasfluss und COS-Umgebungskonzentration in der späteren Auswertung nicht immer explizit berücksichtigen zu müssen, werden alle Werte für den COS-Austausch mit Hilfe der Regressionsgeraden und der entsprechenden COS-Umgebungskonzentration auf den Standardwert von 600 ppt COS normiert, um mit am MPI bereits gesammelten Daten vergleichbare zu machen .

Für die Normierung verfahren wird a priori davon ausgegangen, dass der Fehler ( $e_n$ ), der bei der linearen Approximation des Zusammenhanges zwischen dem Spurengasfluss und der COS-Umgebungskonzentration entsteht, von der COS-Umgebungskonzentration statistisch unabhängig ist. Unter dieser Voraussetzung werden die normierten COS-Austausch-Werte,  $F_{600n}$ , wie folgt berechnet:

$$F_{600n} = F_{COS_n} + m \cdot (600 pptv - c_{COS_n}) \quad (G26)$$

Die Ergebnisse der Messreihen für *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. bestätigen alle den beschriebenen Trend, wobei die Parameter für den Anstieg ( $m$ ), und den Schnittpunkt mit der Ordinate ( $b$ ), von Baum zu Baum individuell variieren können.

Das folgende Kapitel enthält die o.g. Parameter für die experimentell ermittelten Messreihen von *Fagus ylvatica* L. und *Quercus ilex* L. aus Gründen der Übersichtlichkeit in tabellarischer Form.

An dieser Stelle kurz eine biologische Interpretation der ermittelten COS-Austauschparameter  $m$  und  $b$ . Es wird im Folgenden der Zusammenhang zu den in anderen Veröffentlichungen verwendeten Parametern Kompensationspunkt (KP), Depositionsgeschwindigkeit ( $v_D$ ) und Produktionsrate ( $P$ ) hergestellt. Diese Parameter wurden von Conrad (1994) für die Parametrisierung von Denitrifikations- und Nitrifikationsprozessen bei Böden eingeführt. Bei den in der angeführten Publikation analysierten Prozessen finden Aufnahme und Abgabe von  $NO$  statt (Focht & Verstraete, 1977; Galbally, 1989; van Dijk, 2001). Dabei sind die Abhängigkeiten von der Umgebungskonzentration unterschiedlich. Die Abgabe ist über die Umgebungskonzentration konstant und wird durch die Produktionsrate  $P$  charakterisiert. Die Aufnahme steigt linear mit der Umgebungskonzentration  $c$ . Der Anstieg wird durch die

Depositionsrates  $k_D$  beschrieben. Auf den COS-Austausch angewendet, berechnet sich der COS-Spurengasfluss  $F_{COS}$  demnach wie folgt:

$$F_{COS} = P - k_D \cdot c_{REF} \quad (G27)$$

Die Produktionsrate  $P$  entspricht also der Konstanten  $b$  und die Depositionsrates  $k_D$  der Konstanten  $m$ . Daraus lässt sich leicht bei der Umgebungskonzentration  $c=0$  die Produktionsrate ermitteln:

$$F_{COS} = P \quad (G28)$$

Nun kann ebenso wie zuvor bei Gleichung 18 der Kompensationspunkt (KP) bei der dem COS-Spurengasfluss  $F_{COS}=0$  berechnet werden.

$$KP = \frac{P}{k_D} \quad (G29)$$

Die Depositionskonstante ( $k_D$ ) ist dabei nicht mit der Depositionsgeschwindigkeit ( $v_D$ ) zu verwechseln. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen beiden Größen:

$$v_D(c_{REF}) = \frac{F_{COS}}{c_{REF}} = \frac{P - k_D \cdot c_{REF}}{c_{REF}} = \frac{P}{c_{REF}} - k_D \quad (G30)$$

Im Fall  $P=0$  entspricht die Depositionsgeschwindigkeit der negativen Depositionsrates. Der Kompensationspunkt ist dann  $KP=0$ .

Bei den durchgeführten Experimenten konnte dieser Fall nicht experimentell nachgewiesen werden. Bei allen analysierten Bäumen wurde ein Kompensationspunkt extrapoliert, der wesentlich grösser als 0 war ( $KP>0$ ). Er liegt im Bereich zwischen 100 und 500 ppt. Die auf Basis der Regressionsgeraden extrapolierte Produktionsrate  $P$  weicht stark von den bei allen untersuchten Pflanzen gemessenen Produktionsraten ab. Bei der COS-Umgebungskonzentration von 0 ppt müssten die gemessenen Produktionsraten den berechneten Regressionsraten  $b$  entsprechen. Der Arbeitspunkt COS-

Umgebungskonzentration gleich 0 konnte eingestellt werden, indem nach der Reinigungsanlage, in der u.a. COS herausgefiltert wurde, kein COS mehr von der Permeationsanlage in den Gasstrom injiziert wird. Bei allen untersuchten Bäumen wurde bei diesem Arbeitspunkt  $c_{\text{COS}}=0$  keine Abgabe d.h.  $F_{\text{COS}}=0$  gemessen. Das ist ein deutlicher Hinweis dafür, dass die für den Stickoxidaustausch (NO) von Böden entwickelte Modelvorstellung nicht auf die Charakterisierung des COS-Austauschs von Bäumen angewendet werden kann. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Einfluss externer Parameter wie z.B. der Schwefelgehalt des Bodens im Rahmen dieser Arbeit nicht analysiert werden konnte.

Die Ergebnisse legen die Anwendung einer nichtlinearen Approximation zwischen dem extrapolierten Kompensationspunkt und dem Koordinatenursprung nahe. Die Güte der Approximation kann im Bereich zwischen dem extrapolierten Kompensationspunkt und der Konzentration  $c_{\text{COS}}=0$  nur durch Modifizierung der Modellvorstellung verbessert werden. Die Abbildung (43) führt in die oben beschriebenen Zusammenhänge ein.

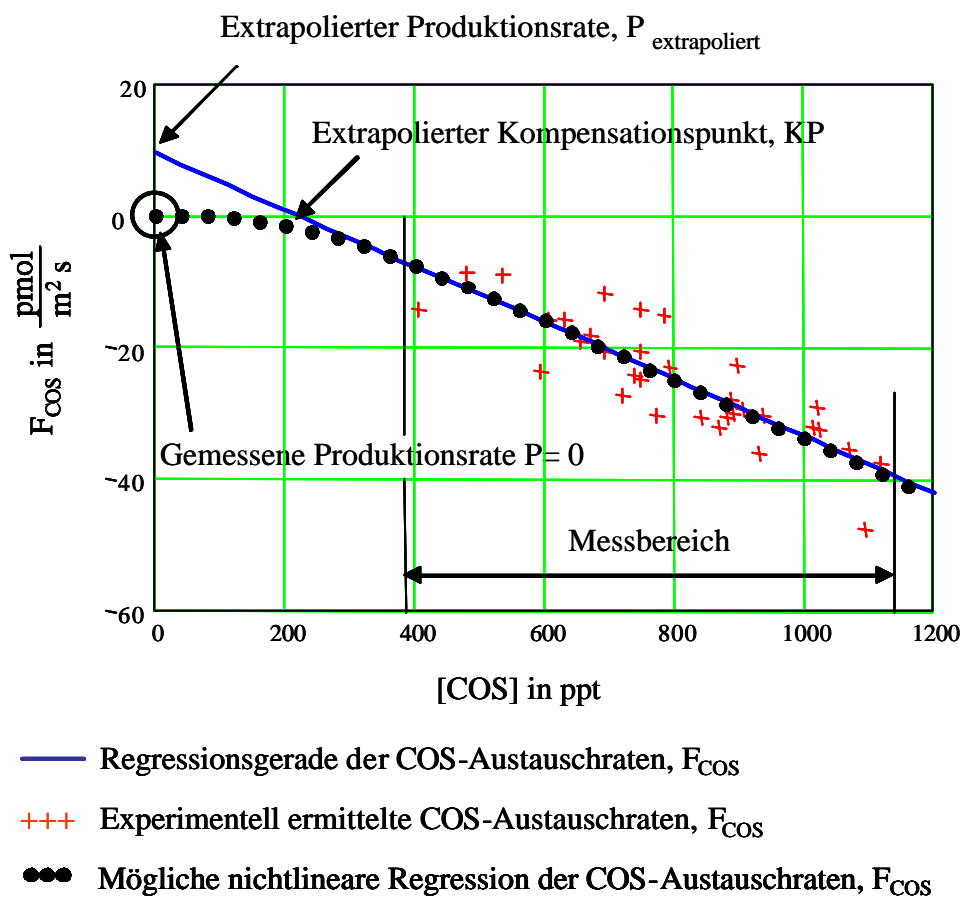


Abbildung 43: COS-Austausch - lineare und nichtlineare Regression (*Quercus ilex* L. 1999) (Modellordnung der nichtlinearen Regression  $N=4$ )

Für die nichtlineare Approximation kann grundsätzlich folgendes Modell verwendet werden.

$$F_{\text{COS}} = \frac{v_D \cdot [\text{COS}]^{N+1}}{KP^N + [\text{COS}]^N} \quad (\text{G31})$$

Dieses Modell enthält nur Parameter, die bei den hier untersuchten Spezies biologisch interpretiert werden können: die Depositionsgeschwindigkeit ( $v_D$ ) und den Kompensationspunkt (KP). Da an den in dieser Arbeit untersuchten Spezies keine COS-Abgabe festgestellt wurde, könnte der Kompensationspunkt in diesem Fall, auch als Einsetzpunkt für die COS-Aufnahme bezeichnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch die Parameter der nichtlinearen Regression nicht bei allen Versuchsreihen explizit bestimmt, da die dafür notwendigen COS-Konzentrationen (im nichtlinearen Bereich um KP) ausserhalb der atmosphärischen COS-Umgebungskonzentration liegen. Diese Untersuchungen sind notwendig, um die notwendige Ordnung (N) der Polynome, die die Güte der Approximation insbesondere im nichtlinearen Bereich wesentlich bestimmt, zu ermitteln. Diese Versuche wurden im Sinne der Erhöhung der statistischen Sicherheit der Messergebnisse (Maximierung der Messpunkte unter atmosphärischer COS-Umgebungskonzentration) nicht mit in das Versuchsprogramm aufgenommen. Ausserdem erfordert die exakte Bestimmung der COS-Konzentration um den Kompensationspunkt eine weitere Erhöhung der Empfindlichkeit der Messsystemes.

Deshalb werden für die weitere Analyse die linearen Regressionsparameter verwendet, da sie unter Ausklammerung des Punktes COS-Umgebungskonzentration gleich null ( $c_{\text{COS}}=0$ ) für den abgedeckten Messbereich eine gute Approximation darstellen. Da der angesprochene Arbeitspunkt COS-Umgebungskonzentration gleich null in der Atmosphäre nicht auftritt, erwachsen daraus keine Einschränkungen.<sup>1</sup> Bei den so untersuchten Versuchen wurde festgestellt, dass die mit beiden Methoden gewonnen Parameter übereinstimmen. Deshalb lassen sich die mit Hilfe der linearen Regressionskoeffizienten (m, b) bestimmten Parameter Kompensationspunkt (Gleichung 29) und Depositionsgeschwindigkeit (Gleichung 30) auch als Eingabewerte für das oben eingeführte Modell verwenden.

---

<sup>1</sup> Bei den Interpretationen ist lediglich zu beachten, dass der Parameter b dann nicht der Produktionsrate P entspricht.

### 3.5 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf der COS-Austauschrate

Der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf den COS-Spuren-gasaustausch wurde an den beiden Spezies *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. jeweils an 3 Exemplaren untersucht. Mit der sommergrünen Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) wurden Messreihen in der vegetativen Phase 1998 und 1999 aufgenommen. Dabei wurden die Bäume F1, F2, F3 bei 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration und die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration angezogenen Bäume F4, F5, F6 bei 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration untersucht. Mit der immergrünen Steineiche (*Quercus ilex* L.) konnten 1998, 1999 und 2000 Messreihen aufgenommen werden. Dabei wurden die Bäume Q2, Q8, Q12 bei 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration und die Bäume Q6, Q9, Q10 bei 800 ppm untersucht.

Wie bereits im Kapitel 2 erwähnt, wurden die Messbedingungen, Temperatur, Luftfeuchte und Lichtintensität, sowohl bei den Laboruntersuchungen als auch in den Klimakammern des Botanischen Instituts konstant gehalten. Die Bäume wurden mindestens 24 Stunden vor der ersten Spurengasmessung zur Akklimatisation in die Gaswechselkammer gebracht. Nach Abwischen des Versuchsastes mit deionisiertem Wasser wurde er dann in die Messküvette eingespannt und nach weiteren 12 Stunden kontinuierlich gemessen. Die COS-Umgebungskonzentration wurde mit Hilfe der bereits in Kapitel 2 vorgestellten COS-Messsysteme "ARGON" und "SUGAR" bestimmt. Die CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration wurde, in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit, mit Hilfe der Geräte ADC 2250 (Fa. ADC, GB), LI6262 (Fa. Bernt, BRD) und EGM (Fa. Walz, BRD) aufgezeichnet. Bei Verwendung des Gerätes EGM erfolgte die Aufzeichnung per Hand.

Die Ergebnisse werden nach der folgenden Struktur präsentiert:

- a) Zeitliche Abfolge
- b) physiologische Parameter
- c) COS-Austauschparameter
- d) statistische Analyse der Daten
- e) Interpretation

Während der Laborexperimente betrug die Lichtintensität während des Tages etwa 13 Stunden lang ca. 600  $\mu\text{E} / (\text{m}^2 \text{ s})$ . Die Temperatur lag bei ca. 25 °C  $\pm$  2 °C und die relative

Feuchte ca. 70 %. Die physiologischen Angaben werden durch die folgenden Daten komplettiert:

- $A_{CO_2}$  in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ min})$ ... $CO_2$ -Assimilationsrate
- $\sigma_{CO_2}$  in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ min})$ ...Standardabweichung der  $CO_2$ -Assimilationsrate
- $v_{DCO_2}$  in  $\text{mm}/\text{s}$ ... $CO_2$ -Depositionsgeschwindigkeit
- $\sigma_{v_{DCO_2}}$  in  $\text{mm}/\text{s}$ ...Standardabweichung der  $CO_2$ - Depositionsgeschwindigkeit
- $T_{H_2O}$  in  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{ min})$  ...Transpirationsrate
- $\sigma_{H_2O}$  in  $\text{mm}/\text{s}$ ... Standardabweichung der Transpirationsrate.

Die Verläufe von Transpiration und Assimilation verliefen bei allen Messreihen wie in Abbildung annähernd konstant parallel zur Lichtintensität. Von diesen Parametern werden die gemittelten Tages-Werte tabellarisch angegeben.

Für die Untersuchungen des Einflusses der  $CO_2$ -Konzentration auf den COS-Spurgasfluss wurden bei jeder Messreihe für jeden Baum die folgenden Parameter berechnet und tabellarisch angegeben:

- $F_{600}$  in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ...auf 600ppt COS normierte COS-Austauschrage nach Formel (26)
- $\sigma_F$  in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ...Standardabweichung der normierten COS-Austauschrage
- $v_{DCOS}$  in  $\text{mm}/\text{s}$ ...Depositionsgeschwindigkeit von COS
- $\sigma_{v_{DCOS}}$  in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ...Standardabweichung der Depositionsgeschwindigkeit von COS
- $KP$  in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ...extrapolierter Kompensationspunkt nach Formel 29
- $m$  in  $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2 \text{ s})$ ...Anstieg der Regressionsgeraden nach Formel 24
- $b$  in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ...Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Ordinate
- $R$ ...Korrelationskoeffizient nach Formel 19.

Ausserdem enthalten die Tabellen zusätzlich noch die Anzahl der Messpunkte (N). Die für die Analyse verwendeten Messreihen wurden dem Ausreissertest von Nalimov unterzogen, der sich besonders für Reihen mit wenigen Messpunkten eignet, sodass diese nach der Definition von Kapitel 2.7.1 frei von Ausreissern sind.

Im Anhang 7.4 sind für alle Bäume und Messreihen die COS-Austauschparameter graphisch dargestellt.

### 3.5.1 Messungen an *Fagus sylvatica* L.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der drei Messkampagnen an *Fagus sylvatica* L. vorgestellt.

I) Messreihen Sommer 1998:

Im August des Jahres 1998 wurden die ersten Messungen an der Spezies *Fagus sylvatica* L. durchgeführt. Zu Beginn der ersten Messung wurden die untersuchten Exemplare ca. drei Monate unter den im Kapitel 2 beschriebenen kontrollierten Bedingungen bei den entsprechenden CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen aufgezogen. Das heisst, dass die Knospen der 1998 gemessenen Blätter sich im Jahr davor, 1997, unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration entwickelt hatten.

a) Zeitliche Abfolge der Versuche

Die Tabelle 15 enthält die Untersuchungszeiträume für die untersuchten Individuen der Spezies.

Baum	Beginn	Ende
F1	27.08.98	28.08.98
F2	31.08.98	01.09.98
F3	03.09.98	15.09.98
F4	15.09.98	17.09.98
F5	18.09.98	21.09.98
F6	22.09.98	23.09.98

**Tabelle 15: Zeiträume der Messungen des COS-Spuren gasflusses bei *Fagus sylvatica* L. 1998**

Alle Messreihen wurden mit dem halbautomatischen Analysesystem "ARGON" aufgenommen.

## b) Physiologische Parameter

Die Tabelle 16 enthält die tagsüber gemessenen Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Parameter von CO<sub>2</sub>-Assimilation, A<sub>CO<sub>2</sub></sub>, und Transpiration, T<sub>H<sub>2</sub>O</sub>.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	F1	F2	F3	F4	F5	F6
A <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	171	193	238	100	155	161
S <sub>CO<sub>2</sub></sub> mmol/(m <sup>2</sup> min)	12	8	7	3	13	15
v <sub>D</sub> CO <sub>2</sub> in mm/s	0,199	0,225	0,277	0,051	0,079	0,082
S <sub>v</sub> D <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,022	0,021	0,025	0,002	0,007	0,008
T <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	39	41	27	12	23	31
S <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	6	4	3	1	4	2

**Tabelle 16: Gemittelte Parameter der physiologischen Daten, Assimilation, CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeit und Transpiration während der Messreihen mit *Fagus sylvatica* L. im Sommer 1998**

Die im Messzeitraum gemittelten physiologischen Parameter der einzelnen Bäume zeigen, starke individuelle Schwankungen von Baum zu Baum.

Die Werte für die Assimilationsraten der Bäume, die unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden, liegen über denen der Bäume, die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gehalten wurden. Ebenso verhält es sich, bis auf eine Ausnahme (Baum F6), mit der Transpirationsrate.

Die Bäume, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub> -Umgebungskonzentration angezogen wurden, zeigen eine geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsrate im Vergleich zu den Bäumen unter normaler CO<sub>2</sub> -Umgebungskonzentration.

## c) COS-Austauschparameter

Die Tabelle 17 enthält die am Anfang des Kapitels ausgewählten Parameter des COS-Austausches für die einzelnen untersuchten Individuen.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F <sub>COS</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-13,8	-12,5	-12,3	-18,3	-8,1	-9,7
S <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)...	4,8	3,0	4,7	5,8	3,0	7,4
v <sub>D<sub>COS</sub></sub> in mm/s	-0,551	-0,441	-0,429	-0,55	-0,297	-0,47
S <sub>V<sub>D<sub>COS</sub></sub></sub> in mm/s	0,211	0,168	0,226	0,327	0,142	0,302
N	19	21	36	26	25	22
R	-0,74	-0,82	-0,65	-0,74	-0,65	-0,68
KP in ppt	258	279	277	240	238	489
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)...	10,4	10,9	10,5	12,2	5,3	42,8
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,040	-0,039	-0,038	-0,051	-0,022	-0,088

**Tabelle 17: Parameter des COS-Spurengasflusses der Messreihe *Fagus sylvatica* L. 1998**

Die Messergebnisse 1998 an *Fagus sylvatica* L. weisen bei den Bäumen, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden, wesentlich stärkere Schwankungen der Austauschparameter auf, als bei den Bäumen, die unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gehalten wurden.

## d) statistische Analyse der Daten

Statistisch gesehen unterscheiden sich nach dem t-Test für Mittelwerte die normierten, gemittelten COS-Austauschraten der Bäume F1, F2, F3 bei einer angenommenen

Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01 nicht signifikant. Jedoch dürften nur die COS-Austauschraten der Bäume F1 und F3 ohne Bedenken zusammengefasst werden. Die COS-Austauschraten des Baumes F2 darf aus statistischer Sicht wegen der nach dem f-Test hochsignifikant unterschiedlichen Varianz nicht mit in diese Zusammenfassung einbezogen werden, obwohl der t-Test objektiv belegt, dass kein Unterschied zwischen den Mittelwerten besteht. Da sich aus den oben genannten Gründen durch Zusammenfassen der Einzelmittelwerte kein Mittelwert bilden lässt, der für die gesamte Gruppe F1, F2, F3, repräsentiert, muss im Folgenden mit den Einzelmittelwerten der beiden Gruppen bzw. deren Medianwert und Spannweite weitergearbeitet werden.

Bei der Gruppe der Bäume, die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gehalten wurden, lassen sich wegen der noch grösseren individuellen Schwankungen zwischen den Einzelindividuen, aus statistischer Sicht nach dem t-Test, bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01, nur die normierten COS-Austauschraten der Bäume F5 und F6 zu einem repräsentativen Wert zusammenfassen. Jedoch unterscheiden sich nach dem f-Test, die Varianzen signifikant, sodass ein aus diesen beiden Mittelwerten zusammengefasster Mittelwert für die Gruppe nicht repräsentativ wäre.

Da sich keine repräsentativen Mittelwerte für die beiden Gruppen bilden liessen, werden nun die Einzelmittelwerte des COS-Spurengasflusses der Gruppen gegeneinander verglichen. Die Ergebnisse dieser Analyse nach dem t-Test werden für alle Messreihen wie exemplarisch in die Tabelle 18 gezeigt, dargestellt.

	X1	X2	X3
Y1	<	>	=

**Tabelle 18: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten**

Die Tabelle ist wie folgt zu lesen:  $Y1 < X1$ ;  $Y1 > X2$  und  $Y1 = X3$ .

Die Ergebnisse der Analyse der Mittelwerte des COS-Spurengasflusses nach dem t-Test zeigt die Tabelle 19. Dabei wurden die Entscheidungen, ob die verglichenen Mittelwerte grösser, kleiner oder als gleich angesehen werden müssen, auf Basis der Tabelle 11 gefällt. Dabei

wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01 angenommen, D.h. die statistische Sicherheit P% beträgt 99,9%.

350ppm CO <sub>2</sub>	800ppm CO <sub>2</sub>	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F4	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F5	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F6
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F1		<	>	=
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F2		<	>	=
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F3		<	>	=

**Tabelle 19: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) der Messreihe von *Fagus sylvatica* L. 1998**

Statistisch signifikant unterscheiden sich die normierten, gemittelten COS-Austauschraten der Bäume F1, F2, F3 von denen der Bäume F4 und F5. Wobei die COS-Austauschraten des Baumes F4 unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration signifikant grösser als die die COS-Austauschraten der Bäume F1, F2, F3 unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ist. Die COS-Austauschraten des Baumes F5 unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ist signifikant kleiner als die die COS-Austauschraten der Bäume F1, F2, F3 unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Die COS-Austauschraten des Baumes F6 unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration zeigt keinen Unterschied zu den COS-Austauschraten der Bäume F1, F2, F3 unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

#### e) Interpretation

Aus dieser Messreihe lässt sich noch kein Trend ableiten, wie sich der COS-Austausch bei *Fagus sylvatica* unter einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration entwickeln wird.

Die Schwierigkeiten bei der statistischen Fundamentierung der oben beschriebenen Trends in den Messergebnissen dieses Messzeitraumes sind bei dieser Art von Untersuchung nicht ungewöhnlich. Overdieck (1993) stellte beispielsweise bei der Analyse des Wachstums von jungen *Fagus sylvatica* L. (48 Individuen) unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration zwar einen schwachen, grundsätzlichen Trend fest, ebenso aber auch sehr starke Unterschiede zwischen

den Individuen. Neben der wohlbekanntem Individualität biologischer Kompartimente sieht er, speziell im ersten Jahr der Untersuchung eine weitere Ursache in der Tatsache, dass die Knospen der unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Begasung analysierten Blätter sich bei normaler CO<sub>2</sub>-Konzentration entwickelt haben: „...Die aus Knospen des Vorjahres – ohne CO<sub>2</sub>-Begasung – stammenden Blätter könnten nicht oder nur wenig reagiert haben ...“ Reining (1990) berichtet von analogen Fakten.

## II) Messreihen Sommer 1999:

Während der inaktiven Periode, der winterlichen endogenen Dormanz, von *Fagus sylvatica* L. wurden die Bäume ab Dezember 1998 nach draussen ins Freie, vor das Botanische Institut der Universität Mainz, gebracht. Dort verblieben sie den ganzen Winter. Bis sie im Februar 1999 wieder in die Klimakammer gebracht wurden. Zu Beginn der Messreihe waren die untersuchten Spezies bereits wieder 5 Monate in der Klimakammer mit den im Kapitel 2 beschriebenen kontrollierten Aufzuchtbedingungen unter den entsprechenden CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen. Es sei besonders darauf hingewiesen, dass sich im Unterschied zu den Messungen von 1998 die Knospen der 1999 untersuchten Blätter bei den unterschiedlichen, kontrollierten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen entwickelt haben.

### a) Zeitliche Abfolge der Versuche

Die Tabelle 20 unten enthält die Zeiträume der Durchführung der Messreihen an *Fagus sylvatica* L. im Sommer 1999.

<b>Baum</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>
<b>F1</b>	05.07.99	06.07.99
<b>F2</b>	14.07.99	19.07.99
<b>F3</b>	08.07.99	13.07.99
<b>F4</b>	08.06.99	10.06.99
<b>F5</b>	01.06.99	02.06.99
<b>F6</b>	16.06.99	28.06.99

**Tabelle 20: Zeiträume der Messungen des COS-Spurenengasflusses bei *Fagus sylvatica* L. Sommer 1999**

Der COS-Austausch wurde mit dem halbautomatischen Analysesystem "ARGON" aufgezeichnet.

b) physiologische Daten

Die Tabelle (21) enthält die tagsüber gemessenen Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Parameter von CO<sub>2</sub>-Assimilation, A<sub>CO<sub>2</sub></sub>, und Transpiration, T<sub>H<sub>2</sub>O</sub>.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	F1	F2	F3	F4	F5	F6
A <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	317	332	354	400	300	303
S <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	29	27	25	30	46	26
v <sub>DCO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,37	0,387	0,29	0,204	0,174	0,155
S <sub>vDCO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,046	0,046	0,078	0,032	0,017	0,024
T <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	22	20	29	43	46	23
S <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	4	6	4	7	20	4

**Tabelle 21: Gemittelte Parameter der physiologischen Daten, Assimilation, CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeit und Transpiration während der Messreihen mit *Fagus sylvatica* L. im Sommer 1999**

Auffällig gegenüber dem Vorjahr ist, dass die CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeit, die CO<sub>2</sub>-Assimilation und Transpirationsrate deutlich grössere Werte besitzen. Im Unterschied zum Vorjahr haben alle Bäume unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsraten als unter normaler CO<sub>2</sub>-Konzentration.

Die Bäume, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub> -Umgebungskonzentration angezogen wurden, zeigen wie im Vorjahr eine geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsrate im Vergleich zu den Bäumen unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

## c) COS-Austauschparameter

Die Tabelle 22 enthält zu Beginn des Kapitels aufgezählten Parameter des COS-Austausches der einzelnen Bäume.

Baum	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F <sub>COS</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)...	-21,7	-26,1	-19,1	-23,4	-19,1	-18,1
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)...	4,8	13,7	8,5	8,2	17,5	11,8
v <sub>DCOS</sub> in mm/s	-0,873	-1,105	-0,994	-0,904	-0,951	-0,806
σ <sub>vDCOS</sub> in mm/s	0,217	0,486	0,268	0,278	0,502	0,328
N	28	33	43	39	36	58
R	-0,89	-0,43	-0,75	-0,70	0,56	-0,61
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)...	189	150	309	190	276	162
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)...	9,95	8,75	20,51	10,8	16,4	6,71
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,053	-0,058	-0,066	-0,057	-0,059	-0,041

**Tabelle 22: Parameter des COS-Spurengasflusses der Messreihe *Fagus sylvatica* L.**

**Sommer 1999**

Die Messungen im Sommer 1999 an *Fagus sylvatica* L. haben grundsätzlich grössere Absolutwerte und Standardabweichungen als im Vorjahr 1998.

## d) Statistische Analyse der Daten

Die Mittelwerte der normierten COS-Austauschraten der Bäume unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration (F1 und F2 bzw. und F1 und F3) zeigen nach dem t-Test für Mittelwerte (angenommene Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) statistisch keinen signifikanten Unterschied. Jedoch dürfen wieder aus statistischer Sicht die COS-Austauschraten dieser Bäume wegen der nach dem fTest hochsignifikant unterschiedlichen Varianzen nicht zu einem repräsentativen Mittelwert zusammengefasst werden, obwohl der t-

Test objektiv belegt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten von F1, F2 und F1,F3 besteht.

Bei den Bäumen, die bei 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gehalten wurden, sind die Schwankungen der Austauschparameter ebenfalls, wie bereits 1998 festgestellt, etwas grösser, als bei den Bäumen, die bei 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gehalten wurden. Anders als im Vorjahr, 1998, unterscheiden sich aus statistischer Sicht (t-Test für Mittelwerte bei angenommener Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) bei dieser Messreihe die normierten COS-Austauschraten der Bäume F4 und F6 sowie F5 und F6 nicht signifikant. Jedoch dürfen wieder wegen der nach dem f-Test hochsignifikant unterschiedlichen Varianz, die COS-Austauschraten der Bäume aus statistischer Sicht nicht zusammengefasst werden.

Da sich wiederum keine repräsentativen Mittelwerte für die beiden Gruppen bilden liessen, werden nun die Einzelmittelwerte der Individuen gegeneinander verglichen. Die Ergebnisse dieser Analyse nach dem t-Test zeigt die Tabelle 23.

350ppm CO <sub>2</sub>	800ppm CO <sub>2</sub>	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F4	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F5	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F6
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F1		=	=	=
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F2		=	=	>
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> F3		=	=	=

**Tabelle 23: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) der Messreihe von *Fagus sylvatica* L. in Sommer 1999**

Der t-Test für Mittelwerte belegt objektiv, dass sich bei dieser Messreihe nur die normierten gemittelten COS-Austauschraten der Bäume F2 von F6 statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Der Baum F6 unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration hat eine geringere COS-Austauschraten als der Baum F2 unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Die anderen gemittelten COS-Austauschraten der Bäume unterscheiden sich statistisch nicht signifikant voneinander.

Auffällig ist, dass der Baum, F4, bei dem im Vorjahr die grösste COS-Aufnahmerate aller untersuchten *Fagus sylvatica* beobachtet wurde, in dieser Messkampagne immer noch mit  $-23.371 \text{ pmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  die grösste COS-Aufnahmerate der Bäume unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration hatte.

#### d) Interpretation

Anders als im Vorjahr, lässt sich diesmal anhand dieser Daten ein schwacher etwas eindeutigerer Trend erkennen: Ein Baum von drei nimmt unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration weniger COS auf als unter normaler  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, während sich die anderen Bäume beim COS-Surengasfluss nicht signifikant unterscheiden.

### III) Messreihe Herbst 1999

Die Tabelle 24 enthält die Zeiträume der Durchführung der Laboruntersuchung der zweiten Messreihe an *Fagus sylvatica* L. im Spätsommer/Herbst 1999.

Baum	Beginn	Ende
F1	08.10.99	12.10.99
F2	13.10.99	15.10.99
F3	29.10.99	1.11.99
F4	13.09.99	14.09.99
F5	24.08.99	30.08.99
F6	05.10.99	07.10.99

**Tabelle 24: Zeiträume der Messungen des COS-Spurengasflusses bei *Fagus sylvatica* L. Herbst 1999**

Die Messreihen der Bäume F1, F2, F4, F5 und F6 wurden mit dem halbautomatischen Analysesystem " ARGON" aufgenommen. Der COS-Austausch des Baumes F3 wurde mit dem vollautomatischen System "SUGAR" analysiert.

## b) Physiologische Daten

Die Tabelle 25 enthält die physiologischen Parameter der CO<sub>2</sub>-Assimilation, A<sub>CO<sub>2</sub></sub>, und Transpiration, T<sub>H<sub>2</sub>O</sub> dieser Messkampagne.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	F1	F2	F3	F4	F5	F6
A <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	204	241	201	97	105	197
S <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	6	17	5	13	18	19
v <sub>D<sub>CO<sub>2</sub></sub></sub> in mm/s	0,238	0,281	0,234	0,049	0,053	0,1
S <sub>v<sub>D<sub>CO<sub>2</sub></sub></sub> in mm/s</sub>	0,022	0,031	0,021	0,007	0,009	0,01
T <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	8	19	18	7	11	15
S <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	2	8	1	3	2	2

**Tabelle 25: Gemittelte Parameter der physiologischen Daten, Assimilation, CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeit und Transpiration während der Messreihen mit *Fagus sylvatica* L. im Herbst 1999**

Auffällig ist, dass der Gaswechsellustausch, Assimilations- und Transpirationsrate, für beide Gruppen von Bäumen deutlich unter den Werten, die im Sommer 1999 ermittelt wurden, liegen. Die Bäume, die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration gehaltenen wurden, zeigen tendenziell im Vergleich zum Sommer deutlich geringere Assimilations- und Transpirationsraten als die Bäume, die unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Konzentration gehaltenen wurden.

Die Bäume, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub> -Umgebungskonzentration angezogen wurden, zeigen wie bei den vorherigen Versuchen eine geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsrate im Vergleich zu den Bäumen unter normaler CO<sub>2</sub> -Umgebungskonzentration.

## c) COS-Austauschparameter

Die Tabelle 26 enthält die eingangs aufgezählten Parameter des COS-Austausches der einzelnen Bäume.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F <sub>COS</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-11,30	-11,52	-14,10	-14,33	-11,97	-7,52
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	5,1	6,4	0,5	11	9	4
v <sub>D</sub> COS in mm/s	0,46	0,47	0,575	0,585	0,488	0,306
σ <sub>v<sub>D</sub>COS</sub> in mm/s	0,221	0,271	0,094	0,458	0,375	0,17
N	54	71	99	43	31	34
R	-0,674	-0,856	-0,794	-0,857	-0,592	-0,836
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	243	359	165	331	337	269
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	7,688	17,207	5,331	17,757	15,342	6,096
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,032	-0,048	-0,032	-0,0535	-0,0455	-0,0227

**Tabelle 26: Parameter des COS-Spurengasflusses der Messreihe *Fagus sylvatica* L. Herbst 1999**

Die Messergebnisse im Herbst 1999 an *Fagus sylvatica* L. zeigen unter 350 und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration einen geringeren COS-Austausch als im Sommer 1999. Dieser Rückgang der COS-Austauschrate kann mit dem Alter der Blätter in Zusammenhang gebracht werden, obwohl nur Äste mit ausschliesslich grünen Blättern, die noch keine Verfärbungen hatten, in die Messküvette eingebracht wurden. Wie bereits 1998 und im Sommer 1999 sind bei den Bäumen, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden, die Schwankungen der Austauschparameter etwas grösser, als bei den Bäumen, die unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gehalten wurden. Die im Vergleich zu den anderen Bäumen relativ geringe Standardabweichung der normierten COS-Austauschrate des Baumes F3 hat ihre Ursache in der Verwendung des vollautomatischen Systemes "SUGAR". Auffällig

ist wieder das Verhalten des Baumes, F4, der in dieser Messkampagne mit  $-14.33 \text{ pmol}/(\text{s m}^2)$  wie im Jahr 1998 die grösste COS-Aufnahmerate aller untersuchten *Fagus sylvatica* L. hatte.

#### d) statistische Analyse der Daten

Wie auch in den vorherigen Messkampagnen dürfen aus statistischer Sicht die COS-Austauschraten der Bäume F1, F2 und F3 nicht zu einem repräsentativen Mittelwert zusammengefasst werden.

Auch die COS-Austauschraten der Bäume unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration lassen aus statistischer Sicht nicht zu einem repräsentativen Mittelwert zusammenfassen. Deshalb werden wieder die Einzelmittelwerte der COS-Austauschraten der unterschiedlichen Gruppen gegeneinander nach dem t-Test verglichen. Das Ergebnis enthält Tabelle 27.

800ppm $\text{CO}_2$	$F_{\text{COS}}$ F4	$F_{\text{COS}}$ F5	$F_{\text{COS}}$ F6
350ppm $\text{CO}_2$			
$F_{\text{COS}}$ F1	=	=	>
$F_{\text{COS}}$ F2	=	=	>
$F_{\text{COS}}$ F3	=	=	>

**Tabelle 27: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten ( $F_{\text{COS}}$ ) der Messreihe von *Fagus sylvatica* L. in Herbst 1999**

#### e) Interpretation

Der im Sommer 1999 festgestellte leichte Trend ist etwas ausgeprägter. Ein Baum nimmt unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration signifikant weniger COS auf als jeder einzelne der Bäume, die unter natürlicher  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration aufgezogen wurden.

### **Zusammenfassung der Messreihen mit *Fagus sylvatica* L.**

Mit den Messungen bei *Fagus sylvatica* L. lässt sich noch kein eindeutiger signifikanter Unterschied zwischen den COS-Austauschraten unter normaler und erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration statistisch nachweisen. Diese Schwierigkeiten sind bei dieser Art von Untersuchung jedoch nicht aussergewöhnlich (Overdieck, 1993).

Die gemittelten Werte der Assimilations- und Transpirationsrate von *Fagus sylvatica* L. zeigen eine Reduktion des Gasaustausches unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Dufrene et al., (1993) bei untersuchung an *Fagus sylvatica* L. unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die Autoren Porter & Grodzinski, (1984); Drake et al., (1987); Cook et al., (1998); Dufrene et al., (1993); Tissue et al., (1993, 1999); Peterson & McDonald, (1994); Humbeck et al., (1996); Stirling et al., (1997); Freedden et al., (1995; 1998); de la Viña et al., (1999); Medlyn et al., (2001); Sims et al., (1999); Stitt & Krapp, (1999); Allen et al., (1988); Blaschke et al., (2001); Lawlor & Mitchell, (1991); Osborne et al., (2000); Tognetti et al., (1998) berichten von analogen Fakten.

Die deutlich geringere Assimilations- und Transpirationsraten der Bäume unter normaler und erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration im Herbst 1999 im Vergleich zum Sommer 1999, ist ein Indiz für die Auswirkung des fortschreitenden Alterungsprozesses der Blätter (Senescenz), welche unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration verstärkt werden könnte. Vergleiche auch (Vogel & Curtis (1993); Morgan et al., (1994); Thomas et al., (1994); Sage, (1994), Bazzaz & Fajer, (1996), Murray, (1997).

### 3.5.2 Messungen an *Quercus ilex* L.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der drei Messreihen an *Quercus ilex* L. vorgestellt.

#### I) Messreihe Sommer 1998

Die Bäume der Spezies *Quercus ilex* L. wurden bereits seit Anfang Januar 1998 in den Klimakammern unter kontrollierten Laborbedingungen aufgezogen. Im Februar 1998 wurden für die Bäume die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen eingestellt. Die ersten Versuche an *Quercus ilex* L. konnten im Mai 1998 durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich die Bäume also bereits ca. 4 Monate unter den im Kapitel 2 beschriebenen Aufzuchtbedingungen.

#### a) Zeitliche Abfolge der Versuche

Die Tabelle 28 enthält die Zeiträume der Durchführung der Messreihe *Quercus ilex* L. im Sommer 1998.

Baum	Beginn	Ende
Q2	19.08.98	20.08.98
Q8	10.06.98 13.08.98	11.06.98 18.08.98
Q12	08.06.98	09.06.98
Q6	21.07.98	24.07.98
Q9	10.07.98 05.08.98	12.07.98 06.08.98
Q10	30.07.98	04.08.98

**Tabelle 28: Zeiträume der Messungen des COS-Spurengasflusses bei *Quercus ilex* L. 1998**

Die Messreihen wurden mit dem halbautomatischen Analysesystem "ARGON" aufgenommen.

## b) physiologische Parameter

Die Tabelle 29 enthält die physiologischen Parameter für die CO<sub>2</sub>-Assimilation, A<sub>CO<sub>2</sub></sub>, und Transpiration, (T<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) dieser Messkampagne.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	Q2	Q8	Q12	Q6	Q9	Q10
A <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	283	197	180	210	226	263
S <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	44	14	9	12	10	15
v <sub>DCO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,33	0,229	0,21	0,107	0,115	0,134
S <sub>vDCO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,059	0,026	0,021	0,007	0,007	0,009
T <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	48	29	14	21	27	26
S <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	7	6	1	2	2	3

**Tabelle 29: Gemittelte Parameter der physiologischen Daten, Assimilation, CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeit und Transpiration während der Messreihen *Quercus ilex* L. Sommer 1998**

Die im Messzeitraum am Tag erhobenen gemittelten physiologischen Daten der einzelnen Bäume zeigen wie bei den Messungen von *Fagus sylvatica* L. ebenfalls starke individuelle Schwankungen von Baum zu Baum. Weiterhin zeigen die Bäume, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration angezogen wurden, eine geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsrate im Vergleich zu den Bäumen unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

Die gemittelten Werte für die Transpirationsrate dokumentieren eine leichte Abnahme des Wasseraustauschs unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, während die Ergebnisse der Assimilationsrate tendenziell über den Werten der Bäume unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration liegen.

## c) COS-Austauschparameter

Die Tabelle 30 enthält die eingangs aufgezählten Parameter des COS-Austausches der einzelnen Bäume.

Baum	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
	Q2	Q8	Q12	Q6	Q9	Q10
F <sub>COS</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	15,1	-12,9	-14,8	-14,9	-9,8	-13,3
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	6,9	4,9	6,4	4,7	4,1	4,0
v <sub>D</sub> COS in mm/s	-0,612	-0,542	-0,679	-0,548	-0,412	-0,512
σ <sub>v</sub> D <sub>COS</sub> in mm/s	0,279	0,21	0,189	0,242	0,172	0,18
N	27	50	19	34	35	45
R	-0,72	-0,86	-0,94	-0,84	-0,68	-0,79
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	190	263	238	241	172	187
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	7,0	10,1	10,13	10,0	4,0	6,0
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,037	-0,038	-0,042	-0,042	-0,023	-0,032

**Tabelle 30: Parameter des COS-Spurengasflusses der Messreihe *Quercus ilex* im Sommer 1998**

Grundsätzlich streuen die Ergebnisse der Messungen im Jahr 1998 an *Quercus ilex L.* bei den Bäumen, die unter 800 ppm-CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden, stärker, als bei den Bäumen, die unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden.

Ein schwacher Trend ist mit bloßem Augen nur bei der COS-Depositionsgeschwindigkeit erkennbar. Die COS-Depositionsgeschwindigkeit ist tendenziell bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration geringer.

## d) statistische Analyse der Daten

Statistisch unterscheiden sich nach dem  $t$ -Test für Mittelwerte die normierten gemittelten COS-Austauschraten der Bäume Q2 und Q12 bzw. Q8 und Q12 (bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) nicht. Sie können aber nach dem  $f$ -Test, wegen der hochsignifikant unterschiedlichen Varianz nicht zu einem resultierenden Mittelwert zusammengefasst werden. Ebenso verhält es sich mit den Bäumen, die unter 800 ppm-CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden. Obwohl die normierten gemittelten COS-Austauschraten der Individuen Q6 und Q10 sich nach dem  $t$ -Test nicht unterscheiden, konnten sie wegen dem  $f$ -Test nicht zu einem Mittelwert zusammengefasst werden.

Da sich für die beiden Gruppen keine repräsentativen Mittelwerte bilden liessen, werden die normierten Einzelmittelwerte der COS-Austauschraten gegeneinander verglichen. Die Ergebnisse der Analyse dieses Vergleichs der Mittelwerte nach dem  $t$ -Test wurden in die Tabelle 31 eingetragen.

350ppm CO <sub>2</sub>	800ppm CO <sub>2</sub>	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q6	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q9	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q10
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q2		=	>	=
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q8		=	>	=
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q12		=	>	=

**Tabelle 31: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) der Messreihe von *Quercus ilex* Sommer 1998**

## e) Interpretation

Zusammengefasst ist das Ergebnis dieser Messreihe, dass ein Baum von dreien unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration eine geringere COS-Austauschraten zeigte als die Bäume unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Zwei Bäume von drei Individuen zeigten unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration keinen Unterschied der COS-Austauschraten.

## II) Messreihe Frühling 1999

Im November 1998 konnten die Bäume wegen einer dringend notwendigen Reparatur für ca. 1 Monat nicht in der Klimakammer bleiben. Sie wurden zurückgeschnitten und in das Gewächshaus des Botanischen Instituts gebracht.

Im Frühling und Frühsommer 1999 wurde eine weitere Messreihe der Bäume aufgenommen. Für die Analyse wurde wieder das in Kapitel 2 vorgestellte halbautomatische System verwendet. Zu Beginn der Laboruntersuchungen waren die Bäume bereits wieder ca. vier Monate unter den in Kapitel 2 beschriebenen kontrollierten Umweltbedingungen.

## a) Zeitliche Abfolge der Versuche

Die Tabelle 32 enthält die Zeiträume der Durchführung der Messreihe an *Quercus ilex* L. in Jahr 1999.

<b>Baum</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>
<b>Q2</b>	04.05.99	05.05.99
<b>Q8</b>	14.04.99	27.04.99
<b>Q12</b>	29.04.99	30.04.99
<b>Q6</b>	19.05.99	22.05.99
<b>Q9</b>	25.05.99	26.05.99
<b>Q10</b>	30.06.99	01.07.99

**Tabelle 32: Zeiträume der Messungen des COS-Spurengasflusses bei *Quercus ilex* L. im Frühling/Frühsommer 1999**

## b) Physiologische Daten

Die Tabelle 33 enthält die physiologischen Parameter für die CO<sub>2</sub>-Assimilation, A<sub>CO<sub>2</sub></sub>, und Transpiration, T<sub>H<sub>2</sub>O</sub> dieser Messkampagne.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	Q2	Q8	Q12	Q6	Q9	Q10
A <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	347	308	318	370	312	358
S <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	25	22	17	60	33	47
v <sub>DCO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,404	0,359	0,371	0,189	0,159	0,182
S <sub>vDCO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,045	0,04	0,037	0,031	0,018	0,025
T <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	25	19	23	23	22	20
S <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	3	2	3	4	6	5

**Tabelle 33: Gemittelte Parameter der physiologischen Daten, Assimilation, CO<sub>2</sub>-**

**Depositionsgeschwindigkeit und Transpiration während der Messreihen mit *Quercus ilex* L. 1999**

Die im Messzeitraum am Tag erhobenen gemittelten physiologischen Daten der einzelnen Bäume zeigen wie bei den vorherigen Versuchen starke individuelle Schwankungen von Baum zu Baum. Die Bäume, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration angezogen wurden, haben eine geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsrate im Vergleich zu den Bäumen unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Die Assimilation deutet auf eine Erhöhung unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

Die gemittelten Werte für die Transpirationsrate zeigt keinen signifikanten Unterschied des Wasseraustauschs unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, während die Ergebnisse der Assimilationsrate tendenziell über den Werten der Bäume unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration liegen.

## c) COS-Austauschparameter

Die Tabelle 34 enthält die eingangs aufgezählten Parameter des COS-Austausches der einzelnen Bäume.

Baum	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
	Q2	Q8	Q12	Q6	Q9	Q10
F <sub>COS</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-16,4	-14,4	15,4	-12,6	-7,0	-7,4
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	4,6	2,7	3,4	4,8	4,2	5,2
v <sub>D</sub> COS in mm/s	-0,751	-0,514	-0,7	-0,67	-0,562	-0,53
σ <sub>v</sub> D <sub>COS</sub> in mm/s	0,166	0,164	0,113	0,135	0,161	0,168
N	33	44	29	43	32	40
R	-0,85	-0,56	-0,88	-0,89	-0,91	-0,84
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	218	109	207	271	429	391
m in pmol/(m <sup>2</sup> s)	9,4	3,2	8,2	10,4	17,8	13,8
b in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,043	-0,029	-0,039	-0,038	-0,041	-0,035

**Tabelle 34: Parameter des COS-Spurengasflusses der Messreihe *Quercus ilex* L. 1999**

Grundsätzlich streuen auch bei dieser Reihe die Messergebnisse 1999 an *Quercus ilex* L. bei den Bäumen, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden, stärker, als bei den Bäumen, die unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden.

Tendenziell lässt sich auch bei dieser Messreihe bereits aus der Tabelle erkennen, dass die COS-Depositionsgeschwindigkeit unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration geringer ist als unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

## d) Statistische Analyse der Daten

Statistisch unterscheiden sich nach dem  $t$ -Test für Mittelwerte die normierten gemittelten COS-Austauschraten der Bäume Q8 und Q12 (bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) nicht. Die COS-Austauschraten der Bäume Q2, Q12 und Q8, dürfen aus statistischer Sicht wegen der nach dem  $f$ -Test hochsignifikant unterschiedlichen Varianz nicht zusammengefasst werden. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Bäumen unter 800 ppm-CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Obwohl sich die Mittelwerte der normierten COS-Austauschraten der Bäume Q9 und Q10 statistischer Sicht lassen nicht unterscheiden, dürfen sie nach dem  $f$ -Test wegen der hochsignifikant unterschiedlichen Varianzen nicht zu einem Mittelwert zusammengefasst werden.

Da sich wieder keine repräsentativen Mittelwerte der COS-Austauschraten der beiden Gruppen bilden liessen, müssen diese wieder einzeln gegeneinander untersucht werden.. Die Ergebnisse der Analyse dieses Vergleichs nach dem  $t$ -Test enthält die Tabelle (35).

350ppm CO <sub>2</sub>	800ppm CO <sub>2</sub>	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q6	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q9	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q10
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q2		>	>	>
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q8		=	>	>
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q12		>	>	>

**Tabelle 35: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) der Messreihe von *Quercus ilex* L. im Sommer 1999**

Im Vorjahr wurde bereits bei einem Baum dieser Spezies ein geringer Unterschied beim COS-Spurengasfluss beobachtet. Dieser Trend, wird mit diesen Messergebnissen fundamntiert. Die Bäume Q9 und Q19, die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration aufgezogen wurden, zeigten signifikant kleinere COS-Aufnahme als die Bäume, die unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Konzentration aufgezogen wurden.

## e) Interpretation

Diese Messreihe belegt statistisch, dass die Spezies *Quercus ilex* unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration weniger COS aufnehmen kann, als unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

## III) Messreihe Winter 1999/2000

Die letzte Messreihe wurde mit dem Messsystem "SUGAR" im Zeitraum Dezember 1999 bis Februar 2000 aufgenommen.

## a) Zeitliche Abfolge

Die Tabelle 36 enthält die exakten Zeiträume der Durchführung der Laboruntersuchungen.

Baum	Beginn	Ende
Q2	21.12.99	26.12.99
Q8	27.12.99	30.12.99
Q12	13.12.99	17.12.99
Q6	11.02.00	17.02.00
Q9	01.02.00	05.02.00
Q10	07.02.00	10.02.00

**Tabelle 36: Zeiträume der Messungen des COS-Spurengasflusses bei *Quercus ilex* L. bis Februar 2000.**

## b) Physiologische Daten

Die Tabelle 37 enthält die physiologischen Parameter für die CO<sub>2</sub>-Assimilation, A<sub>CO2</sub>, und Transpiration, T<sub>H2O</sub> dieser Messkampagne.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	Q2	Q8	Q12	Q6	Q9	Q10
A <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	179	318	289	242	253	477
S <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	16	17	23	20	16	34
v <sub>D</sub> CO <sub>2</sub> in mm/s	0,208	0,371	0,336	0,123	0,129	0,243
S <sub>V</sub> D <sub>CO<sub>2</sub></sub> in mm/s	0,026	0,037	0,039	0,011	0,009	0,02
T <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	12	22	21	13	14	30
S <sub>H<sub>2</sub>O</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> min)	2	4	3	1	2	3

**Tabelle 37: Parameter des COS-Spuren gasflusses der Messreihe *Fagus sylvatica* L. im Winter 1999/2000**

Wie im Vorjahr ergeben sich auch bei den im Zeitraum gemessenen physiologischen Daten der einzelnen Bäume starke individuelle Schwankungen

Die Bäume, die unter 800 ppm CO<sub>2</sub> -Umgebungskonzentration angezogen wurden, zeigen eine geringere CO<sub>2</sub>-Depositionsrate im Vergleich zu den Bäumen unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

Die gemittelten Werte für die Transpirationsrate dokumentieren keinen signifikanten Unterschied des Wasseraustauschs unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, ebenso wie bei den Ergebnissen der Assimilationrate.

#### c) COS-Austauschparameter

Die Tabelle 38 enthält die eingangs aufgezählten Parameter des COS-Austausches der einzelnen Bäume.

	350 ppm CO <sub>2</sub>			800 ppm CO <sub>2</sub>		
Baum	Q2	Q8	Q12	Q6	Q9	Q10
F <sub>COS</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-25,8	-25,1	-23,1	-19,6	-14,9	-16,4
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	2,1	1,5	2,5	2,6	1,7	2,8
v <sub>DCOS</sub> in mm/s	-0,673	-0,575	-0,733	-0,68	-0,505	-0,578
σ <sub>vDCOS</sub> in mm/s	0,372	0,263	0,219	0,14	0,1	0,151
N	120	81	94	146	74	72
R	-0,98	-0,48	-0,86	-0,78	-0,80	-0,68
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	293	212	112	336	335	238
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	24,7	13,8	5,3	24,9	18,9	10,8
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,084	-0,065	-0,048	-0,074	-0,056	-0,045

**Tabelle 38: Parameter des COS-Spurgasflusses der Messreihe *Quercus ilex* L. 2000**

An diese Messreihe lässt sich bereits ohne eine detaillierte statistische Analyse erkennen, dass bei *Quercus ilex* L. die COS-Aufnahme unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration signifikant geringer ist als unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ist.

d) statistische Analyse der Daten

Statistisch unterscheiden sich nach dem t-Test für Mittelwerte die normierten gemittelten COS-Austauschraten der Bäume Q2, Q8 und Q12 (bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) und können somit nicht zu einem resultierenden Mittelwert zusammengefasst werden. Ebenso verhält es sich bei den Bäumen, die unter 800ppm-CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden. Die Einzelmittelwerte der normierten gemittelten COS-Austauschraten lassen sich nicht zu repräsentativen Gesamtmittelwerten zusammenfassen. Deshalb werden die Einzelmittelwerte der beiden Gruppen wieder gegeneinander verglichen. Die Ergebnisse der Analyse des Vergleichs der Mittelwert nach der t-Test enthält Tabelle (39).

800ppm CO <sub>2</sub> 350ppm CO <sub>2</sub>	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q6	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q9	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q10
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q2	>	>	>
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q8	>	>	>
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> Q12	>	>	>

**Tabelle 39: Vergleich der Mittelwerte der normierten COS-Aufnahmeraten (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) von *Quercus ilex* L. im Winter 1999/2000**

e) Interpretation

Der bereits in den beiden vorangegangenen Messreihen an dieser Spezies festgestellte Trend, wird durch diese Messkampagne statistisch fundamntiert. Alle Bäume unter 800 ppm CO<sub>2</sub> Umgebungskonzentration zeigen eine statistisch signifikant geringere COS-Aufnahme als die Bäume, die unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden.

Zusammenfassung der Messreihen mit *Quercus ilex* L.

Die physiologischen Daten der einzelnen Bäume von *Quercus ilex* L. zeigen starke individuelle Schwankungen von Baum zu Baum. Die gemittelten Werte für die Transpirationsrate und der Assimilationrate zeigen keine eindeutigen signifikanten Unterschiede unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Ebenso verhält es sich mit den CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten.

Wie im Kapitel 1.2.4 bereits erwähnt, wurden die Effekte einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf die Vegetation intensiv untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Tendenzen zu einer gleichbleibenden Photosynthese oder einer möglichen Reduktion der Transpiration nicht universell extrapolierbar sind.

Die Messungen mit *Quercus ilex* L. fundamntieren jedoch statistisch, dass die Bäume unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration eine statistisch signifikant geringere COS-Aufnahme als die Bäume, die unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden, haben.

### 3.6 Einfluss der erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf die Aktivität des Enzymes Carboanhydrase

Basierend auf der in Kapitel 1.3.7 aufgestellten Hypothese ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Austauschprozesse von höheren Pflanzen unter einer erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration wahrscheinlich zu erwarten. Die Aktivität des Enzymes Carboanhydrase könnte sich unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ebenfalls verringern. Dieser Abschnitt präsentiert die Ergebnisse der Laboruntersuchungen an *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L., die eine Auswirkung einer erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf die Aktivität der CA Aktivität analysieren.

#### 3.6.1 Aktivität des Enzymes Carboanhydrase bei *Fagus sylvatica* L. unter 350 und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration

Die Untersuchungen der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase wurden mit Hilfe der elektrometrischen Messmethode von Wilbur & Anderson (1948) durchgeführt. Die Ergebnisse an *Fagus sylvatica* L. in den Jahren 1998 und 1999 sind in der Tabelle 40 angegeben.

Jahr	[CO <sub>2</sub> ] in ppm	CA in Units	s	N
1998	350	4,90	0,96	9
1998	800	4,88	0,96	7
1999	350	5,32	1,07	9
1999	800	5,80	0,86	9

**Tabelle 40: Aktivität des Enzymes Carboanhydrase bei *Fagus sylvatica* L.**

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Jahr 1998 und 1999 *Fagus sylvatica* L. unter 800 ppm CO<sub>2</sub> zeigen keinen Unterschied der Aktivität des Enzymes unter verschiedenen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen.

Statistisch unterscheiden sich die Mittelwerte der Aktivität der Carboanhydrase von *Fagus sylvatica* L. unter 350 ppm und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration nach dem t-Test (bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) nicht.

Die Ergebnisse für die jeweiligen Messzeiträume können somit ohne Bedenken jeweils zu einem resultierenden Mittelwert von 4,9 (1998) und 5,5 (1999) angegeben werden.

### 3.6.2 Aktivität des Enzymes Carboanhydrase bei *Quercus ilex* L. unter 350 und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration

Die Messergebnisse der Experimente zur Bestimmung der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase an *Quercus ilex* L. in den Jahren 1998, 1999 und 2000 sind in Units in der Tabelle 41 angegeben.

Jahr	[CO <sub>2</sub> ] in ppm	CA in Units	s	N
1998	350	17,8	5,2	9
1998	800	16,5	4,8	9
1999	350	18,6	7,6	10
1999	800	11,8	7,3	7
2000	350	18,9	2,4	9
2000	800	16,9	2,6	9

**Tabelle 41: Aktivität des Enzymes Carboanhydrase bei *Quercus ilex* L.**

Die Resultate der Experimente im Jahr 1998 zeigen, dass sich die Mittelwerte der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase unter normaler (350 ppm) und unter erhöhter (800 ppm) CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration nach dem t-Test (bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01) statistisch nicht signifikant unterscheiden und somit ohne Bedenken zu einem resultierenden Mittelwert von  $17,15 \pm 5$  Units zusammengefasst werden können.

Die Untersuchungen an *Quercus ilex* L. im Jahr 1999 ergeben einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase der beiden Serien (unter normaler und unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration). Dieser Trend korreliert mit dem experimentell ermittelten Verhalten der COS-Austauschrate bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen im Jahr 1999.

Obwohl ein Unterschied zwischen den Mittelwerten der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase aus dem Jahr 2000 mit bloßem Auge sichtbar ist, unterscheiden sich diese Mittelwerte unter normaler und unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration statistisch nicht signifikant voneinander. Dieses statistisch nicht befriedigende Ergebnis wird auf die relativ geringe Anzahl der untersuchten Objekte zurückgeführt.

### 3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Messungen der COS-Austauschraten an *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. in den Jahren von 1998 bis 2000 zeigen starke individuelle Schwankungen von Baum zu Baum und Jahr zu Jahr.

Die Ursachen für diese Schwankungen können dabei sowohl den individuellen Anlagen der Bäume als auch vor allem in der Akklimatisierung sowie dem relativ kurzen Untersuchungszeitraum gesehen werden.

Die Untersuchungen von *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration zeigten statistisch unterschiedliche Ergebnisse:

Bei *Fagus sylvatica* L. ist ein schwacher Trend, dass sich bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration die COS-Austauschrate und die Aktivität der Carboanhydrase geringfügig reduziert. Die sichtbare Reduktion ist jedoch statistisch nicht signifikant.

Bei *Quercus ilex* L. konnten statistisch signifikante Unterschiede bei den COS-Austauschraten und der Aktivität der Carboanhydrase unter verschiedenen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen festgestellt werden. Die Korrelation dieser Unterschiede waren

im Sommer 1999 deutlicher als im Jahr 2000, obwohl im Jahr 2000 alle Bäume eine signifikant geringere COS-Austauschrate zeigten.

Es kann somit konstatiert werden, dass *Quercus ilex L.* auf eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration wahrscheinlich mit einer statistisch signifikanten Reduktion der COS-Austauschrate reagiert.

Die Probleme beim Nachweis der statistischen Signifikanz werden auf die relativ geringe Anzahl der untersuchten Individuen zurückgeführt. Im folgenden Kapitel werden basierend auf diesen Ergebnissen mögliche globale Auswirkungen diskutiert.

## 4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bewertet, interpretiert und in den aktuellen Stand des Wissens eingeordnet. Auf dieser Grundlage können bisherige Methoden zur Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation korrigiert und präzisiert werden, sowie neue Erkenntnisse für die Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke durch die Vegetation gewonnen werden.

Es wird sowohl auf die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eingegangen, als auch auf Basis der gewonnenen Erfahrungen, Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Mess- und Analysetechnik effizienter eingesetzt werden kann, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und dadurch die statistische Sicherheit des Nachweises der Hypothesen weiter zu erhöhen.

Im Zentrum der Diskussion stehen dabei die Auswirkungen der Erhöhung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre zur COS Austausch durch die Vegetation.

Die Analyse der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mündet in eine Prognose, zur möglichen künftigen Entwicklung des globalen atmosphärischen COS-Haushalts.

### 4.1 Verbesserungsvorschläge zur Verringerung der Messfehler des Gaswechselsystems

Die Messfehler bei der Bestimmung des COS-Austausches sind bei den verwendeten Methoden stark abhängig von den systematischen und stochastischen Messfehlern, die insbesondere bei den sehr geringen Konzentrationen nur mit grossem Aufwand auf ein für die Auswertung akzeptables Mass gebracht werden können.

Folgende Messfehler gehen wesentlich auf die Bestimmung des Spurengasflusses ein:

- $\epsilon_{V_s}$  Fehler bei der Bestimmung des Probenvolumens
- $\epsilon_Q$  Fehler bei der Bestimmung des Gasflusses
- $\epsilon_A$  Fehler bei der Bestimmung der Blattoberfläche
- $\epsilon_{mR}, \epsilon_{mM}$  Fehler bei der Bestimmung der COS-Masse aus Referenz- und Messküvette

Die Messfehler der analytische Messmethode  $\varepsilon_{mR}$  und  $\varepsilon_{mM}$  wurden durch Verwendung des Systems SUGAR reduziert. Eine weitere Reduktion des Gesamtfehlers ist möglich, wenn anstelle der Blattoberfläche das Trockengewicht verwendet wird.

Grundsätzlich wird die Empfindlichkeit der Messmethode bei beiden Messsystemen wesentlich vom Delsi FPD-Detektor bestimmt. Jedoch war die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit dem System SUGAR deutlich höher, da manuelle Eingriffe im Messprozess eliminiert wurden. Das System hat jedoch einen Nachteil: das SUGAR-System besitzt nur eine einzige Kryofalle, die sequentiell von den Gasströmen aus der Mess- und Referenzküvette durchflossen werden. Nach Zustandsänderungen benötigt SUGAR somit eine längere Wartezeit bis Differenzmessungen in dem neuen Zustand erfolgen können. Für Feldmessungen wären bei Variationen meteorologischer Parameter sowie der CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnisse in der Luft stärkere Fehler zu erwarten.

Ein Nachteil, den das halbautomatische System ARGON nicht hat, da es mit zwei Kryofallen parallel misst. Der o.g. Nachteil schliesst aber gleichzeitig den Fehler aus, der z.B. durch unterschiedliche Fehlercharakteristiken der beiden Kühlfallen entstehen kann. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass das SUGAR-Messsystem wegen der offensichtlich geringeren Parameterdriften bei Laboruntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen zu geringeren Streuungen in den Messungen führte, da sich die Schwankungen der Gaskonzentrationen in engen Grenzen hielten.

Um den Anwendungsbereich auch auf Feldmessungen zu erweitern, wird deshalb vorgeschlagen, die Gasströme in Mess- und Referenzküvette ebenfalls parallel zu sammeln, was durch den Einbau einer zweiten Kryofalle möglich wird. Es wird erwartet, dass sich der systematische Fehler durch die Verwendung einer zweiten Kryofalle durch die beim System SUGAR offensichtlich geringer ausgeprägten Parameterdriften, gut durch Kalibration kompensieren lässt.

Ebenso wäre der Einsatz eines Zeitsynchronisationssystemes sehr hilfreich, wodurch die Zuordnung der gemessenen Daten wesentlich vereinfacht wird, was eine einfache automatisierte Auswertung ermöglicht.

## 4.2 COS-Austausch zwischen Vegetation und Atmosphäre unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration

Wie schon von anderen Autoren festgestellt wurde, beeinflusst die Vegetation aufgrund ihrer Fähigkeit zur COS-Aufnahme die globale Senkenstärke für atmosphärisches COS.

Die Messergebnisse aus Kapitel 3.2 der vorliegenden Arbeit unterstützen die Hypothese von Goldan et al., (1988); Kluczewski et al., (1987); Kesselmeier & Merk, (1993); Kesselmeier et al., 1993; Huber, (1994); Kuhn, (1997), dass COS ebenso wie CO<sub>2</sub> durch die Stomata aufgenommen wird. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen an *Quercus ilex* L. und *Fagus sylvatica* L. zeigen, dass die Aufnahme streng mit der Strahlungsintensität, der CO<sub>2</sub>-Assimilation, der H<sub>2</sub>O-Transpiration und somit mit der photosynthetischen Aktivität der Pflanze korreliert ist.

Die COS-Austauschrate der untersuchten Spezies *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration zeigen bei Zunahme der COS-Umgebungskonzentration einen betragsmässigen Anstieg der COS-Aufnahme. Diese Abhängigkeit wurde ebenfalls von anderen Autoren beobachtet und publiziert (Goldan et al., 1988; Kesselmeier & Merk, 1993; Huber, 1994).

Die Tabelle 42 präsentiert eine Übersicht über sowohl in dieser Arbeit experimentell ermittelten als auch bereits publizierten COS-Depositionsgeschwindigkeiten von verschiedenen Spezies. Da die Untersuchungen nicht unter gleichen physiologischen Bedingungen durchgeführt wurden, enthält die Tabelle ausserdem noch die Werte der COS-Umgebungskonzentration in ppt und der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) in  $\mu\text{E}/(\text{s m}^2)$ .

Pflanze	$V_{DCOS}$ in mm/s	PAR mE/(s m <sup>2</sup> )	[COS] in ppt	Quelle
<i>Fagus sylvatica</i>	0,65	600	600	eigene Messungen
<i>Quercus ilex</i>	0,64	600	600	eigene Messungen
<i>Quercus agrifolia</i>	0,57	170	-	Kuhn et al., 1999
<i>Picea abies</i>	0,51	350	465	Huber, 1994
<i>Zea mays</i>	0,69	150-1200	350-900	Kesselmeier & Merk, 1993
<i>Brassica napus</i>	1,34	600	50-900	Kesselmeier & Merk, 1993
<i>Glycine max</i>	1,54	400	125 000	Taylor et al., 1983
<i>Phaseolus vulgaris</i>	0,68	400	125 000	Taylor et al., 1983
<i>Lycopersicum escl.</i>	0,4	400	125 000	Taylor et al., 1983
Ryegrass	0,43	350	370	Klucewski et al., 1983
Gemüse	0,25	350	370	Klucewski et al., 1985
Salat	0,14	350	370	Klucewski et al., 1985
Ryegras	0,38	350	370	Klucewski et al., 1985
<i>Glycine max</i>	0,7	600	700-1500	Goldan et al., 1988
<i>Zea mays</i>	1,13	600	700-1500	Goldan et al., 1988
<i>Medicago sativa</i>	1,54	600	700-1500	Goldan et al., 1988
<i>Triticum aestivum</i>	1,61	600	700-1500	Goldan et al., 1988

**Tabelle 42: COS-Depositionsgeschwindigkeiten an verschiedenen Pflanzen**

Einige Depositionsgeschwindigkeiten mussten aus den Transportwiderständen ( $R_{COS}$ ), die aus der Literatur entnommen wurden, berechnet werden. Die Berechnung der Depositionsgeschwindigkeit aus dem Transportwiderstand erfolgt einfach nach der Gleichung G32 durch Bilden des reziproken Wertes.

$$v_{DCOS} = \frac{1}{R_{COS}} \quad (G 32)$$

Die Werte für *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. repräsentieren die Medianwerte aller gemessenen Depositionsgeschwindigkeiten bei atmosphärischer COS-Umgebungskonzentration. Die gemessenen COS-Depositionsgeschwindigkeiten für *Quercus ilex* L. und *Fagus sylvatica* L. liegen im selben Bereich wie die bereits von Huber, (1994) und Kuhn et al (1999), Kesselmeier & Merk (1993), Goldan et. al. 1988, Taylor et. al. (1983) publizierten Werte.

Bemerkenswert ist, dass die Tabelle 42 eine Abhängigkeit der COS-Depositionsgeschwindigkeit von der COS-Umgebungskonzentration dokumentiert. Welcher Art diese Abhängigkeit ist, welche Parametern sie beeinflussen und ob Sättigungseffekte ab einer bestimmten COS-Umgebungskonzentration eine Rolle spielen, ist bis jetzt nicht untersucht worden. Es soll auch nicht weiter Gegenstand dieser Arbeit sein, da in dieser Arbeit versucht wurde, die COS-Umgebungskonzentration annähernd konstant zu halten, und nicht wie bei Taylor et al., (1983) systematisch variiert wurde. Für detailliertere und zuverlässige Aussagen zu dieser Abhängigkeit ist eine andere Versuchsplanung notwendig.

Diese Tabelle weist aber auch darauf hin, dass es immer noch relativ wenig Spezies gibt, bei denen der COS-Austausch experimentell analysiert wurde. Für eine präzisere Analyse der Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Atmosphäre innerhalb der Schwefelkreislaufes sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Angaben zu COS-Depositionsgeschwindigkeiten von typischen Spezies verschiedener Klimazonen zu komplettieren. Es ist zu erwarten, dass bei einer weiteren Komplettierung dieser Tabelle, die Variation der COS-Austauschparameter zwischen den Spezies ebenso vielfältig wie die Assimilationsparameter ist. Zur Anschauung seien die Assimilationsparameter einiger ausgewählter Spezies tabellarisch angegeben.

Die Tabelle (43) präsentiert eine Übersicht über CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten verschiedener Spezies, die aus Angaben von Willert et al., (1995) ermittelt wurden und die durch die eigenen gemessenen CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten komplettiert wurde. Die CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten wurden aus der CO<sub>2</sub>-Assimilation in [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] und einer angenommenen natürlichen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration von 350 bis 400 ppm CO<sub>2</sub> berechnet.

Vegetationseinheit	V <sub>DCO2</sub> [mm/s]
Boreale Zone, Insel Sandskär, Nordschweden <i>Elymus arenarius</i> <i>Honckenya peploides</i> <i>Lathyrus maritimus</i> <i>Vaccinium vitis idaea</i>	1,19-1,042 1,402-1,226 1,37-1,198 0,371-0,325
Gemässigte Zone, Deutschland <i>Acer campestre</i> <i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Prunus spinosa</i> <i>Fagus sylvatica</i>	0,525-0,459 0,122-0,106 0,198-0,174 0,71-0,622 0,278 *
Mediterrane Zone, Fynbos, Südafrika <i>Erica mammosa</i> <i>Leucospermum parile</i> <i>Phylica stipularis</i> <i>Protea acaulus</i> <i>Selago spec</i> <i>Thamnochortus punctatus</i> <i>Quercus ilex</i>	0,294-0,258 0,48-0,42 0,614-0,538 0,33-0,291 0,96-0,84 0,518-0,454 0,31 *
Subtropische Wüste, Namib, Namibia <i>Augea capensis</i> <i>Codon royenii</i> <i>Forskaolea candida</i> <i>Rhus populifolia</i> <i>Weltwitschia mirabilis</i> <i>Zygophyllum prismatocarpum</i>	0,122-0,106 1,299-1,137 0,883-0,773 0,134-0,118 0,218-0,19 0,064-0,056
Dornbuschsavanne, Namibia <i>Acacia karroo</i> <i>Acacia nebrownii</i>	0,755-0,661 0,538-0,47

**Tabelle 43: CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten von verschiedenen Spezies (Willert et al., 1995); (mit \* gekennzeichneten Werte ... eigene Messungen)**

Die Angaben in dieser Tabelle verdeutlichen, dass die Pflanzen abhängig von Klimazonen unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten aufweisen. Das lässt vermuten, dass auch der COS-Austausch stark von Spezies zu Spezies variiert. Die gemessenen CO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten für *Quercus ilex* L. und *Fagus sylvatica* L. liegen im selben Bereich wie die aus Literaturangaben von Willert et. al (1995) berechneten Werte für Pflanzen vergleichbare Standorte. Der Vergleich der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und CO<sub>2</sub> zeigt, dass die Depositionsgeschwindigkeit von COS höher ist, was wahrscheinlich durch die höhere Affinität der Pflanzen zu COS begründet ist. (Kesselmeier & Merk, 1993).

### 4.3 Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf den COS-Austausch von *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L.

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf den experimentell ermittelten COS-Austausch von *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. anhand der Approximationen, die per linearer Regression gewonnen wurden, analysiert. Grundsätzlich bestätigen die Ergebnisse dieser Arbeit die bereits in anderen Arbeiten festgestellte lineare Abhängigkeit zwischen der COS-Umgebungskonzentration und dem COS-Austausch. Die im Kapitel 1 vorgestellte Arbeitshypothese, dass höhere Pflanzen wahrscheinlich mit einer Abnahme des COS-Austausches auf ein erhöhtes CO<sub>2</sub>-Angebot reagieren, wird durch die vorliegenden Ergebnisse zumindest an einer Spezies statistisch signifikant bestätigt.

#### 4.3.1 Auswirkung auf den COS-Austausch von *Fagus sylvatica* L.

Die Abbildung 44 bis 46 stellen die ermittelten Regressionsgeraden des COS-Austausches in Abhängigkeit von der COS-Umgebungskonzentration von *Fagus sylvatica* L. der Jahre 1998 und 1999 unter 350 ppm und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration dar.

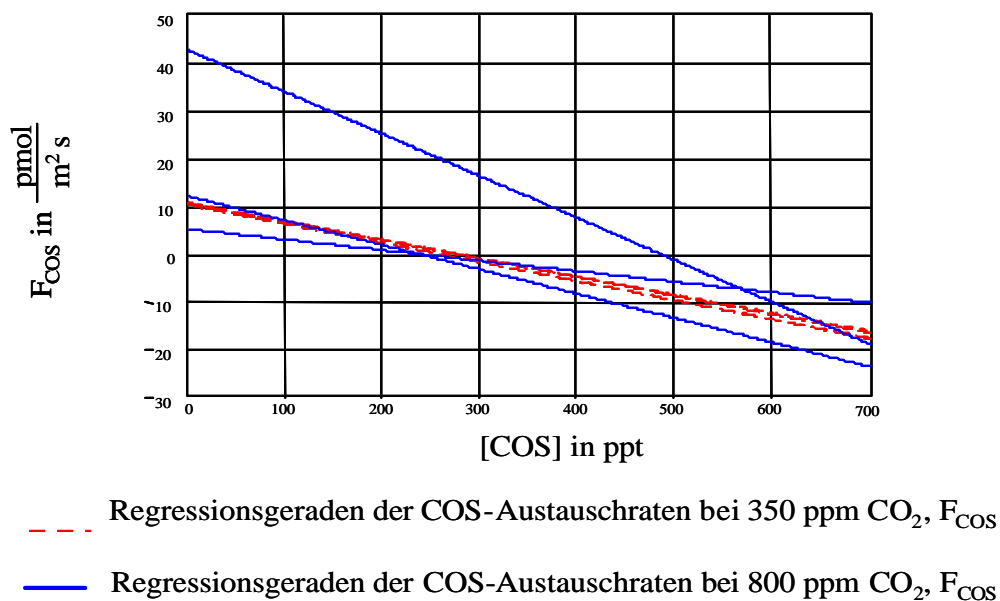
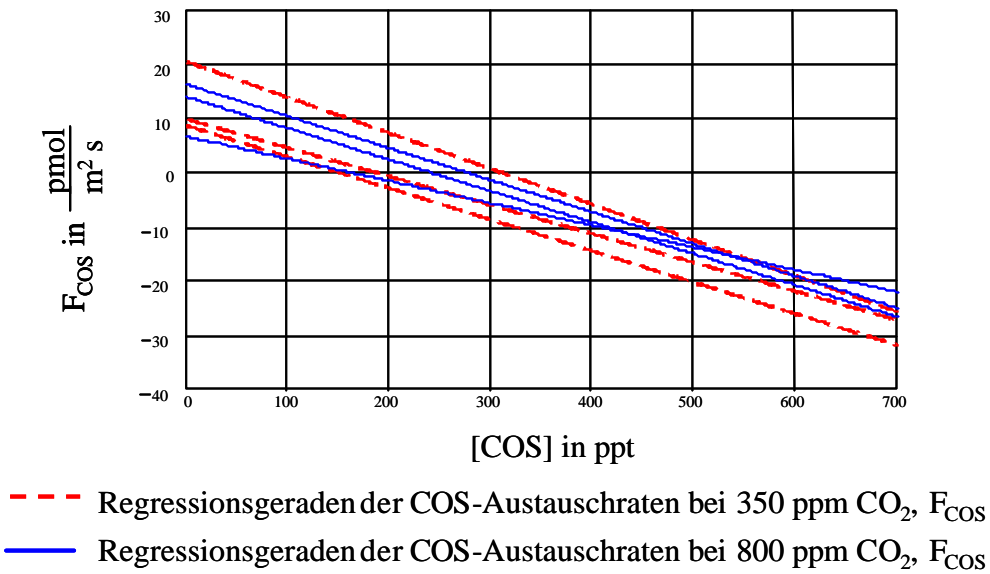
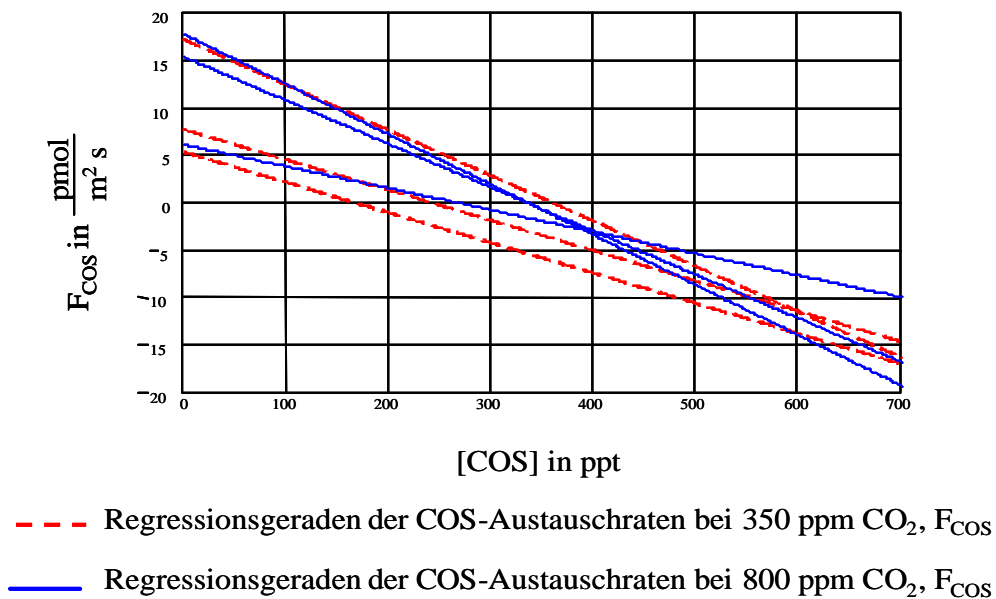


Abb 44: Regressionsgeraden des COS-Austausches von *Fagus sylvatica* L. im Jahr 1998



**Abb 45: Regressionsgeraden des COS-Austausches von *Fagus sylvatica* L. Sommer 1999**



**Abb 46: Regressionsgeraden des COS-Austausches von *Fagus sylvatica* L. Herbst 1999**

Die Abbildungen 44 bis 46 zeigen bei allen untersuchten Individuen von *Fagus sylvatica* L. grundsätzlich die gleiche Korrelation zwischen dem COS-Austausch und der COS-Umgebungskonzentration. Mit Zunahme der COS-Umgebungskonzentration steigt auch der COS-Austausch, in diesem Fall die COS-Aufnahme.

Auffällig ist jedoch bei allen Messreihen ( siehe Kapitel 3.4.1) , dass die Parameter der Regressionsgeraden der Messreihen der Bäume unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration stärker streuen als die Parameter unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Das deutet grundsätzlich darauf hin, dass bei *Fagus sylvatica* L. auch unter Feldbedingungen starke Parameterschwankungen zu erwarten sind und dass eventuell andere Faktoren, wie beispielsweise Standort- oder Nährstoffsituation sich wahrscheinlich dominanter auf den COS-Austausch auswirken als eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

Bei den Messreihen mit dieser Spezies konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen unter 350 und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration festgestellt werden.

#### 4.3.2 Auswirkung auf den COS Austausch von *Quercus ilex* L.

Die Abbildung 47 bis 49 stellt die ermittelten Regressionsgeraden des COS-Austausches in Abhängigkeit von der COS-Umgebungskonzentration von *Quercus ilex* L. in den Jahren 1998 bis 2000 unter 350 ppm und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration dar.

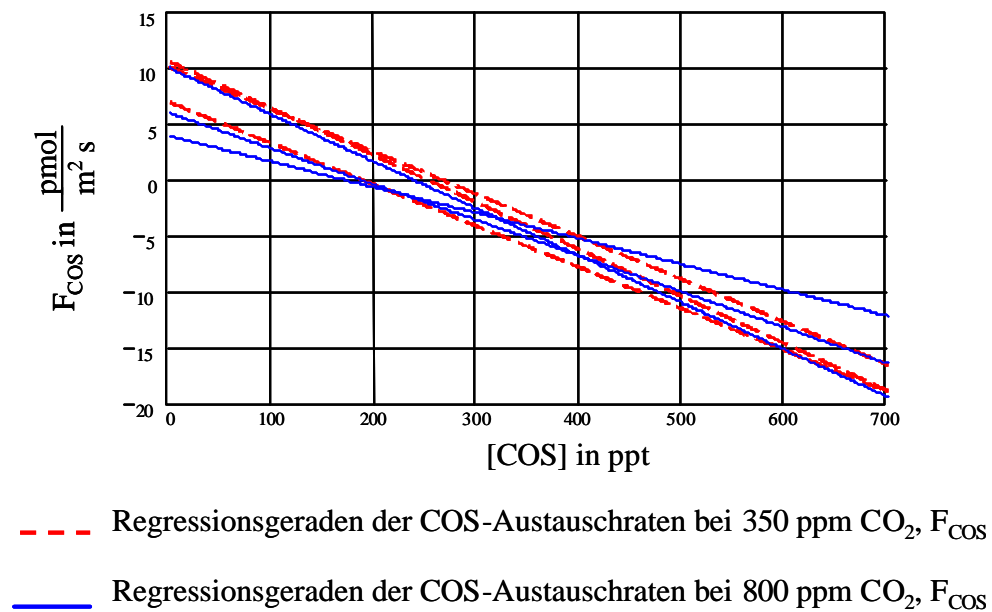


Abb 47. Regressionsgeraden des COS-Austausches von *Quercus ilex* L. Sommer 1998

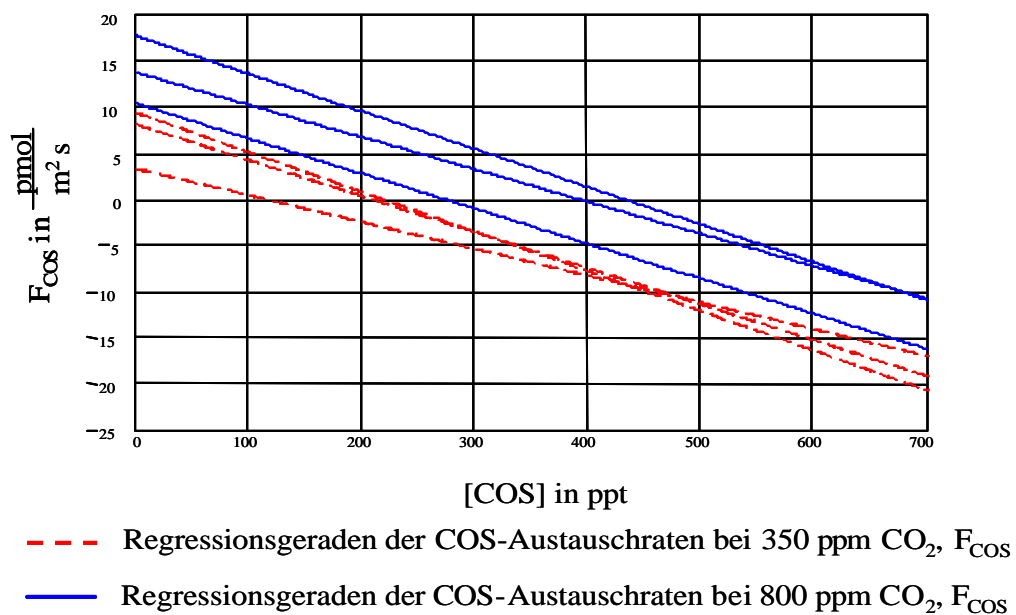
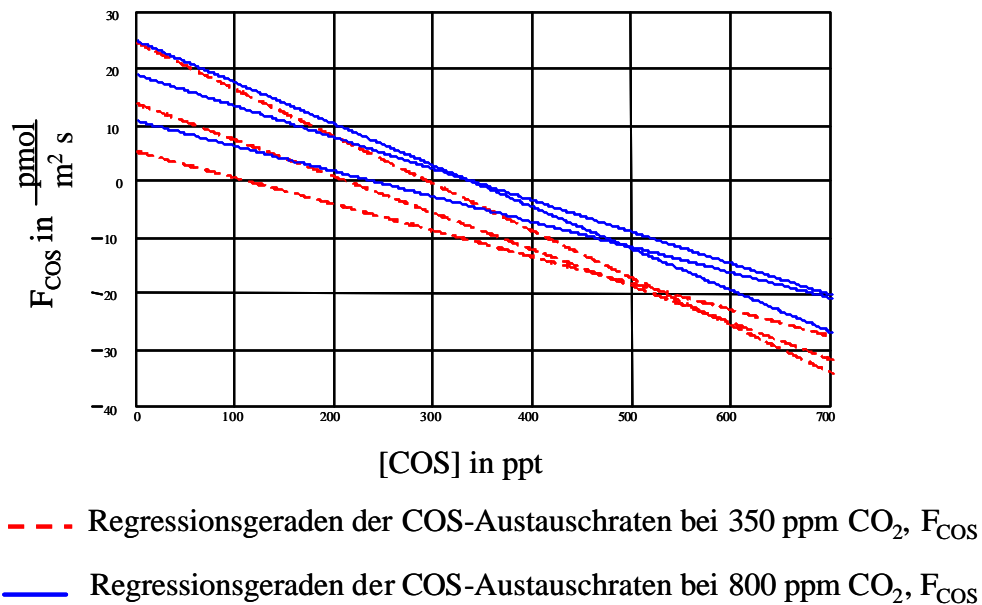


Abb 48: Regressionsgeraden des COS-Austausches von *Quercus ilex* L. Sommer 1999



**Abb 49: Regressionsgeraden des COS-Austausches von *Quercus ilex* L. im Jahr 2000**

Die Abbildungen zeigen bei allen untersuchten Individuen von *Quercus ilex* L. grundsätzlich die gleiche Korrelation zwischen dem COS-Austausch und der COS-Umgebungskonzentration wie bei *Fagus sylvatica* L. Mit Zunahme der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration steigt auch der COS-Austausch, in diesem Fall die COS-Aufnahme. Es ist ebenso wie bei *Fagus sylvatica* L. auffällig, dass die Parameter der Regressionsgeraden der Bäume unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration stärker streuen, als die Parameter der Regressionsgeraden der Bäume unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration (siehe kapitel 3.4.2 ).

Aus den Abbildungen 48 und 49 ist gut erkennbar, dass sich die Kompensationspunkte bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration nach rechts verschoben haben, was bereits von Kesselmeier und Merk (1993) als Zeichen einer geringeren Aufnahme gedeutet wurde.

Die Abbildungen 44 und 45 zeigen eindrucksvoll, dass sich die experimentell ermittelten COS-Austauschraten der Bäume der einzelnen Gruppen statistisch voneinander unterscheiden. Diese Messreihen stützt die anfangs aufgestellte Arbeitshypothese, dass die Bäume unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration mit einer Reduktion der COS-Aufnahme reagieren können, mit statistischen Mitteln ab.

### 4.3.3 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Verhalten des COS-Austausches von *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration zeigen auch bei den Approximierten Verläufen deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Während die Analyse bei *Fagus sylvatica* L. die Arbeitshypothese, dass die höhere Vegetation unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration mit einer Reduktion der COS-Aufnahme reagiert, nicht stützt, zeigen die Untersuchungen an *Quercus ilex* L. eine statistisch signifikante Abnahme der COS-Aufnahme und liefert einen Beweis für diese Hypothese.

Die Verschiebung des Kompensationspunktes kann als ein Indikator für die Anpassung der Pflanzen an eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration gewertet werden. Deshalb seien zunächst zu Vergleichszwecken die Kompensationspunkte verschiedenen untersuchten Spezies unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration von in der Tabelle 44 zusammengefasst.

Spezies	KP ppt	Methode	Quelle
<i>Zea mays</i>	0 – 328	Küvette	Kesselmeier & Merk 1993
<i>Brassica napus</i>	60 – 135	Küvette	Kesselmeier & Merk 1993
<i>Triticum aestivum</i>	115	Küvette	Huber, B. 1994
<i>Triticum aestivum</i>	518	Küvette	Huber, B. 1994
<i>Picea abies</i> , 10 Jahre	400 – 515	Küvette	Huber, B. 1994
<i>Picea abies</i> , 80 Jahre	124		Huber, B. 1994
<i>Picea abies</i> , 110 Jahre	250 – 350	REA	Xu, 2000
<i>Fagus sylvatica</i> L., 4-5 Jahre	150 – 359	Küvette	Diese Arbeit
<i>Quercus ilex</i> L., 4-5 Jahre	109 – 293	Küvette	Diese Arbeit

**Tabelle 44 : COS-Kompensationspunkte (KP) in ppt verschiedener Spezies unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration**

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den angegebenen Kompensationspunkten für *Fagus sylvatica L.* und *Quercus ilex L.* um einen aus der Regressionsgeraden extrapolierte Werte handelt.

Die Tabelle (45) enthält die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ermittelten Kompensationspunkte für COS für die in dieser Arbeit analysierten Spezies *Fagus sylvatica L.* und *Quercus ilex L.* Da die Messergebnisse sich aus statistischen Gründen nicht zu einem repräsentativen Mittelwert zusammenfassen liessen (siehe Kapitel 3) enthält die Tabelle die durch Minimum und Maximum eingegrenzten Bereiche der extrapolierten Kompensationspunkte.

Spezies	KP in ppt	
	350 ppm [CO <sub>2</sub> ]	800 ppm [CO <sub>2</sub> ]
<i>Fagus sylvatica L.</i> , 4-5 Jahre	150 – 359	162 - 497
<i>Quercus ilex L.</i> , 4-5 Jahre	109 – 293	172 - 429

**Tabelle 45: COS-Kompensationspunkte (KP) in ppt unter natürlicher (350ppm) und erhöhter (800 ppm) CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration**

Die Ergebnisse von *Fagus sylvatica L.* und *Quercus ilex L.* unter natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration liegen im selben Bereich wie bereits publizierte Werte der COS-Kompensationspunkte.

Aus der Tabelle 45 ist ersichtlich, dass sich sowohl die Minima als auch die Maxima aller extrapolierten Kompensationspunkte erhöht haben, was als ein Indikator für eine mögliche Anpassung der Pflanze an eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration gewertet wird.

#### 4.4 Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Aktivität des Enzyms Carboanhydrase bei höheren Pflanzen

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf die Aktivität des Enzyms Carboanhydrase bei *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. diskutiert. Wie in Kapitel 1 bereits ausgeführt wurde, spielt Carboanhydrase nicht nur bei den Austauschprozessen von CO<sub>2</sub>, sondern auch von COS eine aktive Rolle (Chengelis & Neal, 1979, 1980; Miller et. al., 1989). Es wird als Schlüsselenzym für die COS-Austauschprozesse bei höheren Pflanzen angesehen (Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs & Kesselmeier, 1992; Protoschill-Krebs et. al., 1996).

Im Rahmen von Untersuchungen zum Anstieg der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration und dessen Einfluss auf die Aktivität des Enzyms Carboanhydrase fanden Porter und Grodzinski, (1984) an *Phaseolus vulgaris* L. cv Seafer eine Reduktion der Aktivität von CA in älteren Blättern um 95 %, und der Initial-Aktivität von Rubisco unter 1200 ppm CO<sub>2</sub> um 40 %. Die Autoren erklären, dass Carboanhydrase eine Hauptrolle bei der Erhöhung der Effizienz bei der CO<sub>2</sub>-Fixierung unter niedrigem CO<sub>2</sub>-Angebot spielt. Die Ergebnisse bzgl. der Reduktion der Aktivität der Carboanhydrase unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration stimmen mit denen von Chang, (1975) und Arakelyan et al., (1993) publizierten Beobachtungen überein. Auch Arakelyan et al., (1993) stellten in ihren Untersuchungen an *Gosypium hirsutum* L. und *Triticale*, cv. Vose-1, eine Reduktion der Aktivität der Carboanhydrase unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration fest. Ebenso identifizierten Protoschill-Krebs et al., (1995) in Untersuchungen zum COS Austausch an *Chlamydomonas reinhardtii* unter zwei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen eine Reduktion der COS-Aufnahme sowie der Menge der Carboanhydrase unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration. Beeson und Graham, (1991) konnten im Gegensatz dazu an *Rosa x hybrida* "Red success" keine Beeinflussung der Aktivität der CA oder Rubisco durch eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration feststellen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit an *Quercus ilex* L. zeigen im Sommer 1999 eine Reduktion der Aktivität der Carboanhydrase unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration (800 ppt) im Vergleich zu den Bäumen, die unter normaler (350 ppm) CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen aufgezogen wurden. Diese auf einem Mittelwertsvergleich beruhenden Daten vom Sommer 1999 stützen die Hypothese, dass die Aktivität der

Carboanhydrase unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration reduziert werden kann. Der Vergleich der Mittelwert der Aktivität der Carboanhydrase an *Fagus sylvatica* L. zeigten keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Bäumen, die unter 350 ppm und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration aufgezogen wurden. Dieses Ergebnis stimmt mit den oben erwähnten Ergebnissen von Beeson und Graham, (1999) überein, die ebenfalls keinen Unterschied feststellen konnten.

Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration haben die Pflanzen offensichtlich genügend CO<sub>2</sub> zur Verfügung, um die Photosynthese bei gleichbleibender Rate aufrechtzuerhalten, ungeachtet dessen, ob sich die Aktivität der Carboanhydrase reduziert. Das gestiegene CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Verhältnis favorisiert die Carboxylase-Aktivität von Rubisco gegenüber der Oxygenase-Aktivität und limitiert dadurch die photorespirative Freisetzung von CO<sub>2</sub>. (Espie & Coman, 1985; Murray, 1997).

Cowan, (1986) sowie Price et al., (1993) postulieren, dass bei C<sub>3</sub>-Pflanzen durch die Partizipation von Carboanhydrase die Diffusion von CO<sub>2</sub> durch das Chloroplastenstroma erleichtert wird. Bei einer Reduktion oder Abwesenheit von Carboanhydrase ist es möglich, dass die Photosynthese davon nahezu unbeeinflusst ist, weil offensichtlich noch genügend CO<sub>2</sub> in die Chloroplasten diffundiert und Rubisco die CO<sub>2</sub>-Versorgung übernimmt. Eine Reduktion der Carboanhydrase behindert dann nur noch die COS-Austauschprozesse. Das belegen die Ergebnisse der Analysen der Aktivität der Carboanhydrase bei *Quercus ilex* L. 1999. In der Literatur wird ausserdem beschrieben, dass Rubisco unter einer erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration in den meisten Fällen ebenfalls eine Abnahme der Aktivität zeigt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und der Literaturanalyse belegen, dass nicht alle C<sub>3</sub>-Pflanzen gleich auf eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration reagieren. Für ein tieferes Verständnis des Einflusses einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf die Aktivität der Carboanhydrase sind dafür weitere Untersuchungen notwendig.

#### 4.5 Analyse und Korrektur der Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation

Um die eigenen Untersuchungsergebnisse für eine globale Prognose einer erhöhten  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration möglichst effizient zu nutzen, ist es zunächst notwendig, die zur Zeit veröffentlichten Methoden der Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation unter natürlichen Bedingungen, d.h. natürlicher momentaner  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, zu analysieren. Im Zuge dieser Analyse wird eine präzisere Methode für die Ermittlung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation entwickelt.

Die bislang publizierten COS-Senkenstärken der Vegetation differieren sehr stark von Autor zu Autor und besitzen ausserdem sehr große Streubereiche. Grundsätzlich wurden in der Literatur für die Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation zwei verschiedene Methoden offen gelegt. Die Methoden wurden von Brown und Bell, (1986) und Chin und Davis, (1993) erstmals publiziert. Sie werden nach der Analyse am Ende dieses Abschnittes in geeigneter Weise so miteinander kombiniert, dass mit der daraus resultierenden neuen Schätzgleichung eine Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke möglich wird.

Die erste Methode gemäss Brown und Bell, (1986) benötigt folgende Daten für die Ermittlung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation,  $J_{\text{COS}}$  in  $\text{Tg/a}$ :

- $A_{\text{Spezies}}$ ...von „aktiver“ Vegetation bedeckte Fläche  $\text{km}^2$
- $I_{\text{Blatt}}$ ...jährlicher Mittelwert des Blattflächenindex der Vegetation
- $c_{\text{COS}}$ ...COS-Umgebungskonzentration in ppt
- $v_g$ ...resultierende Depositionsgeschwindigkeit für die gesamte Vegetation in  $\text{mm/s}$

In erster Näherung lässt sich mit der zugeschnittenen Grössengleichung G32 die globale COS-Senkenstärke  $J_{\text{COS}}$ , wie folgt ermitteln:

$$J_{COS} = K_E \cdot A \cdot I_{Blatt} \cdot c_{COS} \cdot v_g$$

$$\begin{array}{rcl}
 K_E & = & 8.7 \cdot 10^{-14} \\
 A & \text{in} & km^2 \\
 \text{mit} & & \\
 c_{COS} & \text{in} & pptv \\
 v_g & \text{in} & m/s \\
 J_{COS} & \text{in} & Tg/a
 \end{array}
 \tag{G32}$$

Brown und Bell, (1986) beziffern nach dieser Methode die globale COS-Senkenstärke der Vegetation ( $J_{COS}$ ) auf Werte im Bereich von 2-5 Tg<sub>COS</sub> pro Jahr. Dabei verwendeten sie in Gleichung 32 die folgenden Parameter:

$$\begin{array}{rcl}
 A & = & 8 \cdot 10^{13} \quad km^2 \\
 c_{COS} & = & 500 \quad pptv \\
 I_{Blatt} & = & [2 \quad \dots \quad 5] \\
 v_g & = & 0.00029 \quad m/s
 \end{array}$$

Diese Abschätzung hat einen grossen Streubereich, der vor allem auf den Ungewissheiten der folgenden globalen Vegetationsparametern beruht:

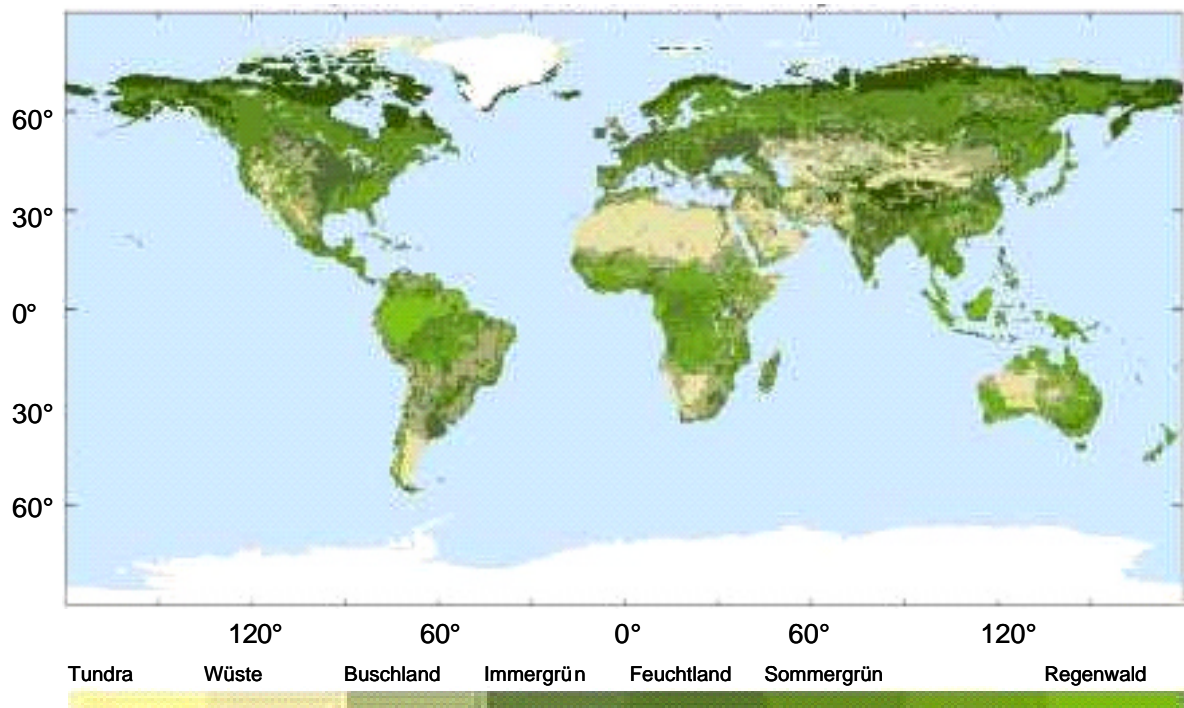
- $v_g$ ...resultierende Depositionsgeschwindigkeit für die gesamte Vegetation
- $I_{Blatt}$ ...resultierender Blattflächenindex der gesamten Vegetation.

Eine Möglichkeit, die Unsicherheiten einzugrenzen und zu bewerten, besteht in einer stärker detaillierten Analyse der Vegetationsparameter. Hierzu wird die Vegetation in verschiedene Gruppen unterteilt. In dieser Arbeit wird die Unterteilung in 14 Vegetationsgruppen nach Whittaker und Likens, (1975) bzw. Woodwell, (1996) verwendet:

- Tropische Regenwälder
- Regenrüne Wälder
- Sommergrüne Wälder
- Immergrüne Wälder
- Temperate Wälder
- Boreale Wälder
- Trockenbusch und Hartlaubgehölze
- Savannen

- Wiesen und Steppen
- Tundra und Gebirge
- Strauchwüsten
- Trockenwüsten, Eis
- Landwirtschaftliche Pflanzen
- Sümpfe und Marschen.

Die Abbildung 50 gibt einen visuellen Überblick über die globale Verteilung der Vegetationsgruppen.



**Abbildung 50: Globale Verteilung der Vegetation in Anlehnung an Ganzefeld (2001)**

Den bedeutendsten Anteil an der Nettoprimärproduktion (NPP) und somit an der CO<sub>2</sub>-Fixierung haben mit einer Gesamtfläche von ca.  $20,5 \times 10^6 \text{ km}^2$  und einer NPP von  $23,2 \text{ Pg C/a}$  die tropischen Regenwälder und die regengrünen Wälder. Die Savannen und borealen Nadelwälder haben mit einer Gesamtfläche von ca.  $27,5 \times 10^6 \text{ km}^2$  und einer NPP von  $10,4 \text{ Pg C/a}$  ebenfalls einen Hauptanteil an der CO<sub>2</sub>-Fixierung. Wobei allein auf Sibirien ca. 50 % der CO<sub>2</sub>-Fixierung der borealen Wälder kommt (Shviddenko & Nilson, 1994; Wilske, 2001). Das Kulturland leistet bei einer Gesamtfläche von ca.  $14 \times 10^6 \text{ km}^2$  einen Beitrag von ca.  $4,1 \text{ Pg C/a}$ . Aus diesen einfachen Betrachtungen ist ersichtlich, dass für eine exaktere Abschätzung der globalen Spurengasflüsse auf keinen Fall experimentell ermittelte Vegetationsparameter repräsentativer Vertreter dieser Vegetationstypen fehlen sollten.

Für die Identifikation bedeutender Fehlerbeiträge in der Abschätzung wird in der weiteren Analyse die jeweilige COS-Senkenstärke für die oben genannten Vegetationstypen, mit Hilfe der im Kerngedanken sehr allgemeinen Schätzgleichung (G32), ermittelt. Hierfür werden die resultierenden Vegetationsparameter für den entsprechenden Vegetationstyp nach Whittaker & Likens, (1975) verwendet:

- $I_{\text{BlattVT}}$  ...resultierender Blattflächenindex des Vegetationstyps
- $A_{\text{VT}}$ ... „aktive“ - mit dem jeweiligen Vegetationstyp bedeckte - Fläche.

Um die Schwäche dieses Verfahrens deutlich zu zeigen, wird in dieser Analyse für die resultierende Depositionsgeschwindigkeit der Vegetation der gleiche Wert von Brown und Bell, (1986)  $v_g=0,00029$  m/s genutzt.

Die Tabelle 46 enthält die nach (G32) ermittelten einzelnen COS-Senkenstärken der oben genannten Vegetationstypen ( $J_{\text{COSVT}}$ ) sowie die bereits bekannten spezifischen Vegetationsparameter für  $I_{\text{BlattVT}}$  und  $A_{\text{VT}}$  nach Whittaker und Likens, (1975) und Woodwell, (1996).

Vegetationstyp	$A_{\text{VT}}$ $10^6 \text{ km}^2$	$I_{\text{BlattVT}}$	$J_{\text{COSVT}}$ $\text{Tg/a}$
<b>Tropische Regenwälder</b>	17,0	6-16	1,287...3,43
<b>Regengrüne Wälder</b>	7,5	5	0,473
<b>Sommergrüne Wälder</b>	7,0	3-12	0,265...1,06
<b>Immergrüne Hartlaubwälder</b>	5,0	5-14	0,315...0,88
<b>Boreale Nadelwälder</b>	12	7-15	1,060...2,27
<b>Trockenbusch &amp; Hartlaubgehölze</b>	8,5	4-12	0,429...1,29
<b>Savannen</b>	15	1-5	0,189...0,95
<b>Wiesen &amp; Steppen (gemäßigte Zone)</b>	9	3,6	0,409
<b>Tundren &amp; alpine Wiesen</b>	8	0,5-2,5	0,050...0,25
<b>Strauchwüsten (Dornenhölzer)</b>	18	1	0,227
<b>Trockenwüsten (Fels, Sand), Eis</b>	24	0,05	0,015
<b>Kulturland (Landwirtschaft)</b>	14	4 -12	0,706...2,12
<b>Sümpfe &amp; Marschland</b>	2,0	7	0,177
<b>Seen &amp; Flüsse</b>	2,0	0	0
<b>Kontinente gesamt [min...max]</b>	<b>149,0</b>	<b>4,3</b>	<b>8,08 [5,602...12,2]</b>

**Tabelle 46: COS-Senkenstärke der Vegetation berechnet nach Formel (G32).**

Aus den Minima und Maxima der einzelnen COS-Senkenstärken der verschiedenen Vegetationstypen ( $J_{COSVT}$ ) wurde zu Kontrollzwecken durch Summation der einzelnen Beiträge der Bereich der resultierenden COS-Senkenstärken der gesamten Vegetation ermittelt.

$$J_{COS} = J_{COSVT1} + J_{COSVT2} + \dots + J_{COSVTN} \quad (G33)$$

Es ist in der Tabelle zu sehen, dass die Abschätzungen der gesamten Vegetation bzw. der Kontinente weit über den publizierten Werten von Brown & Bell, (1986) und Chin & Davis, (1993) liegen. Für eine Präzisierung der Abschätzung auf der Basis der Gleichung (G32) wären in diesem Fall unbedingt genauere Angaben zu den Depositionsgeschwindigkeiten von COS und dem Blattflächenindex notwendig. Eine weitere Ursache der starken Abweichung, wird in der Verwendung des spezifischen Koeffizienten  $K_E = 8,7 \times 10^{-14}$ , dessen Herkunft in der Publikation von Brown & Bell, (1986) nicht weiter erklärt wird, gesehen. Offensichtlich ist er auf die verwendete photosynthetisch aktive Erdoberfläche von  $A = 80 \times 10^6 \text{ km}^2$  abgestimmt. Damit ist die Gleichung G32 in der vorgestellten Form für weitere Untersuchungen, die auf einer Erhöhung des Detaillierungsgrades beruhen, grundsätzlich nicht geeignet. Jedoch wird der Ansatz, die Nutzung der Depositionsgeschwindigkeit von COS, später bei der Korrektur der Schätzgleichungen für die globale COS-Senkenstärke der Vegetation weiterverwendet.

Die andere Möglichkeit die globale COS-Senkenstärke der Vegetation abzuschätzen, wird in Chin und Davis, (1993) vorgeschlagen. Die Abschätzung der COS-Aufnahmerate erfolgt wie bereits im Kapitel 1 erwähnt, nach Gleichung (G2) siehe Seite 38.

$$\Delta COS = \Delta CO_2 \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad (G34)$$

Der resultierende Wert für die globale  $CO_2$ -Assimilationsrate der gesamten Vegetation ( $\Delta CO_2$ ) wurde aus der Nettoprimärproduktion für die unterschiedlichen Ökosystemtypen wie auch für der gesamte Vegetation, aus den bereits publizierten Daten von Whittaker und Likens, (1975) und Woodwell, (1990) unter entsprechender Berücksichtigung des Verhältnisses der Massen von C und  $CO_2$ , gewonnen (siehe Tabelle 47).

Um die Abschätzungen zu präzisieren, wird diese Gleichung auf die wesentlich stärker als in Chin und Davis, (1993) detaillierten Vegetationstypen angewendet. Die Tabelle 47 enthält die nach (G2) ermittelten einzelnen COS-Senkenstärken der oben genannten Vegetationstypen ( $J_{\text{COSVT}}$ ) sowie aktualisierte spezifische Vegetationsparameter für die Nettoprimärproduktion (NPP) in Pg Kohlenstoff pro Jahr und die daraus resultierende  $\text{CO}_2$ -Assimilation,  $\Delta\text{CO}_2$ , in  $10^5$  Tg pro Jahr in Anlehnung an Whittaker und Likens, (1975) bzw Woodwell. (1996).

Vegetationseinheit	$A_{\text{VT}}$ [ $10^6 \text{ km}^2$ ]	NPP [Pg C /a]	$\text{DCO}_2$ [ $10^5 \text{ Tg/a}$ ]	$J_{\text{COSVT}}$ [Tg/a]
<b>Tropischer Regenwälder</b>	17,0	16,8	0,616	0,088
<b>Regengrüne Wälder</b>	7,5	5,4	0,198	0,028
<b>Sommergrüne Wälder</b>	7,0	3,8	0,139	0,02
<b>Immergrüne Hartlaubwälder</b>	5,0	2,9	0,106	0,015
<b>Boreale Nadelwälder</b>	12	4,3	0,158	0,023
<b>Trockenbusch &amp; Hartlaubgehölze</b>	8,5	2,7	0,099	0,014
<b>Savannen</b>	15	6,1	0,224	0,032
<b>Wiesen &amp; Steppen (gemäßigte Zone)</b>	9	2,4	0,088	0,013
<b>Tundren &amp; alpine Wiesen</b>	8	0,5	0,018	0,003
<b>Strauchwüsten (Dornenhölzer)</b>	18	0,7	0,026	0,004
<b>Trockenwüsten (Fels, Sand), Eis</b>	24	0,03	0,001	0,00001
<b>Kulturland (Landwirtschaft)</b>	14	4,1	0,15	0,021
<b>Sümpfe &amp; Marschland</b>	2,0	2,7	0,099	0,014
<b>Seen &amp; Flüsse</b>	2,0	0,4	0,015	0,002
<b>Kontinente</b>	<b>149,0</b>	<b>52,8</b>	<b>1,94</b>	<b>0,3</b>

**Tabelle 47: COS-Senkenstärke berechnet nach Formel (G34)**

Der resultierende Gesamtmittelwert, der auf Basis der Nettoprimärproduktion nach Formel G2 ermittelten COS-Senkenstärke ist mit 0,277 Tg/a kleiner als der von Chin und Davis, (1993) berechnete Mittelwert der globalen COS-Senkenstärke von 0,43 Tg/a. Er liegt aber immer noch im Bereich von 0,16...0,91 Tg/a der von den Autoren angegeben wurde. Die Ursache für die Abweichung liegt in der zugrunde gelegten globalen  $\text{CO}_2$ -Aufnahme. In

dieser Arbeit wurden aktualisierte Werte der Nettoprimärproduktion nach Woodwell, (1990) für die Berechnung der globalen CO<sub>2</sub>-Aufnahme verwendet. Der sich daraus ergebende Mittelwert der globalen CO<sub>2</sub>-Aufnahme beträgt 193000 Tg/a. Für ihre Abschätzung gehen Chin & Davis, (1993) von anderen Werten für die globale CO<sub>2</sub>-Aufnahme aus, die wiederum auf Angaben von Whittaker und Likens, (1975) sowie Atjay et al., (1979) beruhen. Die in der Publikation nicht explizit angegebenen Daten lassen sich jedoch einfach aus den angegebenen Werten zurückrechnen. Die in dieser Publikation vorausgesetzte natürliche CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration betrug 350 ppm und die COS-Umgebungskonzentration 500 ppt. Diese Daten führen zu folgenden Werten der globalen CO<sub>2</sub>-Aufnahme: Mittelwert 301000 Tg/a, Minimalwert 112000 Tg/a und Maximalwert 637000 Tg/a. Der von Chin und Davis, (1993) für die mittlere globale COS-Senkenstärke verwendete Wert der globalen CO<sub>2</sub>-Assimilation ist mit ca. 301000 Tg/a größer als der aktualisierte, für diese Berechnung genutzte Wert der globalen Netto-CO<sub>2</sub>-Assimilation von 1937000 Tg/a. Das erklärt den Unterschied zwischen beiden Abschätzungen.

Die in Tabelle 47 dargestellten Werte liegen näher an den von Goldan et al, (1988) publizierten Schätzungen (siehe Tabelle 6). Zum Anteil der Seen und Flüsse an der globalen COS-Senkenstärke sei angemerkt, dass der Beitrag der Seen und Flüsse offensichtlich zu gering ist, um in relevanter Größenordnung einen Beitrag zur globalen COS-Senkenstärke zu leisten, obwohl Untersuchungen belegen, dass sowohl das Meer- als auch das Süßwasser-Phytoplankton, in diesem Falle (*Prymnesium parvum* und *Chlamydomonas reinhardtii*) COS aufnehmen (Blezinger, 1995; Protoschill-Krebs et al., 1995).

Die in Tabelle 47 vorgestellten Abschätzungen, auf Basis eines stärkeren Detaillierungsgrades der Vegetationstypen, können jedoch noch weiter präzisiert werden. Eine genauere Analyse der von Chin und Davis, (1993) vorgeschlagenen Schätzgleichung wird zeigen, dass diese Beziehung eine Voraussetzung impliziert, die nach den Ergebnissen dieser Arbeit in der Natur nicht erfüllt ist: Die einfache Schätzgleichung (35) nach Chin und Davis, (1993) setzt implizit voraus, dass die Depositionsgeschwindigkeiten von CO<sub>2</sub> und COS annähernd gleich sind.

Für die Zwecke der Präzisierung dieser Beziehung für die Vegetationstypen werden die Zusammenhänge näher beleuchtet. Dazu wird die Gleichung G35.

$$\Delta COS = \Delta CO_2 \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad (G35)$$

durch Division durch die COS-Umgebungskonzentration [COS] wie folgt umgeformt:

$$\frac{\Delta COS}{[COS]} = \frac{\Delta CO_2}{[CO_2]} \quad (G36)$$

Diese Umformung ist unter der Voraussetzung  $[COS] \neq 0$  zulässig, was angesichts der irdischen COS-Umgebungskonzentrationen von ca. 600 ppt immer erfüllt ist. Im nächsten Schritt werden die  $CO_2$ -Aufnahmerate der gesamte Vegetation (NPP) in Tg/a in die  $CO_2$ -Assimilationsrate ( $A_{CO_2}$ ) in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ a})$  und die globale COS-Aufnahmerate der Vegetation in Tg/a in den COS-Spurengasfluss ( $F_{COS}$ ) in  $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{ a})$  umgerechnet. Hierfür werden die  $CO_2$ -Aufnahmerate und der COS-Spurengasfluss durch die gesamte Blattfläche der Vegetation und die entsprechenden molaren Massen  $M_{CO_2}$  und  $M_{COS}$  dividiert. Die gesamte Blattfläche der Vegetation lässt sich analog zur Methode von Brown und Bell, (1983) aus der Erdoberfläche (A) und dem Blattflächenindex ( $I_{\text{Blatt}}$ ) berechnen.

$$F_{COS} = \frac{\Delta COS}{M_{COS} \cdot A \cdot I_{\text{Blatt}}} \quad A_{CO_2} = \frac{\Delta CO_2}{M_{CO_2} \cdot A \cdot I_{\text{Blatt}}} \quad (G37a), (G37b)$$

Die Depositionsgeschwindigkeiten,  $v_{DCOS}$  und  $v_{DCO_2}$ , für die beiden Spurengase ergeben sich durch Division durch die entsprechenden Umgebungskonzentrationen.

$$v_{DCOS} = \frac{F_{COS}}{[COS]} = \frac{\Delta COS}{M_{COS} \cdot A \cdot I_{\text{Blatt}} \cdot [COS]} \quad (G38a)$$

$$v_{DCO_2} = \frac{A_{CO_2}}{[CO_2]} = \frac{\Delta CO_2}{M_{CO_2} \cdot A \cdot I_{\text{Blatt}} \cdot [CO_2]} \quad (G38b)$$

Weitere Umformungen führen zu:

$$\frac{\Delta COS}{[COS]} = v_{DCOS} \cdot M_{COS} \cdot A \cdot I_{\text{Blatt}} \quad (G39a)$$

$$\frac{\Delta CO_2}{[CO_2]} = v_{DCO_2} \cdot M_{CO_2} \cdot A \cdot I_{Blatt} \quad (G39b)$$

Nach G 35 gilt:

$$\frac{\Delta CO_2}{[CO_2]} = v_{DCO_2} \cdot M_{CO_2} \cdot A \cdot I_{Blatt} = \frac{\Delta COS}{[COS]} = v_{DCOS} \cdot M_{COS} \cdot A \cdot I_{Blatt} \quad (G40)$$

Eine weitere Vereinfachung führt zu:

$$v_{DCO_2} \cdot M_{CO_2} = v_{DCOS} \cdot M_{COS} \quad \text{bzw.} \quad \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}} = \frac{M_{CO_2}}{M_{COS}} \quad (G41)$$

Aus der Beziehung (G41) lässt sich leicht ablesen, dass die vereinfachte Beziehung (G35) voraussetzt, dass das Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und CO<sub>2</sub> exakt dem Reziproken des Verhältnisses der molaren Massen von CO<sub>2</sub> und COS (44/60 = 0,73) entspricht nicht ungefähr 1 wie in Chin und Davis, (1993) publiziert.

Das in der o.g. Abschätzung implizit angenommene Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten variiert außerdem zwischen den einzelnen Vegetationstypen relativ stark, was zu einem späteren Zeitpunkt anhand konkreten Zahlenmaterials noch gezeigt werden wird.

Für eine exaktere Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke auf Basis der CO<sub>2</sub>-Assimilation (Nettophotosyntheserate) ist es demnach notwendig, das vegetationstypabhängige Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten (k) für COS und CO<sub>2</sub> zu berücksichtigen.

$$k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}} = \frac{\frac{\Delta COS}{M_{COS} \cdot A \cdot I_{Blatt} \cdot [COS]}}{\frac{\Delta CO_2}{M_{CO_2} \cdot A \cdot I_{Blatt} \cdot [CO_2]}} \quad (G42)$$

Aus (G42) kann man durch Umformung die Formel (G43) herleiten, mit der man die globale COS-Senkenstärke präziser als mit der Formel (G35) ermitteln kann. Es werden folgende Eingabeparameter benötigt:

- $v_{DCOS}$ ...Depositionsgeschwindigkeit von COS in cm/s,
- $v_{DCO_2}$ ...Depositionsgeschwindigkeit von  $CO_2$  in cm/s,
- $\Delta CO_2$ ...globale  $CO_2$ -Aufnahmerate der gesamten Vegetation in Tg/a (NPP),
- $[CO_2]$ ... $CO_2$ -Umgebungskonzentration in ppm,
- $[COS]$ ...COS-Umgebungskonzentration in ppt,

$$\Delta COS = k \cdot \Delta CO_2 \frac{M_{COS}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad \text{mit} \quad k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}} \quad (G43)$$

Im Weiteren wird diese Beziehung für die Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke verwendet. Sie stellt eine Kombination der Schätzgleichungen nach Brown und Bell, (1986) und Chin und Davis, (1993) dar, da sowohl die exakten Werte der Depositionsgeschwindigkeiten als auch die Nettoprimärproduktion verwendet werden. Die notwendigen Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und  $CO_2$  werden nun exemplarisch für die in dieser Arbeit untersuchten Spezies *Fagus sylvatica* L und *Quercus ilex* L ermittelt. Den Berechnungen werden für diese Zwecke die Mittelwerte der Parameter COS-Spurenfluss und  $CO_2$ -Assimilationsrate zugrunde gelegt.

Die Tabellen 48 und 49 enthalten die ermittelten Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten ( $v_{DCOS}/v_{DCO_2}$ ) für *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter 350 ppm  $CO_2$ -Umgebungskonzentration.

	350 ppm $CO_2$		
Baum	F1	F2	F3
<i>Fagus sylvatica</i> 1998	2,76	1,96	1,55
<i>Fagus sylvatica</i> Sommer 1999	2,35	2,85	3,43
<i>Fagus sylvatica</i> Herbst 1999	1,93	1,67	2,45

**Tabelle 48:** Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten ( $v_{DCOS}/v_{DCO_2}$ ) von *Fagus sylvatica* L. unter 350ppm  $CO_2$ -Umgebungskonzentration

Baum	350 ppm CO <sub>2</sub>		
	Q2	Q8	Q12
Quercus ilex 1998	1,85	2,36	3,23
Quercus ilex 1999	1,85	1,43	1,88
Quercus ilex 2000	3,23	1,54	2,18

**Tabelle 49:** Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten ( $v_{DCOS}/v_{DCO_2}$ ) von *Quercus ilex* L. unter 350ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration

Diese Faktoren zeigen, dass die Depositionsgeschwindigkeiten für COS wesentlich größer als die Depositionsgeschwindigkeiten für CO<sub>2</sub> sind. Die Ursache kann in der bereits angeführten höheren Affinität der pflanzlichen Prozesse für COS liegen (Protoschill-Krebs, 1991; Protoschill-Krebs et al., 1995). Das Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten ist also bei den untersuchten Spezies ca. dreimal größer als das implizit in der Schätzgleichung von Chin & Davis (1993) angenommene Verhältnis von  $k = 0,73$ .

Aus der Literatur lassen sich weitere Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und CO<sub>2</sub> ableiten. Kesselmeier et al., (1993) untersuchten COS-Spurengasflüsse tropischer Spezies (*Sacoglottis gabonensis* und *Porterandia cladantha*) in Kamerun. Aus den publizierten Daten lassen sich die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und CO<sub>2</sub> bestimmen.

Spezies	F <sub>COS</sub> in pmol/mmol <sub>CO2</sub>	A <sub>CO2</sub> in mmol/(m <sup>2</sup> h)	v <sub>DCOS</sub> in [mm/s]	v <sub>DCO2</sub> in [mm/s]	$\frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$
<i>Sacoglottis gab</i> , (7m)	-3,8	369	0,016	0,005	3,109
<i>Sacoglottis gab</i> , (45m)	-14,4	130	0,021	0,002	10,211
<i>Porterandia clad</i> ,(6m)	-1,7	1221	0,083	0,018	4,582

**Tabelle 50:** Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten ( $v_{DCOS}/v_{DCO_2}$ ) verschiedene r tropischer Spezies

Für die Berechnung wurden ebenfalls die Mittelwerte der einzelnen Größen zugrunde gelegt. Aus der Publikation ist außerdem ersichtlich, dass die analysierten Spurengaskonzentrationen

und der Spurengasaustausch der Spezies von der Höhe abhängig sind. Der COS-Spurengasfluss wurde als Relativwert zur CO<sub>2</sub>-Assimilation angegeben. Für die Berechnungen wurden folgende Umgebungskonzentrationen bei den entsprechenden Höhen verwendet: CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration in einer Höhe von 6 m 420 ppm, 7 m 450 ppm, 45 m 390 ppm. Die COS-Umgebungskonzentration wurde für alle Höhen 550 ppt verwendet .

In einer anderen Veröffentlichung diskutieren Kesselmeier und Merk (1993) Verhältnisse der COS-Aufnahmeraten und CO<sub>2</sub>-Assimilationsraten für unterschiedliche Pflanzen. Diese Verhältnisse werden nun weiter analysiert und für die Zwecke dieser Arbeit entsprechend aufbereitet und weiterverwendet.

Ausgehend von den COS-Aufnahmeraten ( $F_{COS}$ ) in pmol/ (m<sup>2</sup> s) und den CO<sub>2</sub>-Assimilationsraten ( $A_{CO_2}$ ) in μmol/(m<sup>2</sup> s) definieren und berechnen sie ein sog. Verhältnis der Austauschraten  $R_{Ass}$  und ein Verhältnis der Umgebungskonzentrationen  $R_{Amb}$ :

$$R_{Ass} = \frac{A_{CO_2}}{F_{COS}} \quad R_{Amb} = \frac{[CO_2]}{[COS]} \quad (G44a), (G44b)$$

Die Autoren nutzen diese beiden Verhältnisse, um ein weiteres Verhältnis zu bilden, anhand dessen sie grundsätzliche Eigenschaften diskutieren. Das Verhältnis  $R^*$  wird wie folgt berechnet:

$$R^* = \frac{R_{ass}}{R_{amb}} \quad (G45)$$

Analysiert man dieses in der Publikation nicht näher bezeichnete Verhältnis, lässt sich zeigen, dass der Quotient  $R^*$  dem Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten von CO<sub>2</sub> und COS entspricht.

$$R^* = \frac{R_{ass}}{R_{amb}} = \frac{\frac{A_{CO_2}}{F_{COS}}}{\frac{[CO_2]}{[COS]}} = \frac{A_{CO_2}}{F_{COS}} \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} = \frac{A_{CO_2}}{[CO_2]} \cdot \frac{[COS]}{F_{COS}} = \frac{v_{DCO_2}}{1} \cdot \frac{1}{v_{DCOS}} = \frac{v_{DCO_2}}{v_{DCOS}} \quad (G46)$$

Der Koeffizient  $R^*$  ist also genau das Reziproke des Koeffizienten  $k$ , der bereits in (G29) für die präzisere Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation eingeführt wurde. Dieses Erkenntnis erweitert die Einsatzmöglichkeiten der bislang publizierten Information zu diesem Thema. Der Koeffizient  $R^*$  lässt sich somit einfach durch Inversion in den Koeffizienten  $k$  umrechnen und direkt weiterverwenden.

Von den Autoren werden 3 Fälle, die im Zusammenhang mit dem Koeffizienten  $R$  stehen, diskutiert. Die Diskussion von Kesselmeier und Merk (1993) kann nun unter Verwendung des Zusammenhanges zwischen  $R$  und dem Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten wie folgt interpretiert vereinfacht werden:

- $R^*=1$ ...Die Depositionsgeschwindigkeiten von COS und  $CO_2$  sind gleich, was bedeutet, dass die Affinität der Pflanze für beide Spurengase gleich ist.
- $R^*>1$ ...Die Depositionsgeschwindigkeit von  $CO_2$  ist größer als die Depositionsgeschwindigkeit von COS, was bedeutet, dass die Affinität der Pflanze für  $CO_2$  ist größer als für COS.
- $R^*<1$ ...Die Depositionsgeschwindigkeit von COS ist größer als die Depositionsgeschwindigkeit von  $CO_2$ , was bedeutet, dass die Affinität der Pflanze für COS größer ist als für  $CO_2$ .

Die Tabelle 51 enthält die entsprechend umgerechneten Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und  $CO_2$  aus Kesselmeier und Merk, (1993).

Spezies	$k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$
<i>Pisum sativum</i> (nicht gedüngt)	0,40
<i>Pisum sativum</i> (gedüngt)	3,86
<i>Brassica napus</i> (gedüngt)	1,25
<i>Zea mays</i> (gedüngt)	2,86

**Tabelle 51: Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten ( $v_{DCOS}/v_{DCO_2}$ ) von unterschiedlichen Spezies unter natürlicher  $CO_2$ -Umgebungskonzentration**

Bei ausreichender Nährstofflage (gedüngt) ist das Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten stets größer als 1. Eine Erklärung dafür, dass die Depositionsgeschwindigkeit von COS in Relation zur Depositionsgeschwindigkeit von CO<sub>2</sub> größer ist, kann in der höheren Affinität der Carboanhydrase für COS im Vergleich zu CO<sub>2</sub> gesehen werden. Bei nicht ausreichender Nährstofflage (nicht gedüngt) wirken offensichtlich noch andere Prozesse, die die Depositionsgeschwindigkeit von COS in Relation zur Depositionsgeschwindigkeit von CO<sub>2</sub> kleiner werden lassen. In dieser Arbeit soll hierauf nicht weiter eingegangen werden.

Mit Hilfe des Faktors  $k$  lassen sich jetzt, unter Verwendung der modifizierten Schätzformel für die Senkenstärke von COS, exaktere Prognosen angeben. Die Tabelle 52 enthält die weiterverwendeten experimentell ermittelten Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten für die extensiv untersuchten Spezies *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L..

Spezies	$k_{\min} = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$	$k_{Median} = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$	$k_{\max} = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$
<i>Fagus sylvatica</i>	1,55	2,359	3,42
<i>Quercus ilex</i>	1,43	1,886	3,23

**Tabelle 52: Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten ( $v_{DCOS}/v_{DCO_2}$ ) von *Fagus sylvatica* und *Quercus ilex* unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration**

Mangels Verfügbarkeit von weiteren resultierenden Verhältnissen der Depositionsgeschwindigkeiten für einzelnen Vegetationstypen wurden für die folgende Berechnung der globalen COS-Senkenstärke die aus den bereits zitierten Publikationen entnehmbaren Daten der einzelnen Spezies den entsprechenden Vegetationstypen zugeordnet: Tropischer Regenwälder: *Sacoglottis gabonensis* und *Porterandia cladantha*, (Kesselmeier et al, 1993), Sommergrüne Wälder: *Fagus sylvatica* L. (eigene Messungen), Immergrüne Hartlaubwälder: *Quercus ilex* L. (eigene Messungen), Boreale Nadelwälder: *Pinus silvestris* und *Picea abies* (eigene Messungen, siehe Anhang), Kulturland (Landwirtschaft): *Pisum sativum*, *Brassica napus*, *Zea mays* (Kesselmeier & Merk, 1993). Es sei angemerkt, dass diese Zuordnung keinesfalls als optimal betrachtet werden kann und aufzeigt, dass für eine weitere Präzisierung der Abschätzung der COS-Senkenstärke weiter experimentelle Untersuchungen

in Labor und Feld notwendig sind. Insbesondere ist der Vegetationstyp tropischer Regenwald, gemessen an seinem Beitrag zur globalen COS-Aufnahme, deutlich unterrepräsentiert.

Die Vegetationstypen, bei denen die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten unbekannt sind, wurden wie folgt behandelt: Bei Trockenbusch und Hartlaubgehölzen, Savannen, Strauchwüsten und Trockenwüsten wurde davon ausgegangen, dass sie sich ähnlich wie Hartlaubgewächse verhalten. Bei diesen Vegetationstypen wurden für den Minimal- und Maximalwert des Depositionsgeschwindigkeitsverhältnisses von *Quercus ilex* L. verwendet. Der Medianwert wurde aus Minimal- und Maximalwert bestimmt. Bei Wiesen und Steppen der gemäßigten Zone, Tundren und Alpine Wiesen, Sümpfen und Marschen sowie Seen und Flüssen wurde davon ausgegangen, dass sie sich ähnlich wie die Vertreter der sommergrünen Wälder *Fagus sylvatica* L. verhalten. Die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten wurden ebenso wie bei den vorangegangenen Vegetationstypen bestimmt.

Die Tabelle 53 enthält die verwendeten Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten sowie die COS-Senkenstärken der entsprechenden Vegetationstypen.

Nach den Berechnungen mit diesen Eingabeparametern tragen die Vegetationstypen in der unten stehenden Reihenfolge zur globalen COS-Aufnahme der Vegetation bei: tropischer Regenwald ca. 43,26 %, borealer Nadelwald ca. 14,11 %, Savannen ca. 7,99 %, regengrüne Wälder ca. 7,07 %, Kulturland (Landwirtschaft) ca. 6,59 %, sommergrüne Wälder ca. 5,04 %, Sümpfe & Marschland ca. 3,77 %, Trockenbusch & Hartlaubgehölze ca. 3,54 %, Wiesen & Steppen (gemäßigte Zone) ca. 3,35 %, immergrüne Hartlaubwälder ca. 3,07 %, Strauchwüsten (Dornenhölzer) ca. 0,92 %, Tundren & Alpine Wiesen ca. 0,7 %. Seen & Flüsse tragen mit ca. 0,56% und Trockenwüsten (Fels, Sand und Eis) mit ca. 0,04 % zur globalen COS-Aufnahme der Vegetation bei.

Vegetationseinheit	$k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$			J <sub>CO<sub>2</sub>VT</sub> [Tg/a]		
	min	Med	max	min	Med	max
<b>Tropischer Regenwälder</b>	3,11	4,582	10,2	0,448	0,66	1,47
<b>Regengrüne Wälder</b>	1,43	2,33	3,23	0,066	0,108	0,15
<b>Sommergrüne Wälder</b>	1,55	2,359	3,43	0,05	0,077	0,112
<b>Immergrüne Hartlaubwälder</b>	1,43	1,886	3,23	0,036	0,047	0,08
<b>Boreale Nadelwälder</b>	1,861	5,840	9,82	0,069	0,215	0,362
<b>Trockenbusch &amp; Hartlaubgehölze</b>	1,43	2,33	3,23	0,033	0,054	0,075
<b>Savannen</b>	1,43	2,33	3,23	0,075	0,122	0,17
<b>Wiesen &amp; Steppen (gemässigte Zone)</b>	1,55	2,485	3,42	0,032	0,051	0,07
<b>Tundren &amp; alpine Wiesen</b>	1,55	2,485	3,42	0,006	0,011	0,015
<b>Strauchwüsten (Dornenhölzer)</b>	1,43	2,33	3,23	0,009	0,014	0,019
<b>Trockenwüsten (Fels, Sand), Eis</b>	1,43	2,33	3,23	0,0004	0,0006	0,0008
<b>Kulturland (Landwirtschaft)</b>	1,25	2,86	3,86	0,044	0,101	0,136
<b>Sümpfe &amp; Marschland</b>	1,55	2,485	3,42	0,036	0,058	0,079
<b>Seen &amp; Flüsse</b>	1,55	2,485	3,42	0,005	0,008	0,012
<b>Kontinente</b>	1,610	2,794	4,312	0,9094	1,526	2,750

**Tabelle 53: COS-Senkenstärke für normale CO<sub>2</sub> Konzentration berechnet nach Formel (G43) für kontinentale Ökosystem**

Die nach der in dieser Arbeit entwickelten Methode abgeschätzte Gesamtmenge der COS-Aufnahme liegt im Bereich von 0,909 - 2,750 Tg/a mit einem Medianwert von 1,526 Tg/a unter normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Die Abschätzung nach dieser Gleichung basieren auf den experimentellen Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sowie auf bereits publizierten Ergebnissen und nicht wie bei Chin und Davis, (1993) auf einer theoretischen Prämisse.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Abschätzung der globalen Senkenstärke der Vegetation korrigiert die bislang publizierten Daten von Schätzungen der globalen Senkenstärke der Vegetation der folgenden Autoren:

- Brown & Bell (1986)
- Goldan et al., (1988)
- Chin & Davis (1993)
- Kesselmeier & Merk (1993)
- Andreae & Crutzen, (1997)
- Watts, (2000)
- Kettle et al., (2002)

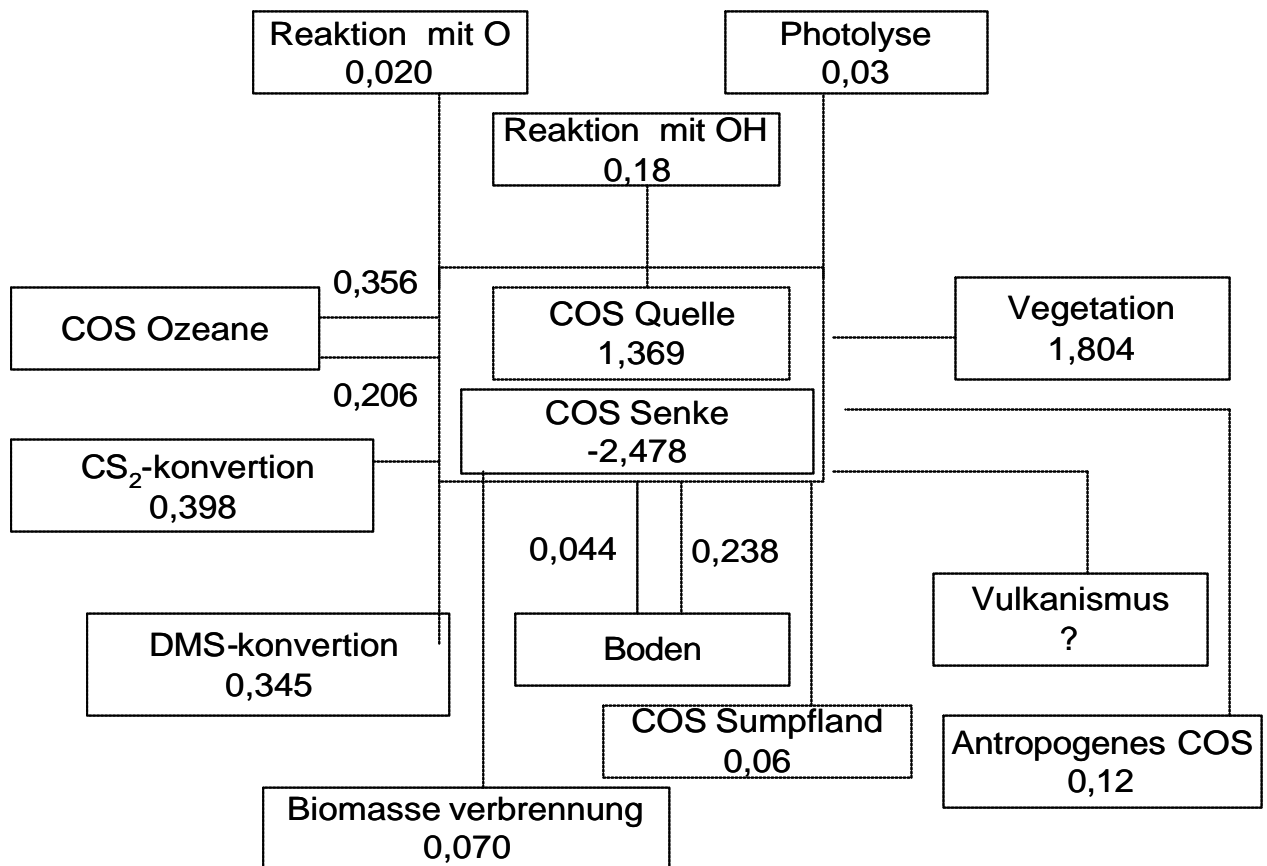
die, die in diesem Kapitel aufgezeigten Unschärfen enthalten. Legt man die in dieser Arbeit experimentell ermittelten minimalen und maximalen Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten aus Tabelle 52 von 1,43 und 3,42 für die Abschätzung des Modellfehlers, den man nach der Methode von Chin und Davis<sup>1</sup>, (1993) bei einer solchen Abschätzung machen würde, zugrunde, ergibt sich der Modellfehler für die Methode von Chin und Davis von 195% bis 468%. Die Unschärfe der Methode von Chin und Davis, (1993) kann somit in der Größenordnung von ca. 200% liegen.

Die korrigierte globale Senkenstärke der Vegetation liegt in einem ähnlichen Bereich wie die Abschätzung von Hoffmann, (1993) und Xu, (2001). Abschließend sei jedoch noch angemerkt, dass eine weitere Präzisierung des globalen COS-Budgets detailliertere Angaben zum Spurengasaustausch der Vegetation erfordert, welche durch weitere Messungen gewonnen werden können, sowie präzise Abschätzungen der globalen Nettoprimärproduktion.

Die Abbildung 51 stellt globale Quellen und Senken von atmosphärischem COS schematisch nach Kettle et al., 2002 dar, wobei für die Senkenstärke der Vegetation der in dieser Arbeit aktualisierte Wert verwendet wurde. aus

---

<sup>1</sup> Nach dieser Methode wird implizit ein Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten mit 0,73 angenommen.



**Abbildung 51: Aktualisierte globale Quellen und Senken von atmosphärischem COS nach Kettle et al., (2002) sowie den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit.**

Die Darstellung verdeutlicht, dass die globale COS-Senkenstärke mit ca. 2,478 Tg COS a<sup>-1</sup> höher als die globale COS-Quellestärke von ca. 1,369 Tg COS a<sup>-1</sup> ist. Bereits der Mittelwert der korrigierten globalen COS-Senkenstärke der Vegetation liegt mit 1,804 Tg COS a<sup>-1</sup> über der globalen COS-Quellestärke.

Um die Ursachen für diese starke Differenz detaillierter aufzuklären, ist es notwendig, die Unschärfen bei der Bestimmung der einzelnen Quellen und Senken drastisch zu senken. Vor diesem Hintergrund ist insbesondere die COS-Quellestärke vulkanischer Aktivität in Betracht zu ziehen, zur der es immer noch zu wenig messtechnisch abgesicherte Aussagen gibt, um das globale Budget entsprechend zu präzisieren.

#### 4.6 Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die globale COS-Senkenstärke der Vegetation

Ausgangspunkt für die Prognose der globalen Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration sei die eingangs analysierte vereinfachte Schätzgleichung für die Extrapolation der COS-Senkenstärke auf Basis der Nettoprimärproduktion von Chin und Davis, (1993). Die experimentellen Untersuchungen an *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. haben gezeigt, dass bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration die CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate nahezu unverändert bleibt. Wie eingangs gezeigt, müsste sich nach diesem theoretischen Modell die COS-Aufnahme auf ca. 44% des Wertes bei normaler CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration absenken. Die in dieser Arbeit experimentellen Untersuchungen widerlegt das aber. Somit ist diese vereinfachte Vorschrift auch nicht für eine derartige Prognose geeignet. Der Grund hierfür ist, wie bereits im Abschnitt 4.5 ausgeführt, dass die Änderung der Depositionsgeschwindigkeiten von CO<sub>2</sub> und COS bei einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration nicht in diese Gleichung einfließt. Die im Abschnitt 4.5 hergeleitete Schätzgleichung behebt diesen Mangel und eignet sich für eine solche Prognose, wenn das entsprechende Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten von CO<sub>2</sub> und COS unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration verwendet wird.

$$\Delta COS = k \cdot \Delta CO_2 \frac{M_{COS}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad \text{mit} \quad k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}} \quad (G47)$$

In einem ersten Schritt werden dazu die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration ermittelt. Die Tabelle 54 enthält die Minima, Median und Maxima der Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten für *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen.

Spezies	$k_{\min} = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$	$k_{\text{Median}} = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$	$k_{\max} = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$
<i>Fagus sylvatica</i> L.	3,06	5,465	11,94
<i>Quercus ilex</i> L.	2,378	3,582	5,528

**Tabelle 54: Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten von *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration**

Mit Hilfe dieser Faktoren  $k$  lässt sich jetzt unter Verwendung der modifizierten Schätzformel (G47) die Senkenstärke von COS für *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L. unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen berechnen. Der prognostizierte Beitrag von *Quercus ilex* L. an der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation wird sich bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration wahrscheinlich um ca. 17 bis 25% absenken. Bei *Fagus sylvatica* L. bleibt der Beitrag zur globalen COS-Senkenstärke der Vegetation unter analogen Bedingungen nahezu unverändert.

Die folgende Abschätzung, wie sich die globale COS-Senkenstärke der Vegetation unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration entwickeln kann, wird unter der Prämisse durchgeführt, dass sich die Vegetationstypen mit starken jahreszeitlichen Zyklen, die stark an Temperatur und Lichtänderungen gebunden sind, wie beispielsweise die Vegetation der sommergrünen Wälder, ein ähnliches Verhalten des Spurengasastausches zeigen werden wie die untersuchte Spezies *Fagus sylvatica* L. . Zu diesen Vegetationstypen gehören: Boreale Nadelwälder, Wiesen und Steppen der gemässigten Zone, Tundren und alpine Wiesen. Das heißt, es wird in der Prognose angenommen, dass sich die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten wie bei *Fagus sylvatica* L. ändern. D.h. die neuen Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten zwischen COS und CO<sub>2</sub> unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden auf Basis der Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten zwischen COS und CO<sub>2</sub> unter normaler CO<sub>2</sub>-Konzentration des entsprechenden Vegetationstypes gebildet. Die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten zwischen COS und CO<sub>2</sub> unter normaler CO<sub>2</sub>-Konzentration des entsprechenden Vegetationstypes wurden dann mit dem Verhältnis der  $k_{800}/k_{350}$  von *Fagus sylvatica* L. multipliziert.

Die Vegetationstypen tropischer Regenwald, regengrüne Wälder, Trockenbusch und Hartlaubgehölze, Savannen, Strauchwüsten (Dornenhölzer) sowie das Kulturland (Landwirtschaft) werden mangels verfügbarer Daten ebenso behandelt wie die Vegetation der immergrünen Hartlaubwälder. Das heißt, es wird in der Prognose angenommen, dass sich die Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten wie bei *Quercus ilex* L. ändern. Die neuen Faktoren  $k$  analog zur oben beschriebenen Methode berechnet. Da keine weiteren experimentellen Ergebnisse die verwendete Hypothese fundamentieren, ist sie rein spekulativ und dient der Anschauung, was eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration für Auswirkungen auf die globale COS-Senkenstärke der Vegetation haben könnte. Es sind natürlich auch weitere Prognosen bzw. Szenarien möglich. Um den Rahmen dieser Arbeit

nicht zu sprengen, soll davon abgesehen werden, alle möglichen Fälle zu diskutieren. Die verbleibenden Vegetationstypen leisten nur einen sehr geringen Beitrag zur globalen Senkenstärke der Vegetation. Deshalb werden sie wie *Fagus sylvatica* L. behandelt, was bedeutet, dass Sie unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration keine signifikante Änderung des COS-Austausches zeigen werden. Die Tabelle 55 enthält die Abschätzung für die COS-Senkenstärke unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

Vegetationseinheit	$k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$			J <sub>COSVT</sub> [Tg/a]		
	min	Med	max	min	Med	max
<b>Tropischer Regenwälder</b>	5,172	8,701	17,452	0,326	0,548	1,099
<b>Regengrüne Wälder</b>	2,378	4,425	5,527	0,048	0,09	0,112
<b>Sommergrüne Wälder</b>	3,06	5,465	11,94	0,044	0,078	0,17
<b>Immergrüne Hartlaubwälder</b>	2,38	3,582	5,53	0,026	0,039	0,06
<b>Boreale Nadelwälder</b>	3,674	5,399	34,28	0,059	0,087	0,553
<b>Trockenbusch &amp; Hartlaubgehölze</b>	2,378	4,425	5,527	0,024	0,045	0,056
<b>Savannen</b>	2,378	4,425	5,527	0,054	0,101	0,126
<b>Wiesen &amp; Steppen (gemäßigte Zone)</b>	3,06	5,758	11,93	0,028	0,052	0,107
<b>Tundren &amp; alpine Wiesen</b>	3,06	5,758	11,93	0,005	0,011	0,022
<b>Strauchwüsten (Dornenhölzer)</b>	2,378	4,425	5,527	0,006	0,012	0,015
<b>Trockenwüsten (Fels, Sand), Eis</b>	2,378	4,425	5,527	0,0003	0,0005	0,0006
<b>Kulturland (Landwirtschaft)</b>	2,079	5,431	6,604	0,032	0,084	0,102
<b>Sümpfe &amp; Marschland</b>	3,06	5,758	11,93	0,031	0,058	0,121
<b>Seen &amp; Flüsse</b>	3,06	5,758	11,93	0,004	0,008	0,018
<b>Kontinente</b>	2,892	5,266	10,797	0,687	1,213	2,562

**Tabelle 55: Globale COS-Senkenstärke berechnet nach Formel (G 47) für die kontinentale Vegetation unter 800 ppm CO<sub>2</sub>.**

Nach Tabelle 56 tragen die Vegetationstypen in der unten stehenden Reihenfolge zur globalen COS-Aufnahme der Vegetation bei: tropischer Regenwald ca. 45,2%, Savannen ca. 8,35 %, regengrüne Wälder ca. 7,39%, borealer Nadelwald ca. 7,18%, Kulturland (Landwirtschaft) ca. 6,88 %, sommergrüne Wälder ca. 6,42 %, Sümpfe & Marschland ca. 4,81 %, Wiesen &

Steppen (gemäßigte) 4,27 % , Trockenbusch & Hartlaubgehölze ca. 3,69 %, immergrüne Hartlaubwälder ca. 3,21 %, Strauchwüsten (Dornenhölzer) 0,96 %, Tundren und alpine Wiesen 0,89 %, Seen & Flüsse ca. 0,71 % sowie Trockenwüsten (Fels, Sand und Eis) tragen mit ca. 0,04 % zur globalen COS-Aufnahme der Vegetation bei.

Die Tabelle 56 zeigt einen Vergleich der abgeschätzten Gesamtmengen der globalen COS-Aufnahme der Vegetation unter natürlicher und erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration.

<b>COS-Senkenstärke der Vegetation</b>	<b>Minimal</b> [Tg (COS)/a]	<b>Median</b> [Tg (COS)/a]	<b>Maximal</b> [Tg (COS)/a]
bei 350 ppm CO <sub>2</sub>	0,909	1,526	2,750
bei 800 ppm CO <sub>2</sub>	0,687	1,213	2,561

**Tabelle 56: Vergleich der COS Senkenstärke der Vegetation unter 350 und 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration**

Da die beiden Angehörigen unterschiedlicher Vegetationstypen kein einheitliches Verhalten bezüglich des COS-Austausches unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration zeigen, ist eine Extrapolation des Verhaltens dieser beiden Spezies auf alle Vegetationstypen für die Zwecke der Prognose der globalen COS\_Senkenstärke der Vegetation grundsätzlich problematisch. Ein Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration wird wahrscheinlich auch zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur unsere Erde führen und die Vegetationstypen zu beeinflussen (Emmanuel et al., 1985a, 195 b; Bolin et al., 1989; Murray, 1997). Der Einfluss der Temperaturerhöhung auf die COS-Austauschprozesse von höheren Pflanzen wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, und bleibt somit offen.

Unter diesen skizzierten Randbedingungen deuten die Resultate der Untersuchung auf eine Reduktion der COS-Aufnahme der Vegetation bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration um circa 20 %. Diese Zahl kann aber nur als äusserst unsichere Abschätzung betrachtet werden. Die experimentelle Basis darf höchstens als Hinweis auf eine potentielle Verminderung der Senkenstärke für COS dienen.

#### 4.7 Verallgemeinerung der Methode zur Prognose des Gasaustausches der Vegetation

Die in Kapitel 4.4 vorgestellte genauere Methode der globalen Abschätzung der COS-Senkenstärke auf Basis des Verhältnisses der Depositionsgeschwindigkeiten  $v_D$  von  $\text{CO}_2$  und COS kann auch für Analysen anderer Gaswechsel zwischen Atmosphäre und der Vegetation verwendet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Austauschprozesse des zu analysierenden Spurengas genauso wie bei COS durch die Stomata reguliert werden und mit der  $\text{CO}_2$  Assimilationsrate korrelieren.

Anstelle der Gas-Austauschparameter für das Gas COS,  $[\text{COS}]$ ,  $v_{D\text{COS}}$  und  $\Delta\text{COS}$  sind dann die Gasaustauschparameter für das zu analysierende Gas X;

- $[\text{Gas X}]$  GasX -Umgebungskonzentration in ppt
- $[\text{CO}_2]$   $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration in ppm
- $v_{D\text{GasX}}$  Depositionsgeschwindigkeit des Gases X in cm/s
- $v_{D\text{CO}_2}$  Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{CO}_2$  in cm/s
- $\Delta\text{CO}_2$  globale  $\text{CO}_2$ -Aufnahmerate der gesamten Vegetation in Tg/a (NPP),
- $\Delta\text{GasX}$  Austauschrate des Gases X
- $M_{\text{CO}_2}$  Molare Masse von  $\text{CO}_2$
- $M_{\text{GasX}}$  Molare Masse von GasX
- $k_{\text{GasX}/\text{CO}_2}$  Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeit des Gases X zur Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{CO}_2$

zu benutzen.

$$\Delta\text{GasX} = k_{\text{GasX}/\text{CO}_2} \cdot \Delta\text{CO}_2 \cdot \frac{M_{\text{GasX}}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{[\text{GasX}]}{[\text{CO}_2]} \quad \text{mit} \quad k_{\text{GasX}/\text{CO}_2} = \frac{v_{D\text{GasX}}}{v_{D\text{CO}_2}} \quad (\text{G48})$$

Die Genauigkeit der globalen Abschätzung des Austauschparameters hängt, wie bereits erwähnt, von der Stabilität der Korrelation zur  $\text{CO}_2$ -Assimilationsrate ab.

Diese einfache Methode (G48) eignet sich ebenfalls für die Implementation in Modellen zur Prognose der Austauschprozesse von Spurengasen zwischen Vegetation und Atmosphäre, die Einfluss auf Zusammensetzung der Chemie der Atmosphäre haben und so die Partizipation der Vegetation auf klimatische Prozesse in Modellen zur Klimaprognose abbilden.

## 5 Zusammenfassung

Um das Verständnis über die COS-Austauschprozesse zwischen Vegetation und Atmosphäre zu vertiefen, wurden mit Hilfe eines Gaswechselkuvettensystems Untersuchungen an zwei repräsentativen Spezies europäischer Baumarten, *Fagus sylvatica* L. und *Quercus ilex* L., im Zeitraum von 1998 bis 2000 durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der Erforschung des Einflusses einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration auf den COS-Austausch.

Für diese Analyse wurden die zwei vorhandenen Gaswechelanalysesysteme, das halbautomatische Messsystem ARGON und das vollautomatische Messsystem SUGAR für die Zwecke dieser Untersuchung modifiziert und eingesetzt.

Im Folgenden seien die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit kurz zusammengefasst:

Unter den Rahmenbedingungen dieser Arbeit wurde an den untersuchten Spezies keine Emission von COS nachgewiesen. Die COS-Aufnahme zeigte eine direkte Korrelation mit der COS-Umgebungskonzentration. Die Abhängigkeit der COS-Aufnahme von der COS-Umgebungskonzentration konnte nicht im gesamten Messbereich linear approximiert werden. Deshalb wurde das folgende nichtlineare Modell zur Abbildung der Abhängigkeit der COS-Aufnahme von der COS-Umgebungskonzentration entwickelt.

$$F_{COS} = \frac{v_D \cdot [COS]^{N+1}}{KP^N + [COS]^N}$$

wobei,

- $v_D$  COS-Depositionsgeschwindigkeit in cm/s
- $KP$  COS-Kompensationspunkt in ppt
- $[COS]$  COS Umgebungskonzentration in ppt
- $N$  Ordnung  $N$  der Polynome

Bei den beiden untersuchten Rahmenbedingungen der CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration zeigte sich bei allen Individuen qualitativ die gleiche Abhängigkeit der COS-Austauschrates von der COS-Umgebungskonzentration.

Bei *Quercus ilex* L. konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der COS-Aufnahme unter den verschiedenen CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentrationen experimentell nachgewiesen werden. Die COS-Aufnahme war unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration signifikant kleiner als bei natürlicher CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration. Bei *Quercus ilex* L. konnte ebenfalls eine Reduktion der Aktivität des Enzymes Carboanhydrase, welches eine Schlüsselrolle bei der COS-Aufnahme spielt, nachgewiesen werden. Der Trend, dass unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration die COS-Aufnahme sinkt, war tendenziell auch an einer Verschiebung des COS-Kompensationspunktes zu sehen.

Bei *Fagus sylvatica* L. konnte dieser Trend anhand der vorliegenden Messdaten nicht statistisch signifikant belegt werden. Weder der COS-Austausch noch die Aktivität des Enzymes Carboanhydrase zeigten unter natürlicher und erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration einen statistisch signifikanten Unterschied.

Die Reflektierung der eigenen Ergebnisse an der Literatur zeigte, dass die bisher verwendeten Methoden der Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation auf Basis der Nettoprimärproduktion von Chin und Davis, (1993) einen Modellfehler von mindestens 200 % in Relation zu den auch in dieser Arbeit bestimmten COS-Austauschparametern implizieren, da sie nicht die tatsächlichen Verhältnisse der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und CO<sub>2</sub> verwenden. Somit bedurften alle bisherigen Abschätzungen, die auf dieser Methode basieren, einer Korrektur.

Um die Abschätzung der globalen COS-Senkenstärke der Vegetation auf Basis der Nettoprimärproduktion zu präzisieren, wurde deshalb eine neue Methode entwickelt, die das experimentell bestimmte Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeiten von COS und CO<sub>2</sub> nutzt und dadurch den oben beschriebenen Mangel behebt:

$$\Delta COS = k \cdot \Delta CO_2 \frac{M_{COS}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{[COS]}{[CO_2]} \quad \text{mit} \quad k = \frac{v_{DCOS}}{v_{DCO_2}}$$

Wobei,

- [COS ] COS-Umgebungskonzentration in ppt.
- [CO<sub>2</sub>] CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration in ppm,
- $v_{\text{DCOS}}$  Depositionsgeschwindigkeit von COS in cm/s
- $v_{\text{DCO}_2}$  Depositionsgeschwindigkeit von CO<sub>2</sub> in cm/s
- $\Delta\text{CO}_2$ ...globale CO<sub>2</sub>-Aufnahmerate der gesamten Vegetation in Tg/a (NPP),
- $\Delta\text{COS}$  Austauschrate von COS
- $M_{\text{CO}_2}$  Molare Masse von CO<sub>2</sub>
- $M_{\text{COS}}$  Molare Masse von COS
- $k_{\text{COS/CO}_2}$  Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeit von COS zur Depositionsgeschwindigkeit von CO<sub>2</sub>

Auf Basis dieser Methode wurde die globale COS-Senkenstärke der Vegetation unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration unter Verwendung eigener und publizierter COS-Austauschparameter erneut berechnet. Nach dieser Abschätzung liegt die globale COS-Senkenstärke der Vegetation bei einem Wert zwischen 0,909 Tg/a und 2,750 Tg/a. Diese Zahlen beruhen jedoch immer noch auf zahlreichen Annahmen, deren Relevanz in der Natur noch nachgewiesen werden muss.

Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration von 800 ppm kann die globale COS-Senkenstärke der Vegetation nach den Ergebnissen dieser Arbeit auf Werte von 0,687 bis 2,561 Tg/a sinken, wobei nochmals explizit darauf hingewiesen wird, dass unbedingt noch weitere experimentelle Untersuchungen notwendig sind, um die verbleibenden auf Annahmen basierenden Unschärfen weiter zu reduzieren.

Die Unschärfen beruhen vor allem auf der Tatsache, dass es zu wenig experimentelle Daten zum COS Austausch von Pflanzen unter verschiedenen CO<sub>2</sub>-Regimen gibt. Ausserdem sind folgende Vegetationstypen verglichen an Ihrem Beitrag zur globalen COS-Senkenstärke der Vegetation in wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum COS-Austausch deutlich unterrepräsentiert: tropischer Regenwald, Savannen und die regenrünen Wälder.

Die für die Abschätzung der globalen COS Senkenstärke der Vegetation entwickelte Methode lässt sich jedoch auch für andere Gasaustauschprozesse von Pflanzen, die streng mit der CO<sub>2</sub>-

Assimilation korrelieren, verwenden. Dafür ist die Gleichung nur geringfügig zu modifizieren.

$$\Delta GasX = k_{GasX/CO_2} \cdot \Delta CO_2 \cdot \frac{M_{GasX}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{[GasX]}{[CO_2]} \quad \text{mit} \quad k_{GasX/CO_2} = \frac{v_{D GasX}}{v_{D CO_2}} \quad (49)$$

Wobei ,

- [Gas X ] GasX -Umgebungskonzentration in ppt
- [CO<sub>2</sub>] CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration in ppm
- v<sub>D GasX</sub> Depositionsgeschwindigkeit des Gases X
- v<sub>D CO<sub>2</sub></sub> Depositionsgeschwindigkeit von CO<sub>2</sub> in cm/s
- ΔCO<sub>2</sub>...globale CO<sub>2</sub>-Aufnahmerate der gesamten Vegetation in Tg/a (NPP),
- ΔGasX Austauschrate des Gases X
- M<sub>CO<sub>2</sub></sub> Molare Masse von CO<sub>2</sub>
- M<sub>GasX</sub> Molare Masse von GasX
- k<sub>GasX/CO<sub>2</sub></sub> Verhältnis der Depositionsgeschwindigkeit des Gases X zur Depositionsgeschwindigkeit von CO<sub>2</sub>

Die Genauigkeit der globalen Abschätzung des Austauschparameters hängt, wie bereits erwähnt, von der Stabilität der Korrelation zur CO<sub>2</sub>-Assimilationsrate ab. Dieses Modell ist auch geeignet, um den Einfluss der Vegetation in Modellen zur Klimaprognose implementiert zu werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit führen zu der Schlussfolgerung, dass die globale Erhöhung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration zu einer Reduktion der globalen COS-Aufnahme durch die Vegetation führen kann.

Bei Konstanz aller übrigen COS-Quellen und -Senken könnte eine geringere COS-Senkenstärke der Vegetation schliesslich zu einem Anstieg der atmosphärischen COS-Konzentration führen. Der Anstieg der atmosphärischen COS Konzentration könnte wiederum die Sulphat-Aerosol-Bildungsprozesse, die das globale Klima unsere Erde beeinflussen, intensivieren, wodurch weitere Klimaveränderungen eingeleitet bzw. verstärkt werden könnten.

## 6 Literaturverzeichnis

- Acock, B. and Allen, L.H.Jr. (1985): Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide Concentrations. In: B.R. Strain and J.D. Cure (Eds) " Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation". pp.53-98. USDE, Washington, D.C.
- Allen, L.H., Valle, R.R., Jones, J.W. and Jones, P.H. (1998): Soybean Leaf Potential Responses to Carbon Dioxide and Drought. *Agron. J.* 90, 375-383.
- Andreae, M. O. (1986): The Ocean as a source of atmospheric sulfur compounds, in The role of air-sea exchange in geochemical cycling. edited by P. Buat-Menard, pp. 331-362.
- Andreae, M. O. and Ferek, R.J. (1992): Photochemical production of Carbonyl sulfide in seawater and its emission to the atmosphere. *Global Biochem. Cycles* 6, 175-183.
- Andreae, M. O. and Jaeschke, W. A. (1992): Exchange of sulphur between biosphere and atmosphere over temperate and tropical regions. In: *Sulphur Cycling on the Continent: Wetlands, Terrestrial Ecosystems and Associated Water Bodies* Ed. Howarth, J. W. B. Stewart and M. V. Ivanov., Verlag John Wiley & Sons Ltd.
- Andreae, M. O. (1994): Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. In: *World Survey of Climatology*. Edited by A. Henderson-Sellers. Amsterdam: Elsevier.
- Andreae, M. O. and Crutzen, P.J. (1997): Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science* 276, 1052-1058.
- Arakelyan, V. V., Ibragimova, G. B. and Nasyrov, Y. S. (1993): Effects of light, CO<sub>2</sub> and temperature on carbonic anhydrase activity in C<sub>3</sub>-plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 40, 879-881.
- Arnone, J.A. III. and Körner, C. (1995): Soil and Biomass carbon pools in model communities of tropical plants under elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia* 104, 61-71.
- Arrhenius, S. (1866): On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag.*, 41, 237.
- Badger, M. R. and Price, G. D. (1994): The role of carbonic anhydrase in photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 45, 369-392.
- Barnes, I., Becker, K. H. and Patroescu, I. (1994): The tropospheric oxidation of dimethylsulfide: A new source of carbonyl sulfide. *Geophys. Res. Lett.* 21, 2389-2392.
- Barták M., Nijs, I. and Impens I. (1998): The susceptibility of PSII of *Lolium perenne* to a sudden fall in air temperature-Response of plants grown in elevated CO<sub>2</sub> and/or increased air temperature. *Environmental and Experimental Botany*. 39, 85-95.
- Bazzaz, F.A. (1992): The response of natural ecosystems to the rising global CO<sub>2</sub> levels. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 21, 167-196.

- Bazzaz, F.A. (1990): The response of natural ecosystems to the rising global CO<sub>2</sub> levels. *Annual Review Ecology and systematics*. 21,167-196.
- Bazzaz, F.A. und Fajer, E. D. (1996): Mehr Kohlendioxid- wie reagiert die Pflanzenwelt?  
In: *Atmosphäre, Klima, Umwelt*. 2.Auflage. Spektrum. 158 - 165
- Belviso, S., Nguyen, B.C. and Allard, P. (1986): Estimate of Carbonyl sulfide (OCS) volcanic source strength deduced from OCS/ CO<sub>2</sub> ratios in volcanic gases. *Geophys. Res.Lett.* 3, 133-136.
- Berling, D.J. (1997): Carbon isotope and stomatal responses of mature *Pinus sylvestris* L. trees exposed in situ for three years to elevated CO<sub>2</sub> and temperature. *Acta Oecologica International Journal of Ecology* . 18 (6) 697-712.
- Berntson, G.M. and Bazzaz, F.A. (1997): Nitrogen cycling in microcosms of yellow birch exposed to elevated CO<sub>2</sub>: simultaneous positive and negative below-ground feedbacks. *Global Change Biol.* 3, 247-258.
- Berntson, G.M. and Bazzaz, F.A. (1998): Regenerating temperate forest mesocosms in elevated CO<sub>2</sub>: belowground growth and nitrogen cycling. *Oecologia*. 113, 115-125.
- Blaschke, L., Schulte, M., Raschi, A., Slee, N., Rennenber, H. and Polle, A., (2001): Photosynthesis, soluble and structural carbon compounds in two mediterranean Oak Species (*Quercus pubescens* and *Q. ilex*) after Lifetime Growth at naturally Elevated CO<sub>2</sub> Concentrations. *Plant biol.* 3, 288-298.
- Blezinger, S., Wilhem, C. and Kesselmeier, J. (2000): Enzymatic consumption of carbonyl sulfide COS by marine algae. *Biogeochemistry*. 48 (2) 185-197.
- Blezinger, S. M. (1995): Untersuchungen zur Aufnahme und Emission klimarelevanter Spurengase durch marines Phytoplankton. Doktorarbeit, Johannes Gutenberg Universität, Mainz.
- Bolin, B., Döös, Bo.R., Jäger, J. and Warrick, R.A. (1986): The Greenhouse effect climatic change and Ecosystems John Wiley and Sons. New York. . 541.
- Borris, H.G. and Libbert, R. (1985): Wörterbucher de Biologie. Pflanzen Physiologie. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.
- Booker, F.L., Reid, C.D., Brunschön-Harti, S., Fiscus, E.L and Miller, J.E. (1997): Photosynthesis and photorespiration in soybean [*Glycine max* (L.) Merr. ] Chronically exposed to elevated carbon dioxide and ozone. *Journal of Experimental Botany*. Vol 48, No. 315 1843-1852.
- Boyle, E.A. (1988): Vertical oceanic nutrient fractionation and glacial/interglacial CO<sub>2</sub> cycles. *Nature*. 331, 55-56.
- Broecker, W.S. and Peng, T.H. (1990): The cause of glacial to interglacial atmospheric CO<sub>2</sub> change. The polar alkalinity hypothesis. *Global Geochemical Cycles*.

- Brown, K. A. and Bell, J. N. B. (1986): Vegetation - the missing sink in the global cycle of carbonyl sulfide (COS). *Atmospheric Environment*. 20, 537 - 540.
- Bunce, J.A. (1990): Short and long term inhibition of respiratory carbon dioxide efflux by elevated carbon dioxide. *Annals of Botany*. 65,637-642.
- Bunce, J.A. (1992): Stomatal conductance, photosynthesis and respiration of temperate deciduous tree seedlings grown outdoors at an elevated concentration of carbon dioxide. *Plant, Cell and Environ.* 15, 541-549.
- Burnell, J.N. and Hatch, M.D. (1988) Low bundle sheath carbonic anhydrase is apparently essential for effective C4 pathway operation. *Plant Physiol.* 86, 1252-1256.
- Calender, G.S. (1938): The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, Q.J.R. Meteorol. Soc. 64, 223.
- Cardon, Z.G. and Mott, K.A. (1989) : Evidence that ribulose-1,5 biphosphate binds to inactive sites of RuBP carboxylase in vivo and an estimate for the rate constant for dissociation. *Plant Physiol.* 89, 1253-1257.
- Centritto, M., Lee, H.S.J. and Jarvis P.G. (1999) : Increased growth in elevated CO<sub>2</sub>: An early Short-term response. *Global Change Biology*. 5 (6):623-633.
- Centritto, M., Magnani, F., Lee H.S.J. and Jarvis, P.G. (1999) : Interactive effects of elevated [CO<sub>2</sub>] and drought on cherry Prunus avium seedlings II. Photosynthetic capacity and Water relations. *New Phytologist*. 141, 141-153.
- Ceulemans, R. and Saugier, B. (1992) : Photosynthesis. In: Raghavendra AS, ed. *Physiology and trees*. New York: John Wiley and Sons Inc., 21-49.
- Ceulemans, R. and Mousseau, M. (1994) : Tansley Review No.71. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on wood plants. *New Phytol.* 127, 425-446.
- Chang, C.W. (1975): Carbon dioxide and senescence in cotton plants. *Plant Physiol.* 55, 515-519.
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley Jr., J. A. and Hansen, J. E. (1992) : Climate forcing by anthropogenic aerosol. *Science*. 255, 423-430.
- Chengelis, C.P. and Neal, R.A. (1979) : Hepatic carbonyl sulfide metabolism. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 90/3, 993-999.
- Chengelis, C.P. and Neal, R.A. (1980) : Studies of carbonyl sulfide toxicity: metabolism by carbonic anhydrase. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 55, 198-202.
- Chin, M. and Davis, D. D. (1993) : Global sources and sinks of OCS and CS<sub>2</sub> and their distribution. *Global Biogeochem. Cycles*. 7, 321-337.
- Chin, M. and Davis, D. D. (1995) : A reanalysis of carbonyl sulfide as a source of stratospheric background sulfur aerosol. *J. Geophys. Res.* 100, 8993-9005.

- Clark, H., Newton, P.C.D. and Barker, D.J. (1999): Physiological and morphological responses to elevated CO<sub>2</sub> and Soil moisture deficit of temperate pasture species growing in an established plant community species growing in an established plant community. *Journal of Experimental Botany*. Vol 50, NO. 331, 233-242.
- Collins, C. D. and Bell, J. N. B. (1996): Experimental studies on the deposition of radioactive gases released from gas cooled reactors. Part 1. Carbonyl Sulfide. *J. Environ. Radioactivity*. 30, 99-115.
- Conze, W. (1995): Versuche zur Messung des Enzymes Carboanhydrase mit bekannten in Zellaufschlüssen von marinen Phytoplankton. Diplomarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Cook, A.C, Tissue, D.T., Roberts, S.W. and Oechel, W.C. (1998): Effects of long-term elevated CO<sub>2</sub> from natural [CO<sub>2</sub>] springs on *Nardus stricta*: Photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. *Plant Cell and environment*. 21, (4) 417-425.
- Cowan, I.R. (1986): Economics of carbon fixation in higher plants. In one the Economy of plant Form and Function, ed. Givinish, T.J., London: Cambridge Univ. Press, 130-170.
- Craffts-Brandner, S.J. and Salvucci, M.E (2000): Rubisco activase constrains the photosynthetic potential of leaves at high temperature and CO<sub>2</sub>. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 97 (24) 13430-13435.
- Crutzen, P. J. (1976): The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.* 3, 73-76.
- Cullis, C. F. and Hirschler, M. M. (1980): Atmospheric sulfur: natural and man-made sources. *Atmospheric Environment*. 14, 1263-1278.
- Curtis, P.S. and Wang, X. (1998): A meta-analysis of elevated CO<sub>2</sub> effects on woody plant mass, form, and physiology. *Oecologia*. 113, 299-313.
- De Lucia, E.H and Thomas, R.B. (2000): Photosynthetic responses to CO<sub>2</sub> enrichment of four hardwood species in a forest understory. *Oecologia*. 122, (1) 11-19.
- Delgado, E., Mitchell, R., Parry, M., Driscoll, S.P., Mitchell, V.J. and Lawlor, D.W. (1994): Interacting effects of CO<sub>2</sub> concentration, temperature and nitrogen supply on the photosynthesis and composition of winter wheat leaves. *Plant Cell and environment*. 17, (11) 1205-1213.
- De la viña, G., Pliego-Alfaro, F., Driscoll, S.P., Mitchell, V.J., Parry, M.A., and Lawlor, D.W. (1999): Effects of CO<sub>2</sub> and sugars on photosynthesis and composition of avocado leaves grown in vitro. 37 (7-8) 587-595
- Drake, B. G. (1992): The impact of raising CO<sub>2</sub> on ecosystem production. *Water Air Soil Pollut.* 64: 25-44
- Drennan, P.M. and Nobel, P.S. (2000): Responses of CAM species to increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Plant Cell and environment*. 23 (8) 767-781.

- Dufrene, E., Pontailler, J.Y. and Saugier, B. (1993): A branch technique for simultaneous CO<sub>2</sub> enrichment and assimilation measurements on beech (Fagus sylvatica L.). *Plant, Cell and Environment*. 16, 1131-1138.
- Eamus, D. and Jarvis, P. G. (1989): The direct effects of increase in the global atmospheric CO<sub>2</sub> and reproductive plants of several woody species. *Oecologia*. 86, 594-597.
- El Kohen, A., Venet, L. and Mousseau, M. (1993): Growth and photosynthesis of two deciduous forest tree species exposed to elevated carbon dioxide. *Functional Ecology*. 7, 480-486.
- El Kohen, A. (1993): Réponse du chataignier au CO<sub>2</sub> à deux niveaux de nutrition minérale. Ph.D. Thesis, Université Paris XI Orsay, France, 177 pp.
- Elliott, S., Lu, E. and Rowland, F. S. (1989): Rates and mechanisms for the hydrolysis of carbonyl sulfide in natural waters. *Environ. Sci. Technol.* 23, 458-461.
- Ellsworth, D.S., Oren, R., Huang, C., Phillips, N. and Hendrey, G.R. (1995): Leaf and canopy responses to elevated CO<sub>2</sub> in a pine forest under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Oecologia*. 104, 139-146.
- Emanuel, W.R., Shugart, H.H. and Stevenson, M.P. (1985 a): "Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes". *Climatic Change*, 7, pp29-43.
- Emanuel, W.R., Shugart, H.H. and Stevenson, M.P. (1985 b): "Response to comment: climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes". *Climatic Change*. 7, pp 457-460.
- Engel, A. and Schmidt, U. (1994): Vertical profile measurements of carbonyl sulfide in the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.* 21, 2219-2222.
- Engler, A. (1964): Syllabus der Pflanzenfamilien vol I und II .
- Erickson, D.J., III. and Eaton, B.E. (1993): Global biogeochemical cycling estimates with CZCS satellite data and general circulation models, *Geophys. Res. Lett.* 20 (8): 683-686.
- Espie, X and Colman, X. (1985): Is extracellular HCO<sub>3</sub> a direct source of inorganic carbon for terrestrial plant cell photosynthesis? In WJ, JA Lucas, JA Berry, eds. Inorganic Carbon Uptake by aquatic Photosynthetic Organisms. *American Society of Plant Physiologists*, Rockville, M.D. pp169-186.
- Fall, R., Albritton, D. L., Fehsenfeld, F. C. and Kuster, W. C. (1988): Laboratory studies of some environmental variables controlling sulfur emissions from plants. *J. Atmos. Chem.* 6, 341-362.
- Fangmeier, A., Gruters, U., Hög, P., Vermehren, B. and Jäger, H.J. (1997): Effects of elevated CO<sub>2</sub> nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat .2. Nutrients (N,P,K,S,Ca,Mg,Fe,Mn,Zn). *Environmental pollution*. 96, (1) 43-59.
- Fangmeier, A., Chrost, B., Hög, P. and Krupinska, K. (2000): CO<sub>2</sub> enrichment enhances flag

- leaf senescence in barley due greater grain nitrogen sink capacity. *Environmental and Experimental Botany*. 44, 151-164.
- Feld, C.B. Chapin, III F.S., Matson, P.A. and Mooney, H.A. (1992): Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere: A resource-based approach. *Annuals Review of Ecology and Systematics*. 23, 201-235.
- Fereck, R.J. and Andreae, M.O. (1984): Photochemical production of carbonyl sulphide in marine surface waters. *Nature*. 307, 148-150.
- Finlayson-Pits, B. and Pitts, J.N. (1948): Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. John Wiley and Sons. New York. 1098.
- Fitschen, J. (1987): Gehölzflora, 8, Quelle and Meyer Verlag Heidelber, Wiesbaden.
- Flohn, H. (1988): Das Problem der klimaänderung in Vergangenheit und zukunft. Darmstadt: wissenschaftliche Buchgesellschaft. 228 .
- Focht, D.D., and Verstraete, W. (1977): Biochemical ecology of nitrification and denitrification , *Adv. Microbiol. Ecol.* 1, 135 – 214.
- Fordham, M., Barnes, J.D., Bettarini, L., Polle .A. Slee N., Raines,C., Miglietta,F. and Raschi, A. (1997): The impact of elevated CO<sub>2</sub> on growth and photosynthesis in *Agrostis canina* L.ssp. *montelucci* adapted to contrasting atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Oecologia*. 110, 169-178.
- Franck, V.M., Hungate, B.A., Chapin, F.S.III. and Field, C.B. (1997): Decomposition of litter produced under elevated CO<sub>2</sub>: dependence on plant species and nutrient supply. *Biogeochemistry*. 36, 223-237.
- Freeden, A.L, Koch, G.W. and Field, C.B.(1998): Influence of fertilization and atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on ecosystem CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchanges in single- and multiple species grassland microcosmos. *Environmental and Experimental Botany*. 40, (2) 147-157.
- Galbally, I.E., (1989): Factors controlling Nox emissions from soils, in Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, edited by M.O.Andreae, and D.S.Schimmel, pp. 189-207, John Willey, New York, USA, USA, 1989.
- Ganzefeld, G. 2001. Surface Atmosphere trace gas and Aerosol Exchanges on the Global -Scale. Ph.D. Thesis. Universiteit Utrecht. Netherlands.
- Gerlach, C. (1997): Die Auswirkungen von physiologischen Manipulationen auf die Emission von Ameisen- und Essigsäure, sowie Form- und Acetaldehyd durch ausgewählte Laubbaumspezies unter Laborbedingungen. Diplomarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- Gmelin, L. (1977b): *Handbuch der anorganischen Chemie*, Kohlenstoff Teil D5. Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Gmelin, L. (1977a): *Handbuch der Anorganischen Chemie*, Kohlenstoff Teil C3. 8. Auflage,

springer verlag Berlin.

- Goldan, P. D., Fall, R., Kuster, W. C. and Fehsenfeld, F. C. (1988): Uptake of COS by growing vegetation: A major tropospheric sink. *J. Geophys. Res.* 93, 14,186-14,192.
- Goldan, P. D., Kuster, W. C., Albritton, D. L. and Fehsenfeld, F. C. (1987): The measurement of natural sulfur emission from soils and vegetation: Three sites in the eastern United States revisited. *J. Atmos. Chem.* 5, 439-467.
- Graedel, T. E. und Crutzen, P. J. (1994): Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und Umwelt. Heidelberg; Berlin; Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Graedel, T. E. und Crutzen, P. J. (1996): Atmosphäre im Wandel: Die empfindliche Luthüle unseres Planeten. Heidelberg; Berlin; Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH
- Graham, D., and Reed, M.L. (1971): Carbonic anhydrase and the regulation of photosynthesis. *Nature New Biol.* 231, 81-82.
- Grainier, C. and Brasseur, G. (1992): Impact of heterogeneous chemistry on model predictions of ozone changes, *J. Geophys. Res.* 97 ,(D16). 18,015-18,033.
- Griffith, D.W.T., Jones, N.B. and Matthews, W.A. (1988): Interhemispheric ratio and annual cycle of carbonyl sulfide (OCS) total column from groundbased solar FTIR spectra,*J.Geophys.Res.* 103 (D7): 8447-8454.
- Grob, K. and Grob , G. (1979): Desactivation of glass capillaries by persilylation.*J.HRC. and CC.2*, 677-678.
- Guenther, A., Lamb, B. and Westberg, H. (1989): US national biogenic sulfur emissions inventory. In *Biogenic sulfur in the environment*. Edited by E. S. Saltzman and W. J. Cooper. Washington DC: *American chemical Society*. 15-30.
- Gunderson, C.A., Norby, R.J. and Wullschleger,S.D. (1993): Foliar gas exchange responses of two deciduous hardwoods during 3 years of growth in elevated CO<sub>2</sub>: no loss of photosynthetic enhancement. *Plant, Cell and Environment*. 16, 797-807.
- Gunderson, C.A. and Wullschleger,S.D.(1994): Photosynthesis acclimation in trees to rising atmospheric CO<sub>2</sub>: A broader perspective.*Photosynthesis Research*. 39, 369-38.
- Handel, M.D. and Risbey, J.S. (1992): An annotated bibliography: The greenhouse effect and climate change. *Climatic change* 21 ( 97) 255.
- Hanst, P.L, Spiller, L.L.,Watts, D.M., Spence, J.W. and Filler, M. (1975): Infrared measurement of fluorocarbons, carbon tetrachloride, carbonyl sulfide and other atmospheric trace gases, *J.Air Pollut.Cont.Ass.*25(12): 1220-1226.
- Harnish, J.R., Borchers, X and Fabian X. (1995a): COS,CS<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in aluminium smelter exhaust, *Environ.Sci. andPollut.Res.* 2 (4): 229-232.
- Hartmann, D.L. (1994): Global Physical Climatology, in International Geophysical Series, edited

- by . R Dmowska and J.R.Holton, Vol. 56, Academic press, Inc., New York.
- Heimann, M., Esser,G., Haxeltine,A.,Kaduk,J., Kicklighter,D.W., Knorr,W., Kohlmeier,G.H., McGuire,A.D., J., Moore,III,B., Otto,R., Prentice,I., Sauf,W., Schloss, A., Sitch,S., Wittenberg,U., and Würth,G.1998. Evaluation of Terrestrial carbon cycle models through simulations of the seasonal cycle of atmospheric CO<sub>2</sub>: First results of a model intercomparison study, *Global Biogeochem.Cycles*. 12, 1-24.
- Helas, G. (2002): Öffentliches Plakat " Mittlere Wärmestrahlungsbilanz unserer Erde". Max Planck Institut für Chemie, Mainz.
- Hättenschwiler, S., Miglietta, F., Raschi, A. and Körner, C. (1997 a): Morphological adjustments of mature Quercus ilex trees to elevated CO<sub>2</sub>. *Acta Oecologica* 18:
- Hättenschwiler, S., Miglietta, F., Raschi, A. and Körner,C. (1997 b ): Thirty years of *in situ* tree growth under elevated CO<sub>2</sub>: a model for future forest responses?. *Global change Biology*. 3, (5) 463-471.
- Hättenschwiler, S. and Koorner, C. (1997 c): Annual CO<sub>2</sub> budget of spruce model ecosystems in the third year of exposure to elevated CO<sub>2</sub>. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*. 18, (3) 319-325.
- Hättenschwiler, S. and Körner,C. (1998): Biomass allocation and canopy development in spruce model ecosystems under elevated CO<sub>2</sub> and increased N deposition. *Oecologia*. 113, 104-114.
- Hättenschwiler, S., Miglietta, F., Raschi, A. and Körner,C. (1997): Thirty years of *in situ* tree growth under elevated CO<sub>2</sub>: a model for future forest responses?. *Global Change Biology*. 3, 463-471.
- Hilse.C. (1998): DMSP-Gehalt und Produktion der Marinen Nanoalge *Prymnesium parvum* in Abhängigkeit von Umweltfaktoren und der Stoffwechsell. Doktorarbeit,Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.
- Hofmann, U. (1993): Der Austausch von reduzierten Schwefel-Verbindungen zwischen Vegetation und Atmosphäre: Interpretation von Versuchen im Freiland in Verbindung mit mechanistischen Experimenten im Labor. Doktorarbeit, Johannes Gutenberg Universität, Mainz.
- Hofmann, U., Hofmann, R. and Kesselmeier, J. (1992): Cryogenic trapping of reduced sulfur compounds using a nafion and cotton wadding as an oxidant scavenger. *Atmos Environ*. Vol 26 A, No. 13,2445-2449.
- Holdridge,L.R.(1967): Life Zone Ecology, Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Holzinger R & Kaizer ,J. (1999): " Öffentliches Plakat " Eine Auswahl atmosphärischer Gase". Max Planck Institut für Chemie, Mainz.
- Honour, S.J., Webb, A.A.R. and Mansfield, T.A. (1995): The responses of Stomata to Absicic

- Acid and Temperature are interrelated. Proceedings of the Royal Society of London B. *Biological sciences*. 259 (1356): 301-306
- Houghton J. (1994): Global Warming. The complete Briefing. Lion Publishing. USA. 1992.
- Huang, Y.; Eglinton, G.; Ineson, P.; Bol, R. and Harkness, D.D. (1999): The effects of nitrogen fertilisation and elevated CO<sub>2</sub> on the lipid biosynthesis and carbon isotopic discrimination in birch seedlings (*Betula pendula*). *Plant and Soil*. 216 (1/2): 35-45
- Huber, B. (1994): Austausch flüchtiger Schwefelverbindungen in land- und forstwirtschaftlichen Ökosystemen. Doktorarbeit, Wissenschaftsverlag, Marau, Frankfurt. 191.
- Hungate, B.A., Jackson, R.B., Field, C.B. and Chapin, III F.S. (1996): Field CO<sub>2</sub> enrichment lack statistical power to detect changes in soil carbon. *Plant Soil*. 187: 135-145.
- Hungate, B.A., Chapin, III F.S., Zhong, H. and Field, C.B. (1997): Stimulation of grassland nitrogen cycling under carbon dioxide enrichment. *Oecologia*. 109, 149-153.
- Humbeck, K., Quast, S., and Kuprinska, K., (1996): Functional and molecular changes in the photosynthetic apparatus during senescence of flag leaves from field-grown barley plants. *Plant Cell Environ*. 19, 337-744.
- Idso, S.B., Kimbal, B.A., Anderson, M.G. and Mauney, J.R. (1987): Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant growth: the interactive role of air temperature. *Agricultural Ecosystems and Environment*. 20, 1-10.
- Idso, S.B. (1989): Carbon Dioxide and Global Change: Earth in Transition. Printed in the United States of America by IBR Press. A division of the Institute for Biospheric Research, Inc. USA.
- Idso, K.E. and Idso, S.B. (1994): Plant responses to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in the face of environmental constraints: A review of the past 10 years research, *Agric. For. Meteorol.*, 69, 153-203.
- Idso, S.B., Kimbal, B.A. and Allen, S.G. (1991): CO<sub>2</sub> enrichment of sour orange trees: 2-5 years into long term experiment. *Plant, Cell and Environment* .14, 351-353.
- Idso, S.B. and Kimbal, B.A. (1991 a): Effects of two and a half years of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the root density distribution of 3 years-old sour orange trees. *Agricultural and Forest Meteorology*. 55, 345-349.
- Idso, S.B. and Kimbal, B.A. (1991 b): Downwards regulation of photosynthesis and growth at high CO<sub>2</sub> levels. No evidence for either phenomenon on three-year study of sour orange trees. *Plant Physiology*. 96, 990-992.
- Idso, S.B. and Kimbal, B.A. (1992a): Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on photosynthesis, respiration and growth of sour orange trees. *Plant Physiology* .99, 341-343.
- Idso, S.B. and Kimbal, B.A. (1992b): Seasonal fine root biomass development of sour orange

- trees grown in atmosphere of ambient and elevated CO<sub>2</sub> concentration . *Plant, Cell and Environment* .15, 337-341.
- Idso, S.B., Kimbal, B.A. and Hendrix, D.L.(1996): Effects of Atmospheric CO<sub>2</sub> Enrichment on chlorophyll and Nitrogen concentrations of sour Orange Tree Leaves. *Environmental and Experimental Botany* .Vol 36. No.3, 323-331.
- Idso, S.B. and Kimbal, B.A. (2001): CO<sub>2</sub> enrichment of sour orange trees: 13 years and counting *Environmental and Experimental Botany*. Vol 46. No.3, 147-153
- Idso, C.D. , Idso, S.B. and Balling, R.C. Jr. (2001): An intensive two-week study of an urban CO<sub>2</sub> dome in Phoenix, Arizona, USA. *Atmospheric Environment* .35, 995-1000.
- Inn,E.C.Y., Vedder, J.F., Tyson, B.J. and O'Hara, D. (1979): COS in the stratosphere, *Geophys.Res.Lett.* 6 (3): 191-193.
- Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II (IPCC WGI): climate change (1990): The Science of Climate change: Contribution of Working Group II. The IPCC Impacts Assessment. edited by W.J.McG. Tegart, G.W. Sheldon and D.C. GriffithsAGPS Press, Cambera, Australia.
- Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III (IPCC WGI): climate change (1991): Policymakers Summary of the Response Strategies: Contribution of Working Group III to the First Assesment Report (FAR) . edited by F. Bernthal, E. Dowdeswell, L. Luo, D. Attard, P. Vellinga, R. Karimanzira. Island Press. Washington, D.C.
- Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group I (IPCC WGI): climate change (1995): The Science of Climate change: Contribution of Working Group I to the Second Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J.T. Houghton, L.G. Meia Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K.Maskell, Cambridge Univ.Press,New York, 1996.
- Jackson, R.B., Sala, O.E., Field, C.B. and Mooney, H.A.(1994): CO<sub>2</sub> alters water use, carbon gain, and yield for the dominant species in a natural grassland. *Oecologia* 98, 257-262.
- Jackson, R.B., Sala,O.E., Paruelo,J.M. and Mooney,H.A. (1998): Ecosystem water fluxes for two grasslands in elevated CO<sub>2</sub>: a modelin analysis. *Oecologia*. 113, 537-546.
- Jacobson, B.C., Fong, F. and Heath,R.L.(1975): Carbonic anhydrase of spinach. *Plant Physiol.* 55, 468-474.
- Johnson, J. E. (1981): The lifetime of carbonyl sulfide in the troposphere. *J.Geophys. Res. Lett.* 8, 934 -940.
- Johnson, D.J., Henderson, P.H., Ball, J.T. and Walker, R.F. (1996): Effects of CO<sub>2</sub> and N on growth and N dynamics in Ponderosa pine: results from the frst two growing seasons. In: Koch GW, Mooney HA(eds) Carbon dioxide and Terrestrial ecosystems. Academic Press, San Diego, pp 23-40.
- Johnson, J.D., Tognetti, .R., Michelozzi,M., Pinzaute, S., Minotta, G. and Borghetti, M. (1997):

- Ecophysiological responses of *Fagus sylvatica* seedlings to changing light conditions. II. The interaction of light environment and soil fertility on seedling physiology. *Physiologia Plantarum*.101,124-134.
- Johnson, D.W., Cheng, W. and Ball J.T. (2000): Effects of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> fertilization on decomposition and N immobilization in ponderosa pine litter. *Plant and Soil*. 224, 115-122.
- Jones, M.B. (1986): The effects of elevated carbon dioxide levels on the growth of crop plants: an attempt to predict the consequences for grassland and maize production in Europe. In: Current Issues in Climate Research, A. Ghazi and R. Fantechi (eds) CEC, Reidel, Dordrecht, The Netherlands.
- Junge, C.E., Chagnon, C.W. and Manson, J.E. (1961): Stratospheric Aerosols, in : *J.Meteorol.* 18, 81-108.
- Kaiser, R. and Gottschalk, G. (1971): Elementare Tests zur Beurteilung von Meßdaten . BI-Hochschultaschenbücher. Band 774.
- Kemp, P.R., Waldecker, D.G., Owensby, C.E., Reynolds, J.F. and Virginia, R.A. (1994): Effects of elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen fertilization pretreatments on decomposition on tallgrass prairie leaf Litter. *Plant Soil* 165, 115-127
- Kesselmeier, J. and Merk, L. (1993): Exchange of carbonyl sulfide (COS) between agricultural plants and the atmosphere: Studies on the deposition of COS to peas, corn and rapeseed. *Biogeochemistry*. 23, 47-59.
- Kesselmeier, J., Merk, L., Bliefernicht, M. and Helas, G. (1993): Trace gas exchange between terrestrial plants and atmosphere: carbon dioxide, carbonyl sulfide and ammonia under the rule of compensation points. In: *General assessment of biogenic emissions and deposition of nitrogen compounds, sulphur compounds and oxidants in Europe, CEC Air Pollution Research Report*. Edited by. J. Slanina, G. Angeletti, and S. Beilke. Vol. 47. Brussels: E. Guyot SA. 71-80.
- Kesselmeier, J., Meixner, F. X., Hofmann, U., Ajavon, A.L., Leimbach, S. and Andreae, M. O. (1993): Reduced sulfur compound exchange between the atmosphere and tropical tree species in southern Cameroon. *Biogeochemistry* 23, 23-45.
- Kesselmeier, J. and Bode, K. (1997): Biological knowledge needed for the measurements and interpretation of exchange processes between plants and the atmosphere. In: Helas, G., Slanina, J. and Steinbrecher, R. (Eds) *Biogenic volatile organic compounds in the atmosphere*, SPB Academic Publishing, pp. 9-25.
- Kesselmeier, J., N. Teusch, and U. Kuhn, (1999): Controlling variables for the uptake of atmospheric carbonyl sulfide (COS) by soil, *J.Geophys. Res.* vol 104 11,577- 11,584.
- Kesselmeier, J., P.Ciccioli, U.Kuhn, P.Stefani, T. Biesenthal, S.Rottenberger, A.Wolf, M. Vitullo, R. Valentini, A. Nobre, P.Kavat, M Andreae. (2002): Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget. submitted, *Global Biogeochemical Cycles*.

- Kettle, A.J., Kuhn, U. von Hobe, M., Kesselmeier, J., Andreae, M.O. (2002): Global Budget of Atmospheric Carbonyl Sulfide: Temporal and Spatial Variations of the Dominant Sources and Sinks, *J. Geophys. Res.* 107(0), XXXX, doi: 10.1029/2002JD002187.
- Kettle, A.J., Kuhn, U. von Hobe, M., Kesselmeier, J., P.S. Liss and Andreae, M.O. (2002): Comparing forward and inverse models to estimate the seasonal variation of hemisphere-integrated fluxes of carbonyl sulfide. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2, 577-621.
- Khalil, M. A. K. and Rasmussen, R. A. (1984): Global sources, lifetimes and mass balances of carbonyl sulfide (OCS) and carbon disulfide (CS<sub>2</sub>) in the Earth's atmosphere. *Atmos. Environ.* 18, 1805-1813.
- Kimball, B.A., Mauney, J.R., Guinn, G., Nakayama, F.S., Pinter, P.J. Jr., Clawson, K.L., Eginato, R.J., Idso, S.B., (1983): Response of vegetation to Carbon Dioxide, No.021: Effects of Increasing Atmospheric CO<sub>2</sub> on the Yield and Water use Crops. US Department of Energy, Washington, D.C.
- Kjellström, E. (1998): A three-dimensional global model study of carbonyl sulphide in the troposphere and the lower stratosphere, *J. Atmos. Chem.* 29, 151-177.
- Kley, D., Crutzen, P.J., Smit, H.G., Vömel, H., Oltmans, S.J., Grassl, H., and Ramanathan, V. (1996): Observations of near-zero ozone concentrations over the convective Pacific: Effects on air chemistry, *Science*. 274, 230-233.
- Kluczewski, S. M., Bell, J.N.B., Brown, K.A. and Minski, M.J. (1983): The uptake of S-carbonyl sulphide by plants and soils, in Ecological aspects of radionuclide release, Special Publication of British Ecological Society III, edited by P.J. Coughtrey, pp. 91-104, Blackwell Scientific Press, Oxford.
- Kluczewski, S.M.; Brown, K.A. and Bell, J.N.B. (1985): Deposition of Carbonyl sulphide to soils. *Atmospheric Environment*. Vol 19. No.8 pp 1295-1299.
- Kluczewski, S. M., Brown, K. A. and Bell, J. N. (1985): Deposition of (35S)-carbonyl sulfide to vegetable crops. *Radiation Protection Dosimetry*. 11, 173-177.
- Kluczewski, S. M., Brown, K. A. and Bell, J. N. B. (1985): Deposition of carbonyl sulphide to soils. *Atmos. Environ.* 19, 1295-1299.
- Kluczewski, S. M., Nair, S. and Bell, J. N. B. (1987): The uptake of (35S)-carbonyl sulfide and (14C) carbon dioxide in the vicinity of an advanced gas cooled reactor. *Radiat. Prot. Dosi.* 20, 221-230.
- Kreyszig, E. (1979): Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Vandenhoeck and Ruprecht. Göttingen. 451.
- Kourtidis, K.A., Borchers, R., Fabian, P., and Harnisch, J. (1995): Carbonyl sulphide (COS) measurements in the -Arctic vortex, *Geophys. Res. Lett.* 22 (4): 393-396.
- Körner, C. and Arnone, III J.A. (1992): Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. *Science*. 257: 1672-1675.

- Ku, S.B. and Edwards, (1975): Photosynthesis in mesophyll protoplasts and bundle sheath cells of various types of C<sub>4</sub> plants. *Pflanzenphysiol.* 77, 16-32.
- Kuhn, U. (1997): Spurengasaustausch klimarelevanter reduzierter Schwefelverbindungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre: COS Transfer der Flechten und anderer biotischer Kompartimente, Doktorarbeit, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.
- Kuhn, U., and Kesselmeier . (2000): Environmental variables controlling the uptake of carbonyl sulphide by lichens, *J. Geophys. Res.* 105, 26,783-26,792.
- Lacis , A., Hansen. and Sato, M. (1992): Climate forcing by stratospheric aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1607-1610.
- Laitinen, K., Luomala, E.M., Kellomaki, S. and Vapaavuori, E. (2000): Carbon assimilation and nitrogen in needles of fertilized and unfertilized field –grown scots pine at natural and elevated concentrations of CO<sub>2</sub>. *Tree Physiology.* 20 (13) 881-892.
- Lamb, B., Westberg, H., Allwin, G. and Bamesberger, L. (1987): Measurements of biogenic sulfur emissions from soils and vegetation: application of dynamic enclosure methods with natusch filter and GC/FPD Analysis. *Journal of Atmospheric Chemistry.* 5, 469-491.
- Lawlor, D.W. and Mitchell, R.A.C. (1991): The effects of increasing CO<sub>2</sub> on Crop photosynthesis and productivity. A review of field studies. *Plant cell and Environment.* 14 (8) 807-818
- Leifer, R., (1989): Project Airstream: COS measurement in the stratosphere and troposphere, *J. Geophys. Res.*, 94 d (4): 5173-5181.
- Lewis, C.E., Peratoner, G., Cairns, A.J, Causton, D.R. and Foyer, C.H. (1999): Acclimation of the summer annual species, Lolium temulentum, to CO<sub>2</sub> enrichment. *Planta.* 210 (1) 104-114.
- Li ,J.H, Dijkstra, P., Hymus, G.J., Wheeler, R.M., Piatusch, W.C., Hinkle, C.R. and Drakes, B.G.(2000): Leaf senescence of Quercus myrtifolia as affected by long term CO<sub>2</sub> enrichment in its native einvironment. *Global Change Biology.* 6 (7) 723-733.
- Li, J.H, Dijkstra, P., Hinkle, C.R., Wheeler, M. and Drakes, B.G. (1999): Photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in the Florida scrub-oak species Quercus geminata and Quercus myrtifolia growing in their native environment. *Tree Physiol.* 19 (4-5) 229-234.
- Louisnard , N., Fergant G., Girard A., Gramont, O., Lado-Borodowsky, J., Laurent,S., Le Boiteux. and Lernautre, M.P. (1983): Infrared absorption spectroscopy applied to stratospheric profiles of minor constituents. *J. Geophys. Res.*, 88, 5365-5376.
- Lutz, C., Anegg, S., Gerant, D., Alaoui-Sosse, B., Gerard, J. and Dizengremel, P. (2000): Beech trees exposed to high CO<sub>2</sub> and to simulated summer ozone levels: Effects on photosynthesis, Chloroplast components and leaf enzyme activity. *Physiologia Plantarum.* 109 (3) 252- 259 .

- Majeau, N. and coleman, J.R. (1996) , Effect of CO<sub>2</sub> concentration on carbonic anhydrase and ribulose 1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase expression in pea. *Plant physiol.* 112 (2) 569-574.
- Marriot, D.J., Stirling, C.M. and Farrar, J. (2001) ,Constrain to growth of annual nettle (Urtica urens) in a elevated CO<sub>2</sub> atmosphere: Decreased leaf area ratio and tissue N cannot be explained by ontogenetic drift or mineral N supply. *Physiologia Plantarum.* 111, 1:23-32.
- Maroulis, P.J., Torres, A.L. and Bandy, A.R. (1977): Atmospheric concentrations of carbonyl sulfide in the southwsternand eastern United States.*Geophys.Res.Lett.*, 4 (11): 510-512.
- Medlyn, B.E., Barton, C.V.M, Broadmeadow, M.S.J, Ceulemans, R., De Angelis, P., Forstreuter,M., Freeman, M., Jackson, S.B., ellomaki, S., Laitat, E., Rey, A., Roberntz p, Sigurdsson BD, Strassemeyer, J., Wang, K., Curtis, P.S. and Jarvis, P.G. (2001): Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO<sub>2</sub> concentration : asynthesis *New Phytologist.* 149 (2): 247-264.
- Mihalopoulos, N., Putaud, J. P., Nguyen, B. C. and Belviso, S. (1991): Annual variation of atmospheric carbonyl sulfide in the marine atmosphere in the southern Indian Ocean. *J. Atmos. Chem.* 13, 73-82.
- Mihalopoulos, N., Putaud, J. P., Nguyen, B. C. and Belviso, S. (1992): The oceanic source of carbonyl sulphide (COS): *Atmos. Environ. Part A*, 26, 1383-1394.
- Miller , A.G., Espie,G.S. and Canvin, D.T.(1989): Use of carbon oxysulfide, a structural analog of CO<sub>2</sub>, to study active CO<sub>2</sub> transport in the cyanobacterium *Synechococcus* UTEX 625. *Plant Physiol.* 90,1221-1231.
- Miller, J.C. and Miller, J.N. (1993): Statistics for analytical chemistry, Ellis Horwood PTR Prentice Hall, New York, 3<sup>rd</sup> edition. 202.
- Morgan, J.A, Hunt, H.W, Monz, C.A. and LeCain, D.R. (1994): Consequences of long-term growth at various CO<sub>2</sub> and temperatures to leaf gas exchange of *Pascopyrum smithii* (C<sub>3</sub>) and *Bouteloua gracilis* (C<sub>4</sub>): *Plant Cell Environ.*
- Morison, J.I.L. (1985): Sensitivity of stomata and water use efficiency to high CO<sub>2</sub>. *Plant Cell and Environment.* 8, 467-475.
- Morison, J.I.L. (1987): ' Intercellular CO<sub>2</sub> concentration and stomatal response to CO<sub>2</sub>'. In: Stomatal Function, E. Zeiger, I.R. Cowa and G.D. Farquhar (eds). Stanford University Press, ch. 10,pp.229-251.
- Morison, J.I.L. (1989): Plant growth in increased atmospheric CO<sub>2</sub>. In: Carbon Dioxid and other Greenhouse Gases: Climatic and Associated Impacts, R. Fantechi and A. Ghazi (eds) . CEC, Reidel , Dordrecht, The Netherlands, pp. 228-244.
- Mousseau, M. (1993): Effects of elevated CO<sub>2</sub> on growth,photosynthesis and respiration of sweet chesnut seedling (Castanea sativa Mill.) *Vegetatio.* 104/105, 413-419.

- Mousseau ,M. and Saugier,B. (1992): The direct effect of increased CO<sub>2</sub> on gas exchange and growth of forest tree species. *Journal of Experimental Botany* .43, 1121-1130.
- Murray D.R.(1997): Carbon dioxide and Plant Responses. Research Studies Press LTD. Taunton, England.275.
- Nguyen,B.C., Mihalopoulos, N., Putaud, J.P. and Bonsang, B. (1995): Carbonyl sulfide emission from biomass burning in tropics, *J. Atmos. Chem.*, 22, 55-65.
- Norby, R.J. and O'Neill, E.G. and Luxmoore,R.J. (1986): Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the growth and mineral nutrition of Quercus alba seedlings in nutrient-poor soil. *Plant physiol.* 82, 83-89.
- Norby, R.J. and O'Neill, E.G. (1989): Growth dynamics and water use of seedlings of Quercus alba L. in CO<sub>2</sub> enriched atmospheres. *New Phytologist*. 111, 491-500.
- Norby, R.J., Gunderson, C.A. , Wullschleger. S.D. O'Neill E.G. and McCracken, M.K. (1992): Productivity and compensatory response of yellow-poplar trees in elevated CO<sub>2</sub>. *Nature*. 357, 322-324.
- Norby, R.J. (1996) , Forest canopy productivity index. *Nature*. 381, 564.
- Norby, R.J., Wullschleger, S.D., Gunderson, C.A. , Johnson, D.W. and Ceulemans, R. (1999): Tree responses to rising CO<sub>2</sub> in field experiments: implications for the future forest. *Plant Cell and environment*. 22 (6) 683-714.
- Oechel, W.C., Hastings, S.J., Vourlitis, G.L., Jenkins, M., Riechers, G. and Grulke, N. (1993): Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. *Nature* 361, 520-523.
- Oechel, W.C. and Vourlitis, G.L. (1996): Direct effects of elevated CO<sub>2</sub> on Arctic plant and ecosystem function. In: Koch GW, Mooney HA(eds) Carbon dioxide and Terrestrial ecosystem. Academic Press, San Diego.
- Osborne, C.P, Mitchell, P.L, Sheehy, J.E., and Woodward, F.I. (2000): Modelling the recent historical impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> and climate change on Mediterranean vegetation. *Global Change Biology*. 6(4) 445-558.
- Overdieck,D. (1993): Erhohte CO<sub>2</sub>-Konzentration und Wachstum junger Buchen (Fagus sylvatica) Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Band 22. 431-438.
- Owensby, C.E., Coyne, P.I, Ham, J.M., Auen, L.M. and Knapp, A.K. (1993): Biomass production in a tallgrass prairie ecosystem exposed to ambient and elevated CO<sub>2</sub>. *Ecol Appl* 3, 644-653.
- Owensby, C.E., Ham, J.M., Knapp,A.K., Rice, C.W., Coyne, P.I. and Auen, L.M. (1996): Ecosystem-level responses of tallgrass prairie to elevated CO<sub>2</sub>. In: Koch GW, Mooney HA (eds)Carbon dioxide and terrestrial ecosystems. Academic Press, San Diego, pp147-162.

- Owensby, C.E., Ham, J.M., Knapp, A.K., Bremmer, D. and Auen, L.M. (1997): Water vapour fluxes and their impact under elevated CO<sub>2</sub> in a C<sub>4</sub>-tallgrass prairie. *Global change Biol.* 3, 189-196.
- Pan, Y.D., Melillo, J.M., McGuire, A.D., Kicklighter, D.W., Pitelka, L.F., Hibbard, K., Pierce, L.L., Running, S.W., Ojima, D.S., Parton, W.J., Schimel, D.S. and other VEMAP members. (1998): Modeled responses of terrestrial ecosystems to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>: a comparison of simulations by the biogeochemistry models of the Vegetation /Ecosystem Modeling and Analysis Project (VEMAP). *Oecologia.* 114, (3) 389-404
- Peñuelas, J. and Estiarte, M. (1998) , Can elevated CO<sub>2</sub> affect secondary metabolism and ecosystem function? *Tree.* vol 13, No. (1) 20-24.
- Petterson, R., McDonald, A.J.S. and Stadenberg, I. (1993): Response of small birch plantss (*Betula pendula* Roth.) to elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen supply. *Plant, Cell and Environment* 16, 1115-1121.
- Petterson, R. and McDonald, A.J.S.(1994) , Effects of nitrogen supply on the acclimation of photosynthesis to elevated CO<sub>2</sub>. *Photosynthesis Research.* 39, 389-400.
- Peuser, D. (1995): Planung und Aufbau computergesteuerter Expositions-kammern zur Umweltstimulation für Pflanzen. Dissertation. Johannes Gutenberg- Universität Mainz.
- Poincelot, R . P. (1979): Carbonic anhydrase. *Encyc. of Plant Physiol.* New series Vol.6,230-238.
- Porter, M.A. and Grodzinski, . (1984): Acclimation to CO<sub>2</sub> in Bean. Carbonic Anhydrase and Ribulose biphosphat Carboxylase. *Plant Physiol.*74 ,413-416.
- Porter, M.A. and Grodzinski, . (1983): Regulation of chloroplastic carbonic anhydrase. *Plant Physiol.* 72, 604-605.
- Porter, H. (1993): Interspecific variation in the growth response of plant o an elevated ambient CO<sub>2</sub> concentration. *Vegetatio* 104/105, 7 -97.
- Pos, W. H. and Berresheim, H. (1993): Automotive tire wear as a source for atmospheric OCS and CS<sub>2</sub>, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 815-817.
- Price, G.D. and Badger, M.R. (1989): Isolation and Characterization of high-CO<sub>2</sub> requiring mutants of the cyanobacterium *Synechococcus* PCC7942: Two within the carboxyzone. *Plant Physiol.* 91, 514-525.
- Price, G.D., von Caemmerer, S., Evans, J.R., Yu, J.-W. and Lloyd, J. (1993): Specific reduction of chloroplast carbonic anhydrase activity by antisense RNA in transgenic tobacco plants has a minor effect on photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation. *Planta.*
- Protoschill-Krebs, G. (1991): Untersuchungen zur Aufnahme und zum Metabolismus von Carbonylsulfid in Pflanzen. Doktorarbeit, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.
- Protoschill-Krebs, G. and Kesselmeier, J. (1992): Enzymatic pathways for the consumption of

- carbonyl sulphide (COS) by higher plants. *Bot. Acta* 105, 206-212.
- Protoschill-Krebs, G., Wilhelm, C. and Kesselmeier, J. (1995): Consumption of carbonyl sulfide by *Chlamydomonas reinhardtii* with different activities of carbonic anhydrase (CA) induced by different CO<sub>2</sub> growing rates. *Bot. Acta* 108, 445-448.
- Protoschill-Krebs, G., Wilhelm, C. and Kesselmeier, J. (1996): Consumption of carbonyl sulfide (COS) by higher plant carbonic anhydrase (CA). *Atmospheric Environm.* 30, 3151-3156
- Rasmussen, R.A., Khalil, M.A.K., Dalluge, R.W., Penkett, S.A. and Jones, B. (1982b): Carbonylsulfide and carbon disulfide from the eruptions of Mount St. Helens. *Science*. 215, 665-667.
- Rasmussen, R.A., Khalil, M.A.K. and Hoyt, S.D. (1982c): The oceanic source of Carbonyl sulfide (OCS). *Atmos. Envir.* 16/6, 1591-1594.
- Reid, C.D. and Fiscus, E.L. (1998): Effects of elevated CO<sub>2</sub> and / or ozone on limitations to CO<sub>2</sub> assimilation in Soybean (*Glycine max*). *Journal of Experimental Botany*. Vol 49, No. 322, 885-895.
- Reid, C.D., Fiscus, E.L. and Burkey, K.O. (1998): Combined effects of chronic ozone and elevated CO<sub>2</sub> on Rubisco activity and leaf components in soybean (*Glycine max*). *Journal of Experimental Botany*. Vol 49, No. 329, 1999-2011.
- Reining, F., 1990. Langzeiteffekte von erhöhtem CO<sub>2</sub>-Angebot auf das Wachstum von *Acer pseudoplatanus* und *Fagus sylvatica*. Dissertation, Universität Osnabrück.
- Richter, G. 1996, Biochemie der Pflanzen. George Thieme Verlag. Stuttgart.
- Richter, G. 1997, Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. George Thieme Verlag. Stuttgart.
- Rizzo, B & Wirken, E. (1989): " Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climate change", presented at European Conference on Landscape Ecological Impact of Climate Change, 3-7 December 1989, Lunteren, The Netherlands.
- Rodhes, C., ridel, S.A., West, J., Williams, B.P., and Hutchings, G.J. : The low-temperature hydrolysis of carbonyl sulphide and carbon disulfide: a review, *Catalysis Today*, 59, 443-464.
- Rodríguez, J. M., Ko, M.K.W. and N.D. Sze. (1991): Role of heterogeneous conversion of N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on sulphate aerosols in global ozon loses, *Nature*. 352, 134-137.
- Rogers, A. and Humphries, S.W. (2000): A mechanistic evaluation of photosynthetic acclimation at elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*. 6 (8) 1005-1011.
- Rozema, J. (1993): Plant Responses to Atmospheric Carbon Dioxid Enrichment: Interactions with some soils and Atmospheric Conditions. *Vegetatio*. 104/105, 173-190.
- Sachs, L. (1984): Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden. 6. Auflage Springer Verlag.

- Sachs, L. (1969): Statistische Auswertungsmethoden. . Springer Verlag .677.
- Sage, R.F. (1994): Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO<sub>2</sub>: The gas exchange perspective. *Photosynthesis Research* . 39, 351-368.
- Sandalls, F.J. and Penkett, S.A. (1977): Measurements of Carbonyl sulphide and carbon disulphide in the atmosphere. *Atmos. Environ.* 11, 197-199.
- Sargent, N.E. (1988): 'Redistribution of the Canadian boreal forest under a warmed climate' *Climatological Bulletin.* 22 (3).
- Schneider S.H. (1989): „The greenhouse effect: Science and Policy“. *Science.* 243.pp,771-781.
- Schönwiese, C.D. und Diekmann, B. (1987): Der Treibhauseffekt. Der Mensch ändert das Klima. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart. 232.
- Schönwiese, C.D. (1991): Das Problem menschlicher Eingriffe in das Globalklima ("Treibhauseffekt") in aktueller Übersicht. Frankfurt am Main: Johann Wolfgang Goethe-Universität. Frankfurt. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, Meteorologie und Geophysik, Band 3, 142.
- Schönfelder, I. and Schönfelder, P., (1990): Die Kosmos-Mittelmeerflora, Franckh-Kosmos Verlag 2. Auflage.
- Shvidenko, A. and Nilsson, S. (1994): What do we know about the Siberian forests? *Ambio.* 23 (7): 396-404.
- Shugart, H.H. , Antonovsky, M. Ya., Jarvis, P.G. and Sandford, A.P. (1986): "CO<sub>2</sub> climatic change and forest ecosystem ", In: The Greenhouse Effect, Climatic change and Ecosystems, .Bolin, B., Doos, B.R., Jager, J. and Warrick, R.A. (eds). Scope 29, John Wiley and Sons, Chichester, U.K. 475-521.
- Schulze, E.D. and Mooney, H.A. (1993): Design and execution of experiments on CO<sub>2</sub> enrichment. Ecosystems Research Report no. 6, C.E.C. Publishers, Luxemburg.
- Sicher, R.C. and Kremer, D.F. (1996): Rubisco activity is altered in a starchless mutant of *Nicotiana sylvestris* grown in elevated Carbon Dioxid. *Environmental and Experimental Botany.* Vol36.No.4.385-391.
- Sims, D.A, Luo, Y. and Seemann, J.R. (1998): Comparison of photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> and limited nitrogen supply in soybean. *Plant Cell and environment.* 21(9): 945-952.
- Sims, D.A., Cheng, W, Luo, Y. and Seemann, J.R. (1999): *Journal of Experimental Botany*, vol. 50, No. 334, 645-653.
- Stirling, C.M., Davey, P.A., Williams, T.G. and Long, S.P. (1997): Acclimation of photosynthesis to elevated CO<sub>2</sub> and temperature in five British native species of contrasting functional type. *Global Change Biology.* 3 (3) 237-246.

- Stitt, M. and Krapp. (1999): The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: The physiological and molecular background. *Plant, Cell and Environment*. 22, 583-621.
- Solomon, A.M. (1986): 'Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climate change: simulation modelling experiments in eastern North America'. *Oecologia*. 68, pp.567-579.
- Solomon, S., Sanders, R. W., Garcia, R. R. and Keys, J. G. (1993): Increased chlorine dioxide over Antarctica caused by volcanic aerosols from Mount Pinatubo. *Nature*. 363, 245-248.
- Stirling, C., Davey, P.A., Williams, T.G. and Long S.P. (1997): Acclimation of photosynthesis to elevated CO<sub>2</sub> and temperature in five British species contrasting functional type. *Global Change Biology*. 3, 237-246.
- Strain, B.R. and Cure, J.D. (eds) (1985): Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. United States. Department of Energy. DOE/ER-0238.
- Strasburger, E. (1998): Lehrbuch der Botanik, 34. Aufl.. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Stocker R, Leadley, P.W. and Körner, C.(1997): Carbon and water fluxes in a calcareous grassland under elevated CO<sub>2</sub>. *Funct Ecol*. 11, 222-230.
- Taylor, G. E., McLaughlin, S. B., Shriner, D. S. and Selvidge, W. J. (1983): The flux of sulfur-containing gases to vegetation. *Atmos. Environ*. 17, 789-796.
- Tipler, P.A. (1994): Essay Der Energiehaushalt der Erde und die globale Erwärmung. In: Physik. Spektrum. Berlin.575-583
- Tissue, D.T., Thomas, R..B. and Strain, B..R., (1993): Long-term effects of elevated CO<sub>2</sub> and nutrients on photosynthesis and rubisco in loblolly pine seedlings. *Plant. Cell and Environment*. 16, 859-865.
- Tissue, D.T., Griffin, K.L. and Ball, J.T. (1999): Photosynthetic adjustment in field –grown ponderosa pine trees after six years of exposure to elevated CO<sub>2</sub>. *Tree Physiol*. 19 (4-5) 221-228.
- Thomas, R.B., Lewis, J.D. and Strain, B.R. (1994): Effects of leaf nutrient status on photosynthetic capacity in loblolly pine (*Pinus taeda* .) seedlings grown in elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Tree Physiol*. 14 , 947-950.
- Tognetti, R., Johnson, J.D. and Michelozzi, (1997): Ecophysiological responses of *Fagus sylvatica* seedlings to changing light conditions. I. Interactions between photosynthetic acclimation and photoinhibition during simulated canopy gap formation. *Physiologia Plantarum*. 101,115-123.
- Tognetti, R., Johnson, J.D., Michelozzi, X and Raschi, A. (1998): Response of foliar metabolism in mature trees of *Quercus pubescens* and *Quercus ilex* to long elevated CO<sub>2</sub>. *Environmental and Experimental Botany*. 39, 233-245.

- Tsuzuki, M., Miyachi, S., Winter, K. and Edwards, G.E. (1982): Localization of carbonic anhydrase in crassulacean acid metabolism plant. *Plant Sc. Lett.* 24, 211-21.
- Tsuzuki, M., Miyachi, S. and Edwards, G.E. (1985): Localization of carbonic anhydrase in mesophyll cells of terrestrial C3 plants in relation to CO<sub>2</sub> assimilation. *Plant Cell Physiol.* 26 (5): 881-891.
- Ulshöfer, V. S. and Andreae, M. O. (1998): Carbonyl sulfide (COS) in the surface ocean and the atmospheric COS budget, *Aquatic Geochemistry*, 3, 283-303.
- Van Dijk, S. (2001): Nitric oxide emissions from soils: effects of deforestation. Ph.D. Thesis. Universiteit Utrecht. Netherlands.
- Vogel, C.S. and Curtis, P.S. (1993): CO<sub>2</sub> and fertility effects on above growth and leaf gas exchange of populus euroamericana cv. Euglenei. *Bull Ecol Soc Amer Supplement* 74 (2) 471.
- Von Hobe, M. (2000): Ph.D.dissertation, University of East Anglia, Norwich, England.
- Von Hobe, M., Kenntner, T., Helleis, F.H., Sandoval-Soto, L. and Andreae.M.O. (2000): Cryogenic Trapping of Carbonyl Sulfide without Using Expendable Cryogenes. *Analytical chemistry*. 10.1021/ac00058fCCC. Published on Web.
- Von Hobe, M., Cutter, G.A. Kettle, A.J. and Andreae, M.O. (2001): Dark production: A significant source of Oceanic COS. *J. Geophys. Res.* 106. 3127-31226.
- Vu, C.V., Allen, L.H., Boote, K.J. and Bowes, G. (1997): Effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. *Plant Cell and Environment* 20, (1) 68-76.
- Wait, D.A., Jones, C.G., Wynn, J. and Woodward, F.I. (1999): The fraction of expanding to expanded leaves determines the biomass response of Populus to elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia*. 121 (2) 193-200.
- Warrick R.A., R.M. Gifford, M.L.Parry. (1986): CO<sub>2</sub> Climatic Change and Agriculture. Chapter 9. In: The Greenhouse effect Climatic change and ecosystems. John Wiley and Sons. New York. . 541.
- Watts, S.F. (2000): The mass budgets of carbonyl sulfide, dimethyl sulfide, carbon disulfide and hydrogen sulfide. *Atmospheric Environment* . 34 ,761-779.
- Werdan, K., Heldt, H.W. and Geller, G. (1972): Accumulation of bicarbonate in intact chloroplasts following a pH gradient. *Biochem. Biophys. Acta.* 283, 430-441.
- Wigley T.M.L. (1988): Future CFC concentrations under the Montreal Protocol and their greenhouse-effect implications. *Nature*. 335:333-335
- Wigley T.M.L. (1989): Possible climate change due to SO<sub>2</sub>-derived cloud condensation nuclei. . *Nature*. 339:365-367.

- Wilbur, K.M. and Anderson, N.G. (1948): Electrometric and Colorimetric determination of Carbonic Anhydrase. *J.Biol.Chem.* 176, 147-154.
- Willert, D.J; Matyssek, R. and Herppich, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Wilske, B. (2000): A study on the exchange of volatile organic compounds (VOCs) between lichens and the atmosphere. Ph.D.dissertation, Universität Mainz.
- Woodwell, G.M. (1996): Das Kohlendioxid -Problem. Spektrum der Wissenschaft, Sammelband Atmosphäre, Klima, Umwelt, 168-177; Original: Spektrum der Wissenschaft, Erstedition (1978)
- Woodwell, G.M. (1996): Das Kohlendioxid -Problem. In: Atmosphäre, Klima, Umwelt. 2. Auflage Spektrum.
- Xu ,X. ( 2001): Investigations into the tropospheric cycle of COS: Atmospheric distribution, air sea and air vegetation exchanges. Dissertation. Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt an Main.
- Xu ,X; H.G.Bingemer and U.Schmidt. ( 2002): The Flux of carbonyl sulphide and carbon disulfide between the atmosphere and a spruce forest. *Atmos.Chem.Phys.* 2,181-212.
- Zak, D.R., Pregitzer, K.S., Curtis, P.S., Teeri, J.A., Fogel, R. and Randlett, D.L. (1993): Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and feedback between carbon and nitrogen cycles. *Plant and Soil.* 151, 105-117.

## 7.1 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
m	Linearer regression
$A_{\text{Blatt}}$	Blattoberfläche
$A_{\text{CO}_2}$	Assimilation
Abb.	Abbildung
ABS	Abscisinsäure
ADP	Adenosindiphosphat
aH	$10^{-\text{pH}}$ , Aktivität von $\text{H}^+$ im Wasser
aF <sub>Blatt</sub>	Absolutfeuchte des Blattes
aF <sub>Küv</sub>	Absolutfeuchte der Küvette
ARGON	Kryokonzentration von COS erfolgt mit Argon
$A_{\text{Spezies}}$	Blattoberfläche der Spezies
ATP	Adenosin 5Triphosphat
$A_{\text{VT}}$	Fläche des Vegetationstyps
b	linearer regression (Y-Achsenabschnitt)
BF	Blattfläche
BAF	Blattaktivfläche
BICINE	N,N-Bis-2-Hydroxyethyl-Glycine
c	konzentration
C	Kohlenstoff
°C	Grad Celcius
C3	CO <sub>2</sub> Fixierung in C3 Verbindung
C4	CO <sub>2</sub> Fixierung in C4 Verbindung
C4-säure	(Oxalacetat, Malat, Aspartat)
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	Glukose (Zucker)
$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_4$	Bicine
$\text{CH}_3\text{SH}$	Methylmercaptan
CA	Carboanhydrase sinonim Kohlenanhydrase
CAM	Crasulaceen Säurestoffwechsel (Crasulacea Acid Metabolism)
$\text{CaCl}_2$	Calciumchlorid
CCN	cloud condensation nuclei (engl.)=Wolkenkondensationkerne
$\text{CO}_2$	Kohlendioxid
$[\text{CO}_2]$	Atmosphärische CO <sub>2</sub> Konzentration ~ 350 ppm
COS	Carbonylsulfid
$[\text{COS}]$	Atmosphärische COS Konzentration ~ 500 ppt
$\text{CO}_3^-$	Carbonat
$\text{CS}_2$	Schwefelkohlenstoff
DMS	Dimethylsulfid ( $(\text{CH}_3)_2\text{S} = \text{CH}_3\text{SCH}_3$ )
$\text{CH}_3\text{SSCH}_3$	Dimethyldisulfide
E	Sättigungdampfdruck in h Pa
EDTA	Ethylendiaminetetraessigsäure
E-LAB	Software Programm für Chromatographie
Err	Fehler (error)
et al.	und andere
F	Spurengasfluss
$F_{\text{N}}$	Netto-Spurengasfluss
$F_{600}$	Normierter COS Spurengasfluß

Fa	Firma
FC	Massendurchflußregler (flowcontroller)
FEP	Teflon-FEP (Tetrafluorethylenperfluorpropylen)
FS	Fagus sylvatica
FPD	Flammen-Photometrischer-Detektor
FM	Massendurchflußmesser (flowmeter)
Ftest	Vergleichstest für Mittelwert
g	Gramm
Gew.	Gewicht
Gmol	$10^9$ mol, Gigamol
gs	Stomatäre Leitfähigkeit
GC	Gaschromatographie
H	Wasserstoff
H+	W-Protonen
<i>h</i>	Hydrolyserate
<i>hPa</i>	Hekto Pascal
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
<i>h<math>\nu</math></i>	<i>Wellenlänge</i>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Carbonat (Anion der Kohlensäure)
H <sub>2</sub> O	Wasser
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
He	Helium
IBlatt	Blattflächeindex = LAI
IBlatt <sub>VT</sub>	Blattflächeindex des Vegetationstyps
ID	Innerer Durchmesser (inner diameter)
JCOS	Globale COS-Senkenstärke
J	Joule
K	Kelvin
<u>K</u>	Koeffizient der Depositionsgeschwindigkeit
K <sub>max</sub>	maximal Koeffizient der Depositionsgeschwindigkeit
K <sub>min</sub>	minimal Koeffizient der Depositionsgeschwindigkeit
Kap.	Kapitel
KCl	Kalium Chlorid
k <sub>D</sub>	Depositionskonstante
K <sub>M</sub>	Michaelis-Konstante
K <sub>w</sub>	Ionenprodukt
LAI	Verhältnis von Blattfläche zu Erdbodenfläche (Leaf Area Index) (hier: Gesamtblattfläche zu Gesamtbodenfläche des Ökosystems)
l	Liter
Ls	Stom. Leitfähigkeit
m	Masse
ml	$10^{-3}$ Liter (Milliliter)
mMol	
mm	$10^{-3}$ m, Millimeter
mg	$10^{-3}$ g, Milligram
min	Minute
mCOS	Masse des COS
m <sub>F</sub>	Frischgewicht
mmeß	Masse von COS in Meßküvette

mRef	Masse von COS in Referenzküvette
MeSH	Methylmercaptan (CH <sub>3</sub> SH)
MG	Molekulargewicht
mM	10 <sup>-3</sup> Mol (Millimol)
MV	Molvolumen
MCO <sub>2</sub>	Molare Masse von CO <sub>2</sub>
MCOS	Molare Masse von COS
MPCH	Max-Planck-Institut für Chemie
n	Anzahl der Meßwerte
ng	10 <sup>-9</sup> g, Nanogram
nm	10 <sup>-9</sup> Meter (Nanometer)
nmol	10 <sup>-9</sup> Mol (Nanomol)
N <sub>2</sub>	Stickstoff
NaCl	Natriumchlorid
NADP	Nicotinsäureamidadenindinucleotidphosphat
NaOH	Natriumhydroxid
NPP	Nettoprimärproduktion
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
OH	OH-Radikal
OOA	Oxalacetat
p	Wahrscheinlichkeit (probability)
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung (photosynthetic active radiation)
PC	Personal Computer
Pep-Co	Phosphoenolpyruvat-Carboxylase
PFA	Teflon PFA (Perfluoralkoxy)
pH	Logarithmus der Konzentration von H <sup>+</sup>
pks	
PMSF	8-Phenylmethylsulphonylfluorid
pmol	10 <sup>-12</sup> Mol (Picomol)
PTFE	Teflon PTFE (Polytetrafluorethylen)®
ppb	10 <sup>-9</sup> Mischungsverhältnis (parts per billion by volume)
ppm	10 <sup>-6</sup> Mischungsverhältnis Teil auf eine Million (parts per million by volume)
ppt	10 <sup>-12</sup> Mischungsverhältnis Teil auf eine milliarde (parts per trillion by volume)
Q.ilex.	Quercus ilex
Q	Durchflussrate
R	Korrelationskoeffizient
RCOS	COS Transportwiderstand
R <sup>1</sup>	Allgemeine Gas Konstant (8,314 J/molK)
R*	COS Ratio
R <sub>Ass</sub>	Assimilation Ratio
R <sub>amb</sub>	Ambient Ratio
ref	Referenz
rh	relative Luftfeuchte (relative humidity)
RubisCo	Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/-Oxygenase
S	Schwefel
SUGAR	SchwefelGasAnalysator (Kryokonzentration von COS erfolgt mit Hilfe eines Kühlagregates)
s	Sekunde
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid

---

$\text{SO}_4^{2-}$	Sulfat-Ion
T	Temperatur
Tg	Tera $10^{12}$
T0	Zeit der pH Erniedrigung ohne CA
TE	Zeit der pH Erniedrigung mit CA
Tg	$10^{12}$ g, (Terragramm)
$T_{\text{H}_2\text{O}}$	Transpiration
TN	Normal Temperatur = 273,15 K
T-test	Vergleich der Standardabweichung
$\mu\text{E}$	$10^{-6}$ Mol Photonen (Mikrostein)
$\mu\text{g}$	$10^{-6}$ g, Microgram
$\mu\text{mol}$	$10^{-6}$ Mol (Mikromol)
V	Volumen
$v_{\text{DCO}_2}$	$\text{CO}_2$ -Depositionsgeschwindigkeit
$v_{\text{DCOS}}$	COS-Depositionsgeschwindigkeit
$V_s$	Gesammeltes Volumen
UV	Ultraviolettes Licht
W	Watt
WUE	Wassernutzungseffizienz
$\sigma$	Standardabweichung
$\Omega$	Spezifische Leitfähigkeit
$\Sigma$	Summe
f	Temperatur
$\alpha$	Geboren
$\dagger$	Gestorben

## 7.2 Verwendete Hilfsmittel

### Versuchpflanzen:

*Fagus sylvatica* l.

*Quercus ilex* l.

Burncoose and South Down Nurseries,  
Gwennap, Redruth, England

### Klimakammer:

LKB Bromma 2023 Minicold Lab

HQI-TS Powerstar 150 watts/D UVS  
Gaswechselanlage

OSRAM  
Institut für Allgemeine Botanik , Johannes  
Gutenberg Universität Mainz

Pflanzenwuchsschrank  
Powerspot 150 W TS

OSRAM

### Küvettenystem und COS Gaswechselanlage:

ADC 2250, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Analyzer  
Analysewaage (2004 MP)  
Automatischen Sammeleinheit  
Campbell Modell 21 x Micrologger  
Cryotiger  
Datenerfassungsprogram E-Lab  
Dewargefäß 2 L  
Dewargefäß 0,5 L  
Digitalwaage (PM 400)  
Electronicrührer Multipoint HP  
Eppendorf Pipete (100-1000ul)  
Eppendorf Pipete (10-100ul)  
FPD Dtektor  
Flachbettscanner, SCANJET II cx  
Folienweißgerät  
GC Offen  
HPLC Spritze , 1000 uL  
Kryofalle  
LI-COR, LI-6262, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Analyzer  
Luftfeuchte, Temperatur-Sensor, Hmp  
Massenflussmeter  
  
Massenflussmeter (Unit: MGC-xxx)  
Membranpumpe  
Membranpumpe 24 V  
Motor 12 V  
Multigas-Controller  
Nafion Trockner  
PAR Sensor: Li 190 sz Quant sens.  
Permeation offen

Sartorius, Gottingen  
MPI, eigenbau  
Campbell Scientific Ltd., England  
APD Cryogenics, Allentown, PA, USA  
Fa. OMS Tech, Miami USA  
Isotherm, Oskar Glock, Offenbach  
Isotherm, Oskar Glock, Offenbach  
Mettler-Toledo, Gießen  
Variomag  
Eppendorf  
Eppendorf  
DI 200, Fa. Delsi, Paris  
Hewlett Packard, Greeley, Colorado, USA  
Joisten-Kettenbaum, Bergisch Gladbach  
Hewlett Packard, Greeley, Colorado, USA  
Hamilton  
MPI, eigenbau  
LI-COR -278 Fa. Walz, Effeltrich  
Vaisala, Helsinki, Finnland  
Hastings, Klaus Schäfer, Gesellschaft für  
Verfahrenstechnik, Langen  
MKS-Instruments, Massachusetts, USA  
Neuberger , Freiburg  
Neuberger , Freiburg  
Escap  
MKS-Instruments 996306  
Fa. Perma Pure Inc., Farmingdale, USA  
LI-COR (s.o)  
Haunold, Frankfurt

Permeation offen	MPI, Eigenbau
Permeationsröhrchen	VICI, Metronics, kalifornien, USA
PH Elektrode	INGOLD U-455-ST
PHmeter	WTW, 537
Plexiglas Ringe	MPI, eigenbau
Scanner software: Deskann II,200 A	Hewlett Packard (s.o)
Schlauchverbinder Galtek ®	Fluoroware Inc., Minnesota, USA/MSD, München
Swagelok®	Best, Maintal-Dörnigheim
Software: Size 1,10 release	Müller, M. Mainz
Taupunktgenerator (LI-601)	LI-COR Fa.,Walz,Effeltrich
Teflonfilter (2 um Porengröße)	Gelman- Science, Roßdorf
Teflonfolie: Fluorocarbon, 50 um	Du Pont de Nemours, Düsseldorf
Teflonschläuche	MSD, München
Termoelementen (Typ Chrom-kontantan)	Omega, England
Vakumkopf	MPI, Eigenbau
Zentrifuge	

## Chemikalien

Abscisinsäure 99% Reinheit	Fluka, Buchs, Schweiz.
Aceton	Merk Darmstadt
Aktivkohle	Merk Darmstadt
BICINE	Sigma-Aldrich
CaCL <sub>2</sub>	Sigma-Aldrich
Carboanhydrase	Sigma-Aldrich
60/80 mesh Carbopack	
B/1.5% XE 60/1.0 %	Fa Supelco
Dithiothreitol	Sigma-Aldrich
EDTA	Merk Darmstadt
Hexan	Merk Darmstadt
Flüssiger Argon	Linde
Isopropanol	Merck, Darmstadt
KCL	Sigma-Aldrich
Kieselgel mit Feuchte Indikator	Merck , Darmstadt, K26642725
Magnesium Perchlorate Hydrate	Fluka Chemika, 63095
Milli-Q-Wasser >18 MΩ	Anlage Millipore, Molsheim, Frankreich
Molekularsieb 0,5 nm	Merk Darmstadt, , K21042503826
Natriumhydroxid	Merck, Darmstadt
Natronkalk mit feuchte indikator	Merk Darmstadt, K270484439
NaCL	Sigma-Aldrich
Poly( 1-vinyl-2-pyrrolidon)	Sigma-Aldrich
PSMF	Sigma-Aldrich
Puffer tabletten	WWT
Toluol	Merk Darmstadt

**Gase**CO<sub>2</sub>- Eichgasflasche (363 ppmv)CO<sub>2</sub> 99 %

Helium 5.6

N<sub>2</sub> 5.0H<sub>2</sub> 5.0

Synthetische Luft 5.0

Messer-Griesheim, Frankfurt

Messer-Griesheim, Frankfurt

Messer-Griesheim, Frankfurt

Herbarth Industrie Gase

Herbarth Industrie Gase

Herbarth Industrie Gase

7.3 Eine Auswahl atmosphärischer Gase

Formel	Name	Menge	Bedeutung	Erzeugung (Quellen)	Verbrauch (Senken)	Typische Lebens-erwartung
N <sub>2</sub>	Stickstoff	78.11%	Hauptmasse der Atmosphäre	Gestein, Denitrifikation	Gering	>1'000'000 Jahre
O <sub>2</sub>	Sauerstoff	20.95%	„Lebensstoff“ für nicht-pflanzliche Lebensformen wie Mensch und Tier	Pflanzliche Lebensformen, „Photosynthese“	Verbrennungsprozesse, Oxidationsprozesse, Respiration	1'000 Jahre
Ar	Argon	0.93%	Keine	Gestein	Edelgas (kein Verbrauch)	>1'000'000 Jahre
H <sub>2</sub> O	Wasserdampf	~ 1%	Notwendig für das Leben; wichtiges Treibhausgas; „Wolkenmaterial“	Verdunstung	Niederschlag	Tage
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	0.036% (360 ppm)	Wichtigstes Treibhausgas, „Lebensstoff“ für pflanzliches Leben	Verbrennungsprozesse; Vulkanismus, Respiration etc.	Photosynthese, Lösung in Ozeanen	100 Jahre
CH <sub>4</sub>	Methan	0.000 17% (1.7 ppm)	Treibhausgas; verbraucht OH	Reisfelder, Sümpfe, Mikroorganismen, Wiederkäuer, Termiten	Reaktion mit OH	8 Jahre
N <sub>2</sub> O	Lachgas	0.000 03% (300 ppb)	Treibhausgas; wichtig für stratosphärisches Ozon	Böden, Ozeane	UV- Sonnenstrahlung	>100 Jahre
O <sub>3</sub>	Ozon	0.000 1% (1 ppm) in Stratosphäre	Schutzschild gegen UV-Strahlung, Treibhausgas	UV- Sonnenstrahlung (λ < 240 nm)	UV- Sonnenstrahlung (λ < 850 nm); Reaktion mit OH	variabel: Stunden bis Wochen
CO	Kohlenmonoxid	0.000 01% (100 ppb)	Wichtiges chemisches Zwischenprodukt, beeinflusst OH	Direkte Emission durch Verbrennung, chemischer Abbau von organischen Verbindungen	Reaktion mit OH	Wochen
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	Aceton	0.000 000 2% (2 ppb)	Produktion von OH, nimmt Einfluß auf NO <sub>x</sub> -Gehalt der Atmosphäre	Verbrennungen, pflanzliche Emission	Sonnenstrahlung, Reaktion mit OH	Wochen
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isopren	0.000 000 1% (1 ppb)	Größte Emission von Pflanzen	Pflanzenemission	Reaktion mit OH, O <sub>3</sub>	Stunden

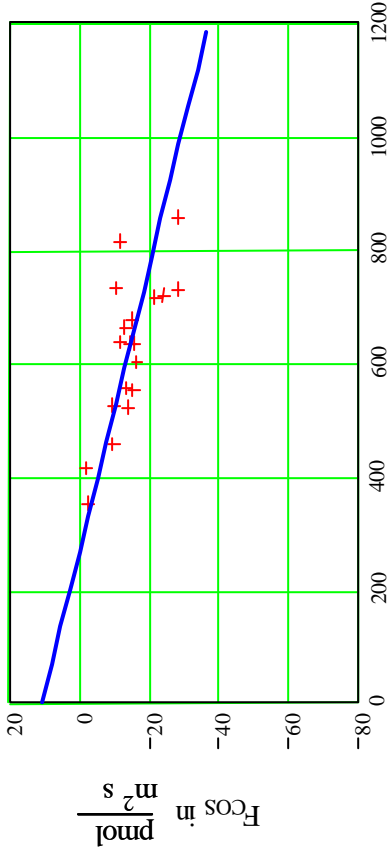
### Eine Auswahl atmosphärischer Gase

$\text{CH}_2\text{O}$	Formaldehyd	0.000 000 1% (1 ppb)	Wichtiges chemisches Zwischenprodukt, beeinflusst OH	Chemischer Abbau von organischen Verbindungen	Sonnenstrahlung, Reaktion mit OH	Stunden
$\text{C}_2\text{H}_6$	Ethan	0.000 000 1% (1 ppb)	Schnelle Reaktion mit OH	Erdgas	Reaktion mit OH	Monate
$\text{C}_2\text{H}_2$	Acetylen	0.000 000 05% (500 ppt)	Schnelle Reaktion mit OH	Verbrennungen	Reaktion mit OH	Wochen
COS	Carbonylsulfid	0.000 000 05% (500 ppt)	Treibhausgas, Aerosolbildung	Verbrennungen	Pflanzen, und Abbau in der Stratosphäre	Jahre
$\text{SO}_2$	Schwefeldioxyd	0.000 000 01% (100 ppt)	Wolkenbildung, Säuregehalt des Niederschlags	Verbrennungen, Vulkanismus	Reaktion mit OH und andere Oxidantien	Tage
$\text{NO}_x$	Stickoxyde	0.000 000 01% (100 ppt)	Beeinflusst entscheidend das Verhältnis zwischen $\text{O}_3$ und OH	Verbrennungen, Blitze, Flugzeuge	Ablagerung auf Böden	Tage
$\text{SF}_6$	Schwefelhexafluorid	0.000 000 000 4% (4 ppt)	Keine natürlichen Quellen, hilft menschliche Einflußnahme	Elektroindustrie, Schutzgas	?	3200 Jahre
OH	Hydroxylradikal	0.000 000 000 01% (0.1 ppt)	„Waschmittel der Atmosphäre“ sorgt für deren Reinheit	z. B. aus Ozon, Wasser und Licht: $\text{O}_3 + \text{Light} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$ $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{OH}$	Reaktion mit $\text{CH}_4$ , CO und vielen anderen Spurenstoffen	Sekunde
$\text{CCl}_3\text{F}$	FCKW 11	0.000 000 03% (300 ppt)	Ozonerstörer, Treibhausgas	Kühlmittel, Schäummittel	UV-Sonnenstrahlung in Stratosphäre	Jahrzehnte
$\text{CCl}_2\text{F}_2$	FCKW 12	0.000 000 05% (500 ppt)	Ozonerstörer, Treibhausgas	Kühlmittel, Schäummittel	UV-Sonnenstrahlung in Stratosphäre	Jahrzehnte
$\text{CF}_3\text{Br}$	Halon-1301	0.000 000 000 2% (2 ppt)	Ozonerstörer, Treibhausgas	Feuerlöcher	UV-Sonnenstrahlung in Stratosphäre	Jahrzehnte

## 7.4 Darstellung von Einzelergebnissen der COS-Messungen

### Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS]

Baum: *Fagus sylvatica* 1 unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



- Regressionsgerade der COS -Austauschraten, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS -Austauschraten, F<sub>COS</sub>

**COS-Austauschparameter :**

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-13.779
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	4.827
N	19
R	-0.74
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	258.30
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	10.416
m in pmol/(ppm <sup>2</sup> s)	-0.04

**Systemparameter beim Experiment:**

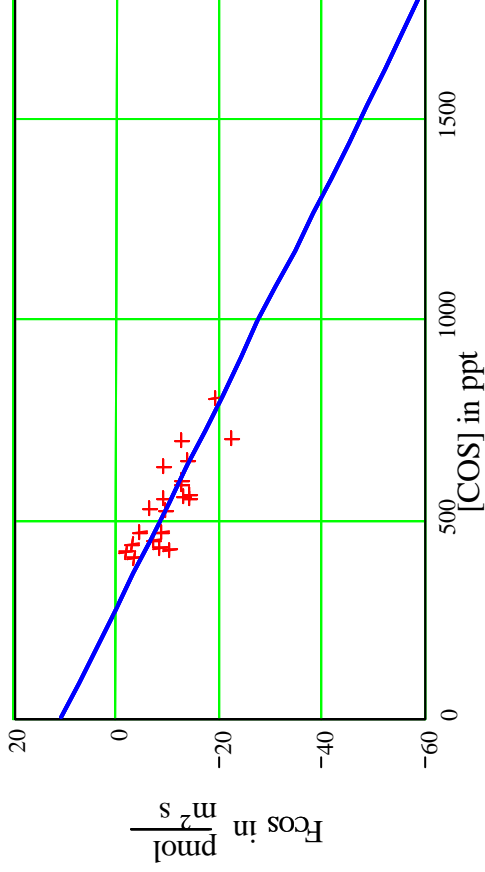
ϕ <sub>Küvette</sub> in °C	25
Q in l/min	2.2
V <sub>S</sub> in l	1.5

**Messergebnisse:**

$\frac{m_B}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.908	1.148	-14.074	220
1.283	1.168	-2.13	220
1.517	1.421	-1.778	220
2.203	1.328	-16.204	220
2.326	1.47	-15.852	220
1.674	1.153	-9.648	220
2.486	1.685	-14.833	220
2.986	2.357	-11.648	220
2.434	1.745	-12.759	220
3.141	1.601	-28.519	220
2.676	1.148	-28.296	220
1.925	1.407	-9.593	220
2.037	1.306	-13.537	220
2.639	1.352	-23.833	220
2.025	1.205	-15.185	220
2.333	1.713	-11.481	220
2.323	1.557	-14.185	220
2.685	2.108	-10.685	220
2.628	1.470	-21.444	220

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 2 unter 350ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe1998



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter:

F in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-12.477
$\sigma_F$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	2.97
N	21
R	-0.815
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	279.29
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	10.866
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0.039

## Systemparameter beim Experiment:

$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in °C	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

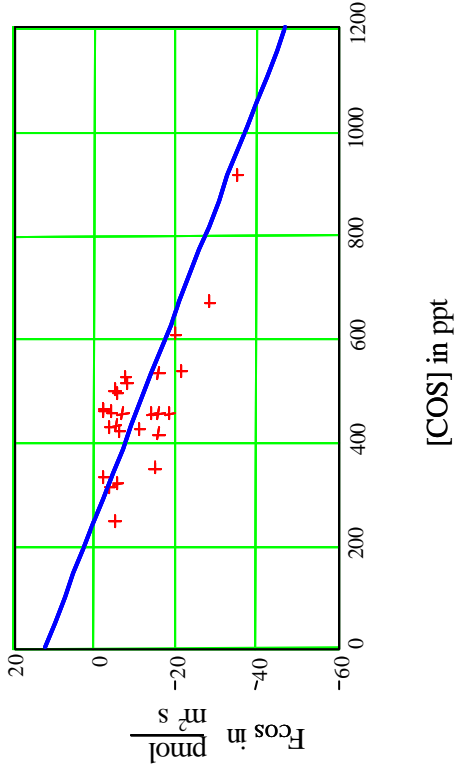
## Messergebnisse:

$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.709	1.303	-8.752	189
1.524	1.442	-1.768	189
2.017	1.603	-8.924	189
1.568	1.181	-8.342	189
2.046	1.389	-14.162	189
1.481	1.337	-3.104	189
1.636	1.305	-7.135	189
2.37	1.738	-13.623	189
1.554	1.088	-10.045	189
2.938	2.051	-19.12	189
2.139	1.556	-12.567	189
2.56	1.538	-22.03	189
2.028	1.438	-12.718	189
1.596	1.459	-2.953	189
2.548	1.975	-12.352	189
1.931	1.629	-6.51	189
1.917	1.476	-9.506	189
1.712	1.515	-4.247	189
2.013	1.354	-14.205	189
2.301	1.89	-8.859	189
2.174	1.603	-12.308	189



# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS]

Baum: *Fagus sylvatica* 4 unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter:

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-17,46
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	5,761
N	26
R	-0,742
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	246,80
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	12,201
m in pmol/(ppt·m <sup>2</sup> s)	-0,049

## Systemparameter beim Experiment:

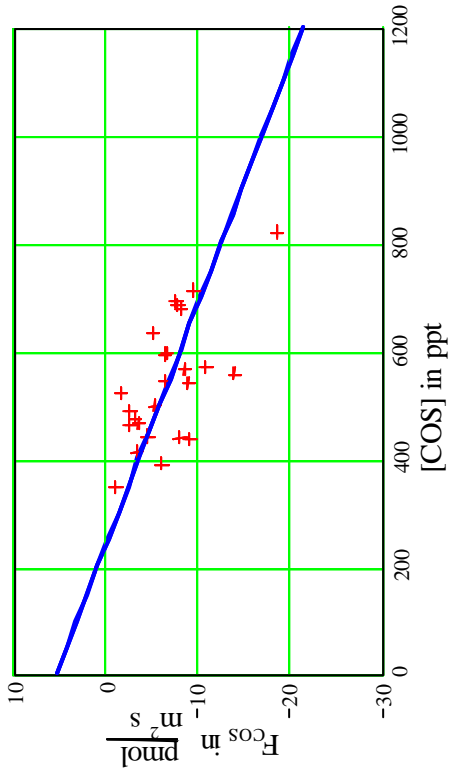
ϑ <sub>Küvette</sub> in °C	25
Q in l/min	2,2
V <sub>s</sub> in l	1,5

## Messergebnisse

nr ng	mM ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	nr ng	mM ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>
2.17	1.532	-19.691	132	1.641	1.569	-2.222	132
1.139	0.961	-5.503	132	1.897	1.394	-15.525	132
1.236	0.755	-14.833	132	1.535	1.373	-5.00	132
0.876	0.72	-4.821	132	1.52	1.402	-3.642	132
1.614	1.156	-14.136	132	1.833	1.583	-7.716	132
3.269	2.128	-35.216	132	1.779	1.625	-4.753	132
2.395	1.474	-28.426	132	1.875	1.637	-7.346	132
1.757	1.58	-5.463	132	1.914	1.223	-21.327	132
1.621	1.397	-6.914	132	1.625	1.49	-4.167	132
1.62	1.029	-18.241	132				
1.516	1.158	-11.049	132				
1.179	1.113	-2.037	132				
1.621	1.119	-15.494	132				
1.649	1.578	-2.191	132				
1.106	0.992	-3.522	132				
1.499	1.312	-5.772	132				
1.472	0.963	-15.725	132				

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration [COS],

Baum *Fagus sylvatica* 5 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS- Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-8.089
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	3.021
N	25
R	-0.646
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	238.04
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	5.32
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.022

### Systemparameter beim Experiment:

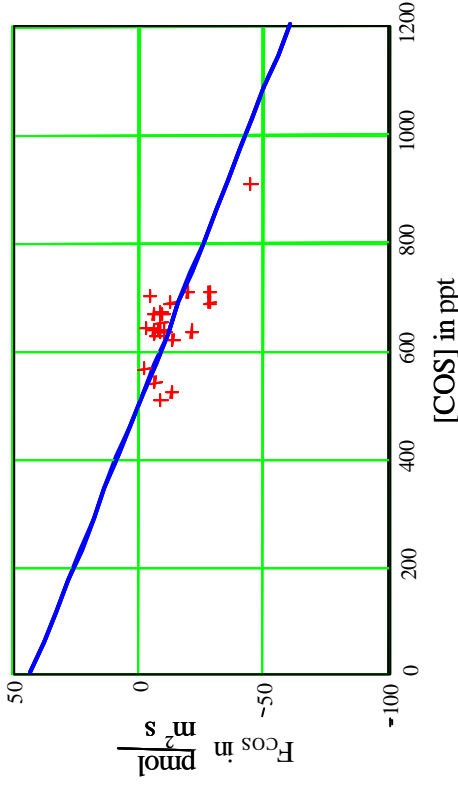
$\vartheta_{\text{Klvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

### Messergebnisse

$\frac{\text{nr}}{\text{ng}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{nr}}{\text{ng}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{nr}}{\text{ng}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.427	1.177	-5.991	170	1.699	1.592	-2.564	170	1.427	1.177	-5.991	170
1.517	1.379	-3.307	170	1.788	1.682	-2.54	170	1.517	1.379	-3.307	170
1.612	1.277	-8.028	170	1.709	1.563	-3.499	170	1.612	1.277	-8.028	170
1.738	1.604	-3.211	170	2.044	1.459	-14.02	170	1.738	1.604	-3.211	170
1.829	1.605	-5.368	170	1.918	1.852	-1.582	170	1.829	1.605	-5.368	170
1.625	1.438	-4.481	170	1.918	1.852	-1.582	170	1.625	1.438	-4.481	170
1.996	1.728	-6.423	170	2.511	2.187	-7.765	170	1.996	1.728	-6.423	170
1.269	1.227	-1.007	170	3.007	2.235	-18.501	170	1.269	1.227	-1.007	170
1.603	1.219	-9.203	170	2.539	2.222	-7.597	170	1.603	1.219	-9.203	170
2.089	1.634	-10.904	170				170	2.089	1.634	-10.904	170
1.987	1.615	-8.915	170				170	1.987	1.615	-8.915	170
2.084	1.729	-8.508	170				170	2.084	1.729	-8.508	170
2.187	1.913	-6.566	170				170	2.187	1.913	-6.566	170
2.175	1.903	-6.519	170				170	2.175	1.903	-6.519	170
2.618	2.222	-9.49	170				170	2.618	2.222	-9.49	170
2.329	2.117	-5.081	170				170	2.329	2.117	-5.081	170
2.491	2.147	-8.244	170				170	2.491	2.147	-8.244	170

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration [COS],

Baum *Fagus sylvatica* unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-8.851
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	7.4
N	22
R	-0.684
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	497.19
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	42.801
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.086

### Systemparameter beim Experiment:

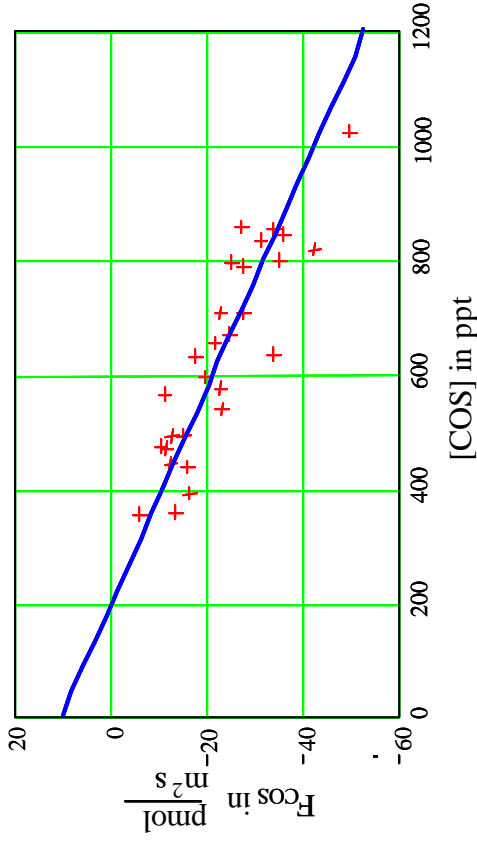
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

### Messergebnisse:

$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
2.475	2.073	-12.407	132	1.879	1.458	-12.99	132
2.469	1.564	-27.932	132	2.29	1.619	-20.71	132
2.309	2.202	-3.302	132	2.544	1.912	-19.50	132
2.282	1.949	-10.278	132	2.544	1.619	-28.54	132
2.231	1.79	-13.611	132	1.945	1.73	-6.636	132
2.299	2.03	-8.302	132	1.827	1.534	-9.043	132
2.285	1.992	-9.043	132				
2.404	2.093	-9.599	132				
2.258	2.047	-6.512	132				
2.4	2.199	-6.204	132				
2.294	2.108	-5.741	132				
2.419	2.144	-8.488	132				
2.518	2.383	-4.167	132				
2.345	2.064	-8.673	132				
2.039	1.962	-2.377	132				
3.271	1.817	-44.877	132				

# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* I unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe Sommer 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschraten, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschraten, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-21.6
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	4.9
N	28
R	-0.88
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	189
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	9.94
m in pmol/(bpt m <sup>2</sup> s)	-0.053

## Systemparameter beim Experiment:

ϑ <sub>Küvette</sub> in °C	25
Q in l/min	2.2
V <sub>S</sub> in l	1.5

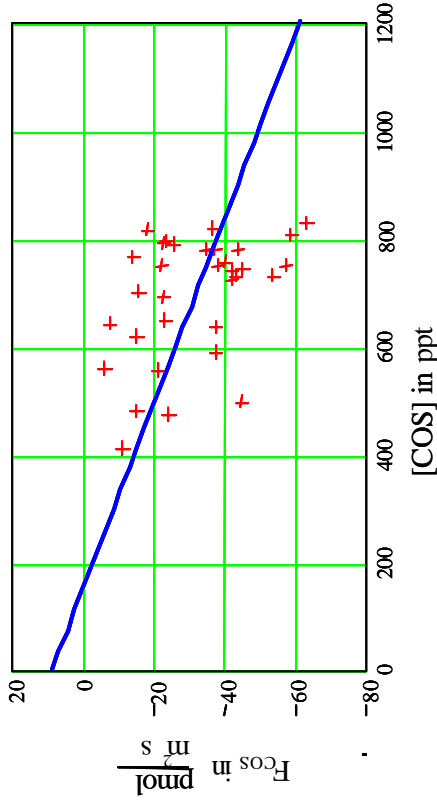
## Messergebnisse:

$\frac{m_R}{ng}$	$\frac{m_M}{ng}$	$F_{COS}$ $\frac{pmol}{m^2s}$	$\frac{A_{Blatt}}{cm^2}$	$\frac{m_R}{ng}$	$\frac{m_M}{ng}$	$F_{COS}$ $\frac{pmol}{m^2s}$	$\frac{A_{Blatt}}{cm^2}$
3.092	1.951	-36.317	128	1.977	1.239	-23.4	128
2.327	1.257	-34.057	128	2.911	2.111	-25.46	128
1.618	1.224	-12.541	128	2.891	2.017	-27.81	128
1.718	1.352	-11.649	128	2.922	1.814	-35.26	128
1.805	1.396	-13.018	128	2.998	1.656	-42.71	128
1.313	0.877	-13.887	128	3.756	2.186	-49.97	128
1.426	0.909	-16.455	128	2.459	1.672	-25.04	128
2.184	1.566	-19.67	128	2.313	1.754	-17.79	128
2.074	1.710	-11.586	128	3.139	2.276	-27.46	128
2.397	1.713	-21.771	128				
3.128	2.054	-34.184	128				
1.731	1.402	-10.472	128				
3.06	2.071	-31.479	128				
2.593	1.876	-22.821	128				
2.594	1.721	-27.786	128				
1.81	1.327	-15.373	128				
2.105	1.385	-22.917	128				
1.598	1.083	-16.392	128				
1.297	1.100	-6.270	128				

# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 2 unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe Sommer 1999

2.47.2.195  
2.19



- Regressionsgerade der COS-Austauschraten, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschraten, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter:

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-26.24
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	13.7
N	33
R	-0.43
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	150
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	8.75
m in pmol/(ppt·m <sup>2</sup> s)	-0.058

## Systemparameter beim Experiment:

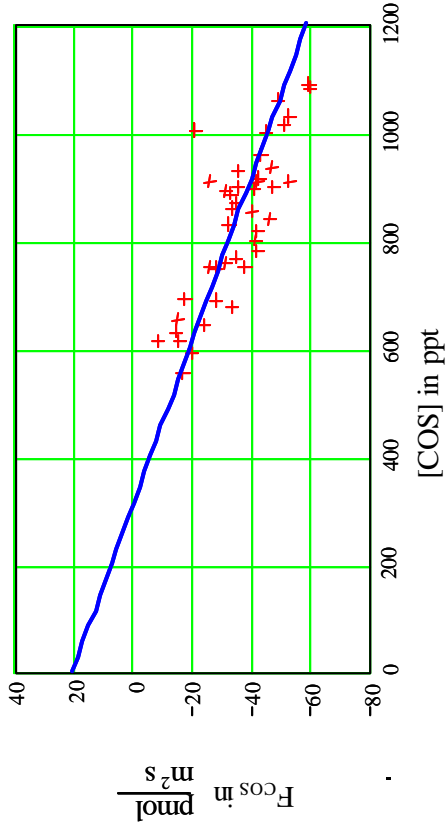
ϑ <sub>Küvette</sub> in °C	25
O in l/min	2.2
V <sub>S</sub> in l	1.5

## Messergebnisse

nr ng	nm ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	nr ng	nm ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>
3.016	2.47	-36.629	60.729	2.345	1.783	-37.702	60.729
2.791	2.19	-40.319	60.729	2.765	1.914	-57.09	60.729
2.765	2.195	-38.239	60.729	3.055	2.11	-63.396	60.729
2.923	2.584	-22.742	60.729	2.059	1.963	-6.44	60.729
2.934	2.583	-23.547	60.729	3.015	2.746	-18.046	60.729
2.691	2.049	-43.069	60.729	2.173	1.613	-37.568	60.729
2.872	2.352	-34.885	60.729	2.387	2.04	-23.279	60.729
2.875	2.322	-37.099	60.729	2.877	2.225	-43.74	60.729
2.59	2.354	-15.832	60.729	1.769	1.543	-15.161	60.729
2.748	2.074	-45.216	60.729	2.056	1.741	-21.132	60.729
2.911	2.524	-25.962	60.729	2.693	1.895	-53.535	60.729
2.763	2.431	-22.273	60.729	2.37	2.256	-7.648	60.729
2.674	2.044	-42.264	60.729	1.84	1.176	-44.545	60.729
2.285	2.054	-15.497	60.729	1.522	1.353	-11.338	60.729
2.731	2.1	-42.331	60.729	2.546	2.204	-22.943	60.729
2.824	2.61	-14.356	60.729				
2.968	2.089	-58.969	60.729				
1.744	1.382	-24.285	60.729				

# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 3 unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe Sommer 1999



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>  
 +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter:

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-19.18
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	8.47
N	43
R	-0.74
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	310
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	20.56
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0.066

## Systemparameter beim Experiment:

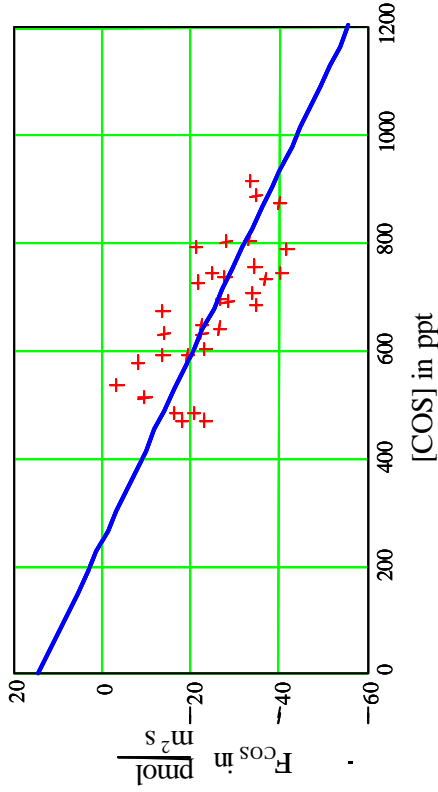
ϕ <sub>Klivette</sub> in °C	25
Q in l/min	2.2
V <sub>s</sub> in l	1.5

## Messergebnisse:

$\frac{m_k}{ng}$	$\frac{m_M}{ng}$	F <sub>COS</sub> $\frac{pmol}{m^2s}$	$\frac{A_{Blatt}}{cm^2}$	$\frac{m_k}{ng}$	$\frac{m_M}{ng}$	F <sub>COS</sub> $\frac{pmol}{m^2s}$	$\frac{A_{Blatt}}{cm^2}$	$\frac{m_k}{ng}$	$\frac{m_M}{ng}$	F <sub>COS</sub> $\frac{pmol}{m^2s}$	$\frac{A_{Blatt}}{cm^2}$
3.142	1.868	-39.926	130	2.755	1.861	-28.017	130	2.755	1.861	-28.017	130
3.801	2.127	-52.462	130	3.992	2.073	-60.14	130	3.992	2.073	-60.14	130
3.303	2.006	40.647	130	3.73	2.113	-50.675	130	3.73	2.113	-50.675	130
2.407	1.922	-15.199	130	3.353	1.662	-52.994	130	3.353	1.662	-52.994	130
3.314	1.811	47.103	130	2.879	1.535	-42.12	130	2.879	1.535	-42.12	130
3.095	1.616	-46.35	130	3.446	1.961	-46.538	130	3.446	1.961	-46.538	130
2.254	1.756	-15.607	130	2.543	1.99	-17.33	130	2.543	1.99	-17.33	130
3.369	2.022	42.214	130	3.702	3.037	-20.84	130	3.702	3.037	-20.84	130
3.692	2.264	-44.752	130	3.902	2.343	-48.858	130	3.902	2.343	-48.858	130
3.265	2.21	-33.063	130	2.541	1.652	-27.86	130	2.541	1.652	-27.86	130
2.26	1.993	-8.368	130	3.352	2.541	-25.416	130	3.352	2.541	-25.416	130
2.833	1.717	-34.974	130	2.364	1.601	-23.912	130	2.364	1.601	-23.912	130
2.173	1.55	-19.524	130	3.702	3.037	-20.84	130	3.702	3.037	-20.84	130
2.32	1.855	-14.573	130	3.315	2.198	-35.006	130	3.315	2.198	-35.006	130
4.01	2.117	59.325	130	2.793	1.803	-31.026	130	2.793	1.803	-31.026	130
3.352	2.013	-41.963	130	3.531	2.15	-43.279	130	3.531	2.15	-43.279	130
2.045	1.503	-16.986	130	3.172	2.11	-33.282	130	3.172	2.11	-33.282	130
3.287	2.286	-31.37	130	3.426	2.3	-35.288	130	3.426	2.3	-35.288	130
3.007	1.675	-41.744	130	3.059	2.036	-32.06	130	3.059	2.036	-32.06	130
2.948	1.636	-41.117	130	2.763	1.944	-25.667	130	2.763	1.944	-25.667	130
2.485	1.408	-33.752	130	2.767	1.568	-37.575	130	2.767	1.568	-37.575	130

## Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 4 unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe Sommer 1999



- Regressiongerade der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>

### COS-Austauschparameter:

F <sub>cos</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-20.96
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	6.87
N	33
R	-0.73
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	241
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	14.07
m in pmol/(ppt·m <sup>2</sup> s)	-0.058

### Systemparameter beim Experiment:

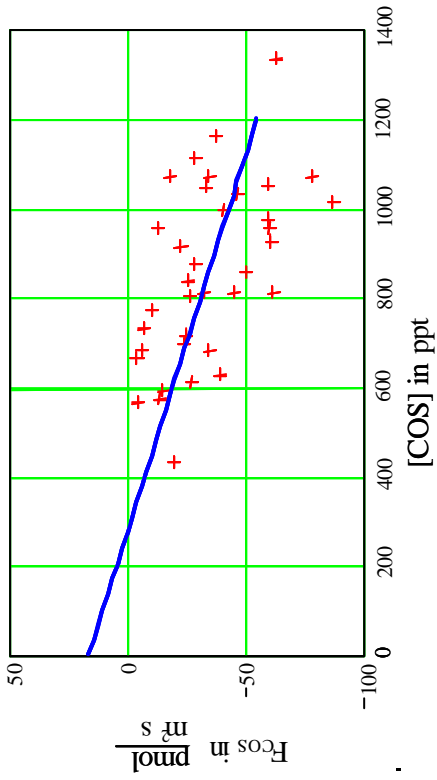
ϑ <sub>Kultivette</sub> in °C	25
Q in l/min	2.2
V <sub>s</sub> in l	1.5

### Messergebnisse

nr ng	nm ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	nr ng	nm ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>
3.353	2.091	-35.037	135	2.309	1.558	-22.664	135
2.9	2.227	-33.981	135	2.766	1.617	-34.675	135
1.764	2.191	-21.396	135	2.691	1.465	-36.999	135
1.877	1.073	-20.853	135	2.204	1.424	-23.539	135
2.506	1.551	-9.838	135	2.164	1.527	-19.224	135
2.557	1.347	-34.977	135	2.31	1.84	-14.184	135
1.963	1.667	-26.859	135	1.771	1.216	-16.749	135
2.526	1.848	-3.471	135	1.721	0.94	-23.569	135
2.168	1.573	-28.76	135	1.716	1.112	-18.228	135
2.693	1.705	-13.973	135	2.719	1.379	-40.439	135
2.348	1.775	-27.704	135	2.12	1.847	-8.239	135
2.956	1.469	-26.527	135	2.727	1.892	-25.199	135
2.935	1.855	-33.226	135	3.199	1.868	-40.167	135
2.667	2.002	-28.156	135	3.199	1.868	-40.167	135
2.464	1.948	-21.698	135	3.199	1.868	-40.167	135
2.367	2.012	-13.641	135	3.199	1.868	-40.167	135
2.891	1.613	-22.754	135	3.199	1.868	-40.167	135
2.59	1.505	-41.827	135	3.199	1.868	-40.167	135
2.59	1.462	-34.041	135	3.199	1.868	-40.167	135

# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 5 unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe Sommer 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter:

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-19,16
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	17,52
N	36
R	-0,56
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	277
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	16,39
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0,059

## Systemparameter beim Experiment:

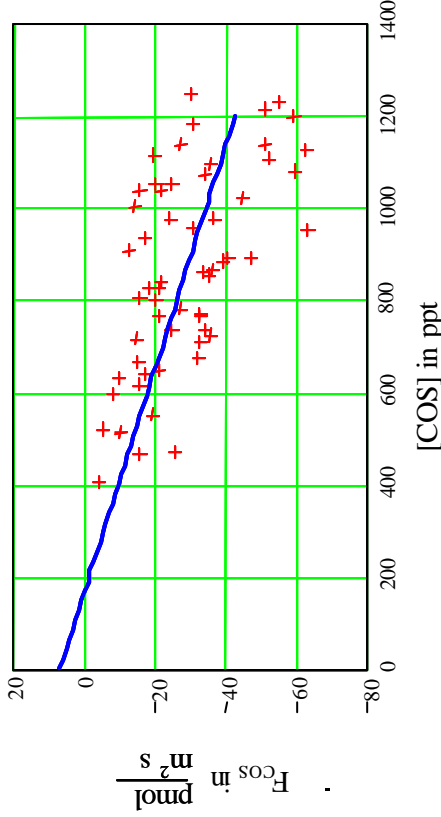
ϕ <sub>Küvette</sub> in °C	25
Q in l/min	2,2
V <sub>s</sub> in l	1,5

## Messergebnisse:

m <sub>R</sub> ng	m <sub>M</sub> ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	m <sub>R</sub> ng	m <sub>M</sub> ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>
3,788	2,758	-40,11	93,041	3,73	1,782	-86,613	93,041
3,216	2,729	-46,371	93,041	2,841	2,608	-10,203	93,041
2,302	2,567	-28,418	93,041	3,936	2,166	-77,505	93,041
2,971	1,408	-39,146	93,041	3,846	3,09	-33,104	93,041
2,973	2,231	-32,403	93,041	3,861	2,514	-59,982	93,041
3,937	1,941	-45,189	93,041	2,174	1,841	-14,581	93,041
2,503	3,635	-17,603	93,041	2,629	2,06	-24,915	93,041
3,149	1,717	-34,417	93,041	2,078	1,979	4,335	93,041
3,355	2,007	-50,006	93,041	3,511	3,222	-12,655	93,041
3,51	2,844	-22,376	93,041				
2,955	2,142	-59,902	93,041				
2,562	2,366	-25,791	93,041				
2,445	2,015	-23,952	93,041				
4,906	2,363	-3,591	93,041				
4,28	3,471	-62,836	93,041				
4,097	3,429	-37,264	93,041				
3,94	3,444	-28,594	93,041				
2,681	3,147	-34,724	93,041				
1,59	2,526	-6,787	93,041				
2,239	1,152	-19,179	93,041				
3,397	1,628	-26,754	93,041				
2,512	2,01	-60,734	93,041				
3,592	2,374	-6,043	93,041				
3,083	2,229	-59,245	93,041				
2,982	2,5	-25,528	93,041				
2,104	1,579	-61,434	93,041				
	1,806	-13,049	93,041				

# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 6 unter 800 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe Sommer 1999



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>  
 +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter:

F <sub>600</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-18.10
σ <sub>F</sub> in pmol/(m <sup>2</sup> s)	11.83
N	58
R	-0.56
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	162.23
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	6.709
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0.041

## Systemparameter beim Experiment:

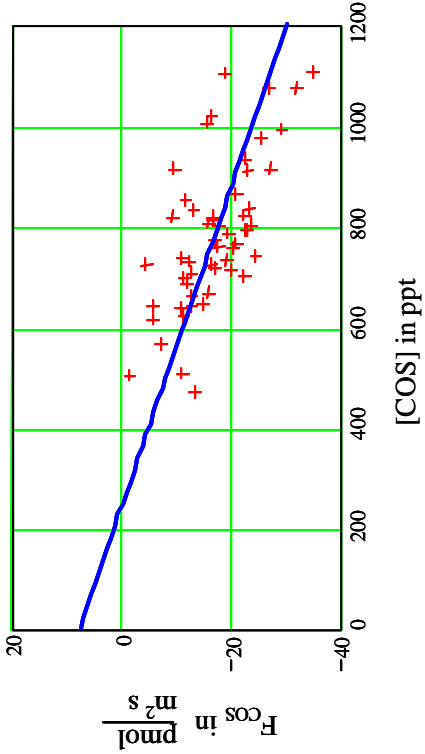
ϑ <sub>Kilvette</sub> in °C	25
Q in l/min	2.2
V <sub>z</sub> in l	1.5

## Messergebnisse:

m <sub>R</sub> ng	m <sub>M</sub> ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	m <sub>R</sub> ng	m <sub>M</sub> ng	F <sub>COS</sub> pmol m <sup>2</sup> s	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>
2.311	2.03	-9.583	119.465	3.752	2.436	-44.879	119.465
3.423	2.914	-17.358	119.465	3.039	2.504	-18.245	119.465
1.489	1.367	-4.161	119.465	4.056	2.525	-52.211	119.465
1.704	1.249	-15.517	119.465	4.461	2.957	-51.29	119.465
2.259	1.794	-15.858	119.465	4.086	3.503	-19.882	119.465
2.937	2.336	-20.496	119.465	3.804	3.166	-21.757	119.465
2.344	1.839	-17.222	119.465	2.375	1.752	-21.246	119.465
2.63	2.194	-14.869	119.465	3.859	3.269	-20.121	119.465
2.183	1.935	-8.457	119.465	4.131	2.29	-62.783	119.465
1.873	1.567	-10.435	119.465	2.803	2.175	-21.416	119.465
3.267	1.883	-47.198	119.465	3.936	2.93	-34.307	119.465
2.698	1.974	-24.69	119.465	3.587	2.869	-24.486	119.465
3.169	2.11	-36.115	119.465	4.022	2.979	-35.569	119.465
3.886	3.146	-24.554	119.465	3.679	3.265	-14.119	119.465
4.17	3.365	-27.453	119.465	3.804	3.336	-15.96	119.465
4.399	2.66	-59.305	119.465	4.508	2.883	-55.417	119.465
2.947	2.485	-15.755	119.465	3.274	2.083	-40.616	119.465
2.466	1.523	-32.159	119.465	3.129	2.089	-35.467	119.465
1.901	1.742	-5.422	119.465	3.589	2.513	-36.694	119.465
1.722	0.964	-25.836	119.465	2.806	1.847	-32.704	119.465
3.504	1.649	-63.26	119.465	4.18	2.68	-51.154	119.465
2.015	1.451	-19.234	119.465	3.08	2.449	-21.519	119.465
2.602	1.645	-32.636	119.465	2.653	1.603	-35.808	119.465
3.155	2.162	-33.864	119.465	2.867	2.061	-27.487	119.465
3.516	2.621	-30.522	119.465	3.029	2.399	-21.485	119.465
3.326	2.958	-12.55	119.465	2.694	1.695	-34.069	119.465
4.346	3.447	-30.658	119.465	2.44	1.987	-15.449	119.465
3.964	2.21	-59.816	119.465	2.828	1.862	-32.943	119.465
4.586	3.701	-30.181	119.465	3.246	2.093	-39.32	119.465

**Darstellung der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],**

**Baum: *Fagus sylvatica* I unter 350ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe Herbst 1999**



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

**COS-Austauschparameter:**

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{s m}^2)$	-11.303
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{s m}^2)$	5.157
N	54
R	-0.674
KP in $\text{pmol}/(\text{s m}^2)$	242.904
a in $\text{pmol}/(\text{s m}^2)$	7.688
b in $\text{pmol}/(\text{ppt s m}^2)$	-0.032

**Systemparameter beim Experiment:**

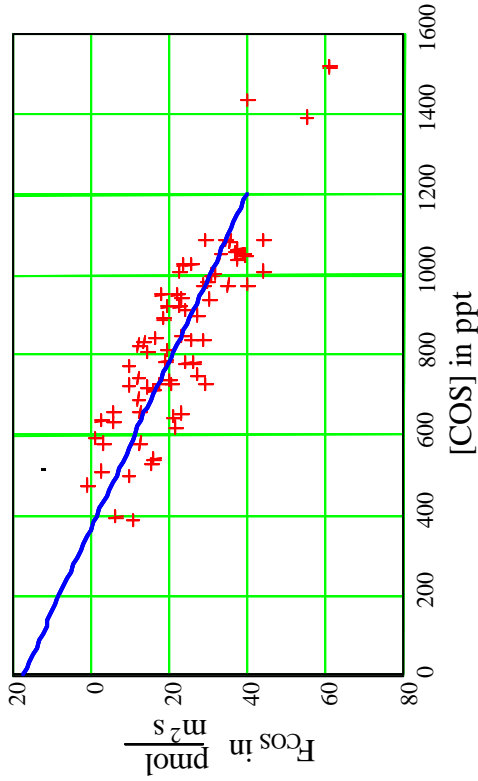
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_s$ in l	1.5

**Messergebnisse:**

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
3.355	2.204	-22.987	204	2.634	1.635	-19.951	204	-19.951	204
3.602	2.33	-25.403	204	2.612	1.964	-12.941	204	-12.941	204
3.451	2.309	-22.807	204	2.459	1.666	-15.837	204	-15.837	204
3.023	2.182	-16.796	204	2.824	1.773	-20.989	204	-20.989	204
2.735	1.51	-24.464	204	2.09	1.732	-7.15	204	-7.15	204
2.673	1.848	-16.476	204	2.855	2.002	-17.035	204	-17.035	204
2.808	1.919	-17.754	204	2.928	1.786	-22.807	204	-22.807	204
2.962	2.059	-18.034	204	3.002	2.167	-16.676	204	-16.676	204
3.37	2.006	-27.24	204	2.378	1.629	-14.958	204	-14.958	204
3.96	2.351	-32.133	204	2.93	1.783	-22.907	204	-22.907	204
4.081	2.333	-34.909	204	2.367	2.077	-5.792	204	-5.792	204
3.962	2.611	-26.981	204	2.267	1.982	-5.692	204	-5.692	204
4.069	3.124	-18.873	204	2.576	2.005	-11.403	204	-11.403	204
2.723	2.168	-11.084	204	3.083	1.909	-23.446	204	-23.446	204
3.367	2.887	-9.586	204	3.146	2.566	-11.583	204	-11.583	204
3.022	2.553	-9.366	204	3.065	2.4	-13.281	204	-13.281	204
3.667	2.195	-29.397	204	1.863	1.792	-1.418	204	-1.418	204
3.71	2.924	-15.697	204	2.649	1.795	-17.055	204	-17.055	204
3.764	2.937	-16.516	204	2.535	1.93	-12.082	204	-12.082	204
1.872	1.316	-11.104	204	2.787	1.771	-20.29	204	-20.29	204
2.58	1.455	-22.467	204	2.298	1.729	-11.363	204	-11.363	204
2.69	2.079	-12.202	204	2.352	1.807	-10.984	204	-10.984	204
1.734	1.064	-13.381	204	2.903	1.931	-19.412	204	-19.412	204
2.71	1.757	-19.032	204	3.033	1.904	-22.547	204	-22.547	204
2.664	2.443	-4.414	204	2.371	1.734	-12.721	204	-12.721	204
2.962	1.776	-23.686	204	2.988	2.173	-15.877	204	-15.877	204
2.441	1.795	-12.901	204	3.185	2.132	-21.029	204	-21.029	204

# Darstellung der COS –Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Fagus sylvatica* 2 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-11.522
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	6.485
N	71
R	-0.856
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	359.35
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	17.207
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.048

## Systemparameter beim Experiment:

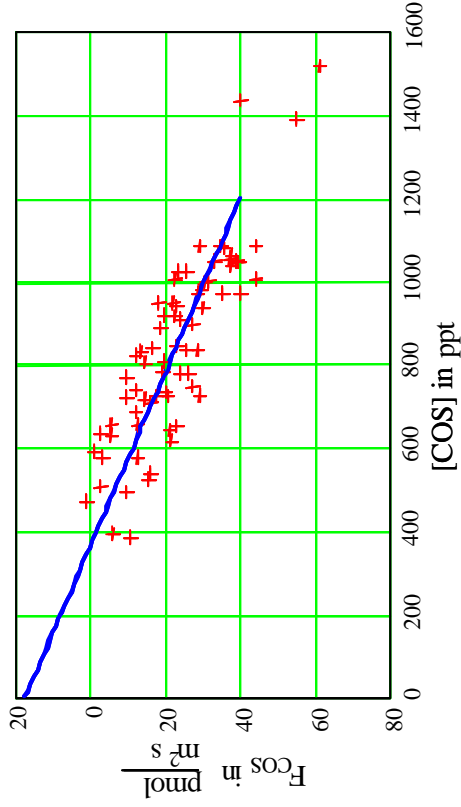
$D_{\text{Kivette}}$ in $^\circ\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

## Messergebnisse:

$\frac{\text{m}_g}{\text{ng}}$	$\frac{\text{mM}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{m}_g}{\text{ng}}$	$\frac{\text{mM}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
3.463	2.658	-23.379	140.28	3.876	2.597	-37.145	140.28	-37.145	140.28
3.712	2.194	-44.086	140.28	2.871	1.97	-26.167	140.28	-26.167	140.28
2.12	2.002	-3.427	140.28	3.858	2.494	-39.614	140.28	-39.614	140.28
3.582	2.586	-28.926	140.28	4.002	2.802	-34.851	140.28	-34.851	140.28
2.832	2.504	-9.526	140.28	2.887	2.218	-19.429	140.28	-19.429	140.28
2.648	2.306	-9.933	140.28	3.488	2.724	-22.188	140.28	-22.188	140.28
3.577	2.196	40.108	140.28	3.375	2.701	-19.575	140.28	-19.575	140.28
3.818	2.525	-37.552	140.28	2.421	2.221	-5.808	140.28	-5.808	140.28
3.026	2.604	-12.256	140.28	3.774	2.957	-23.728	140.28	-23.728	140.28
3.921	2.621	-37.755	140.28	3.089	2.52	-16.525	140.28	-16.525	140.28
3.863	2.723	-33.108	140.28	2.71	2.006	-20.446	140.28	-20.446	140.28
3.067	2.592	-13.795	140.28	3.766	2.881	-25.703	140.28	-25.703	140.28
2.171	2.13	-1.191	140.28	3.71	2.928	-22.711	140.28	-22.711	140.28
4	3	-29.042	140.28	5.123	3.219	-55.297	140.28	-55.297	140.28
2.968	2.456	-14.87	140.28	5.28	3.893	-40.282	140.28	-40.282	140.28
3.573	2.357	-35.316	140.28	5.594	3.492	-61.047	140.28	-61.047	140.28
2.726	2.31	-12.082	140.28	2.115	1.675	-12.782	140.28	-12.782	140.28
3.978	2.747	-35.751	140.28	1.821	1.491	-9.584	140.28	-9.584	140.28
3.994	2.472	-44.203	140.28	1.87	1.768	-2.962	140.28	-2.962	140.28
3.383	2.598	-22.798	140.28	3.263	2.613	-18.878	140.28	-18.878	140.28
3.608	2.592	-29.507	140.28						

## Darstellung der COS –Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 2 unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-11.522
$\sigma_F$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	6.485
N	71
R	-0.856
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	359.35
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	17.207
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0.048

### Systemparameter beim Experiment:

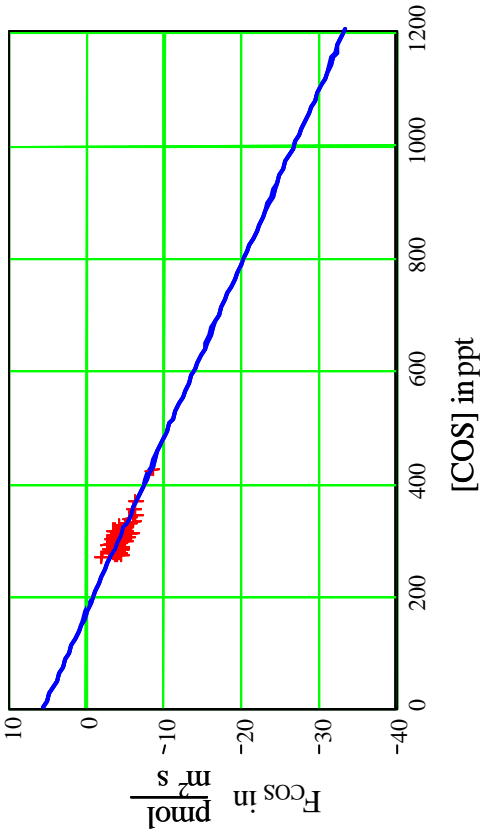
$\vartheta_{\text{Kivette}}$ in °C	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

### Messergebnisse

$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
3.665	2.607	-30.727	140.28	1.742	1.769	0.784	140.28	0.784	140.28
3.684	2.588	-31.831	140.28	2.68	1.97	-20.62	140.28	-20.62	140.28
2.68	1.667	-29.42	140.28	2.323	2.128	-5.663	140.28	-5.663	140.28
2.873	2.042	-24.134	140.28	1.446	1.223	-6.476	140.28	-6.476	140.28
2.266	1.515	-21.811	140.28	2.612	2.047	-16.409	140.28	-16.409	140.28
2.361	1.633	-21.143	140.28	2.977	2.293	-19.865	140.28	-19.865	140.28
2.748	1.814	-27.126	140.28	1.929	1.394	-15.538	140.28	-15.538	140.28
2.637	2.123	-14.928	140.28	2.408	1.97	-12.721	140.28	-12.721	140.28
3.078	2.183	-25.993	140.28	2.325	2.233	-2.672	140.28	-2.672	140.28
3.87	2.527	-39.004	140.28	3.309	2.374	-27.155	140.28	-27.155	140.28
3.497	2.861	-18.471	140.28						
3.111	2.311	-23.234	140.28						
2.392	1.588	-23.35	140.28						
3.448	2.406	-30.262	140.28						
3.352	2.524	-24.047	140.28						
2.534	2.118	-12.082	140.28						
1.976	1.409	-16.467	140.28						
3.076	2.092	-28.578	140.28						
2.678	2.065	-17.803	140.28						
1.413	1.045	-10.688	140.28						

# Darstellung der COS -Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 3 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.098
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	0.548
N	99
R	-0.794
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	164.63
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	5.331
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.032

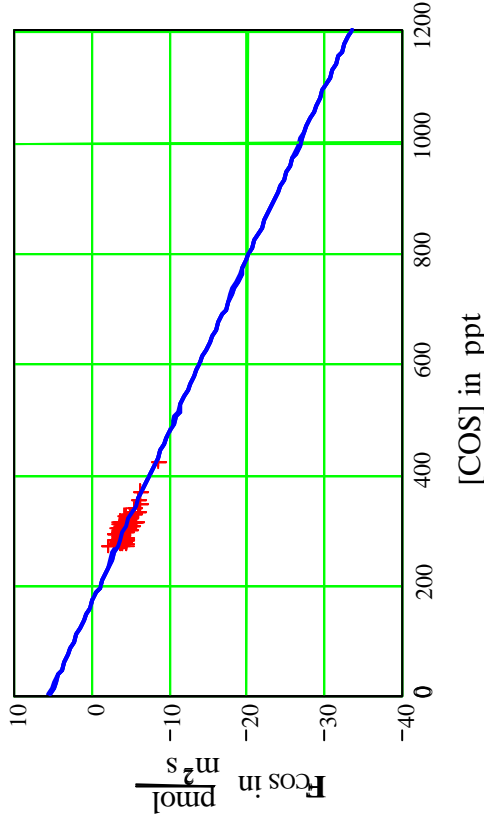
$\vartheta_{\text{Kilvvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

## Messergebnisse:

$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
0.714	0.594	-2.826	260	0.756	0.604	-3.576	260	-3.576	260
0.655	0.562	-2.192	260	0.736	0.582	-3.634	260	-3.634	260
0.724	0.555	-3.98	260	0.766	0.601	-3.864	260	-3.864	260
0.677	0.523	-3.634	260	0.766	0.606	-3.749	260	-3.749	260
0.677	0.525	-3.576	260	0.758	0.582	-4.153	260	-4.153	260
0.685	0.545	-3.288	260	0.751	0.564	-4.383	260	-4.383	260
0.675	0.525	-3.518	260	0.739	0.594	-3.403	260	-3.403	260
0.67	0.532	-3.23	260	0.753	0.567	-4.383	260	-4.383	260
0.687	0.54	-3.461	260	0.748	0.559	-4.441	260	-4.441	260
0.719	0.52	-4.672	260	0.744	0.569	-4.095	260	-4.095	260
0.685	0.54	-3.403	260	0.744	0.537	-4.845	260	-4.845	260
0.69	0.547	-3.345	260	0.751	0.542	-4.902	260	-4.902	260
0.709	0.589	-2.826	260	0.744	0.557	-4.383	260	-4.383	260
0.69	0.547	-3.345	260	0.741	0.555	-4.268	260	-4.268	260
0.68	0.532	-3.461	260	0.741	0.555	-4.383	260	-4.383	260
0.687	0.523	-3.864	260	0.729	0.579	-3.518	260	-3.518	260
0.761	0.552	-4.902	260	0.69	0.552	-3.23	260	-3.23	260
0.712	0.552	-3.749	260	0.702	0.545	-3.691	260	-3.691	260
0.719	0.564	-3.634	260	0.744	0.567	-4.153	260	-4.153	260
0.748	0.559	-4.441	260	0.721	0.562	-3.749	260	-3.749	260
0.756	0.545	-4.96	260	0.748	0.557	-4.499	260	-4.499	260
0.734	0.542	-4.499	260	0.726	0.532	-4.556	260	-4.556	260
0.741	0.557	-4.326	260	0.763	0.542	-5.191	260	-5.191	260
0.724	0.572	-3.576	260	0.739	0.567	-4.037	260	-4.037	260
0.741	0.579	-3.807	260	0.766	0.579	-4.383	260	-4.383	260
				0.788	0.567	-5.191	260	-5.191	260

## Darstellung der COS –Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 3 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.098
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	0.548
N	99
R	-0.794
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	164.63
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	5.331
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.032

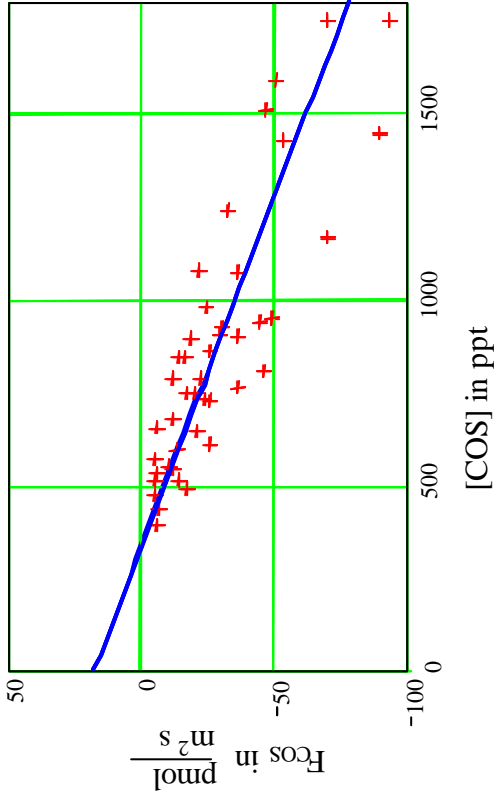
$\vartheta_{\text{Kivette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
O in l/min	2.2
$V_{\text{S}}$ in l	1.0

### Messergebnisse:

$\frac{\text{mR}}{\text{ng}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol m}^{-2}\text{s}^{-1}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{mR}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol m}^{-2}\text{s}^{-1}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{mR}}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol m}^{-2}\text{s}^{-1}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
0.714	0.594	-2.826	260	0.756	-3.576	260	0.604	-3.576	260
0.655	0.562	-2.192	260	0.736	-3.634	260	0.582	-3.634	260
0.724	0.555	-3.98	260	0.766	-3.864	260	0.601	-3.864	260
0.677	0.523	-3.634	260	0.766	-3.749	260	0.606	-3.749	260
0.677	0.525	-3.576	260	0.758	-4.153	260	0.582	-4.153	260
0.685	0.545	-3.288	260	0.751	-4.383	260	0.564	-4.383	260
0.675	0.525	-3.518	260	0.739	-3.403	260	0.594	-3.403	260
0.67	0.532	-3.23	260	0.753	-4.383	260	0.567	-4.383	260
0.687	0.54	-3.461	260	0.748	-4.441	260	0.559	-4.441	260
0.719	0.52	-4.672	260	0.744	-4.095	260	0.569	-4.095	260
0.685	0.54	-3.403	260	0.744	-4.845	260	0.537	-4.845	260
0.69	0.547	-3.345	260	0.751	-4.902	260	0.542	-4.902	260
0.709	0.589	-2.826	260	0.744	-4.383	260	0.557	-4.383	260
0.69	0.547	-3.345	260	0.741	-4.268	260	0.559	-4.268	260
0.68	0.532	-3.461	260	0.741	-3.518	260	0.555	-3.518	260
0.687	0.523	-3.864	260	0.69	-3.23	260	0.552	-3.23	260
0.761	0.552	-4.902	260	0.702	-3.691	260	0.545	-3.691	260
0.712	0.552	-3.749	260	0.744	-4.153	260	0.567	-4.153	260
0.719	0.564	-3.634	260	0.721	-3.749	260	0.562	-3.749	260
0.748	0.559	-4.441	260	0.748	-4.499	260	0.557	-4.499	260
0.756	0.545	-4.96	260	0.726	-4.556	260	0.532	-4.556	260
0.734	0.542	-4.499	260	0.763	-5.191	260	0.542	-5.191	260
0.741	0.557	-4.326	260	0.739	-4.037	260	0.567	-4.037	260
0.724	0.572	-3.576	260	0.766	-4.383	260	0.579	-4.383	260
0.741	0.579	-3.807	260	0.788	-5.191	260	0.567	-5.191	260

## Darstellung der COS –Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 4 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.334
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	11
N	43
R	-0.857
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	331.99
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	17.757
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.053

### Systemparameter beim Experiment:

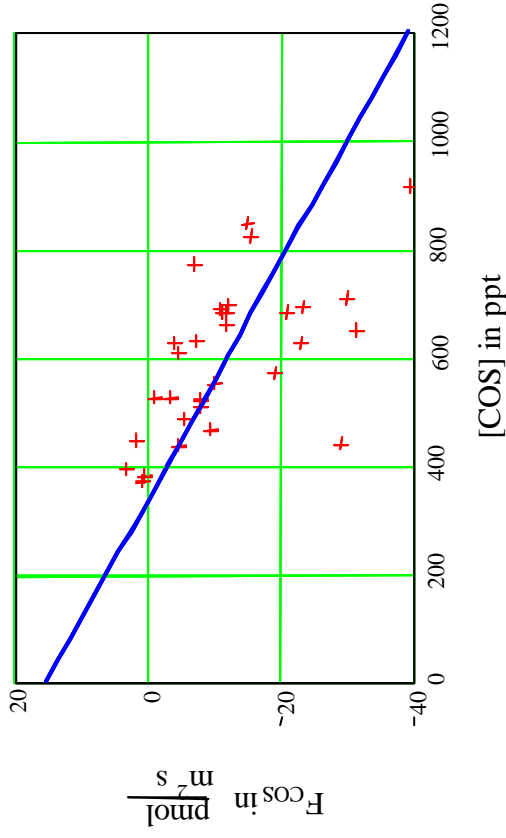
$\varnothing_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_S$ in $\text{l}$	1.5

### Messergebnisse:

$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
2.187	1.722	-13.065	145	3.454	1.865	-44.646	145	1.865	1.865	-44.646	145
2.734	2.117	-17.336	145	2.364	1.60	-21.213	145	2.364	1.60	-21.213	145
3.481	1.722	-49.423	145	4.289	1.797	-70.018	145	4.289	1.797	-70.018	145
3.953	3.196	-21.269	145	3.309	2.008	-36.554	145	3.309	2.008	-36.554	145
1.871	1.357	-14.442	145	3.316	2.246	-30.064	145	3.316	2.246	-30.064	145
2.233	1.294	-26.383	145	2.883	2.465	-11.745	145	2.883	2.465	-11.745	145
1.721	1.528	-5.423	145	3.109	2.532	-16.212	145	3.109	2.532	-16.212	145
6.442	3.935	-70.439	145	2.735	2.008	-20.427	145	2.735	2.008	-20.427	145
5.243	3.324	-53.918	145	2.673	1.736	-26.327	145	2.673	1.736	-26.327	145
5.544	3.874	-46.922	145	2.004	1.571	-12.166	145	2.004	1.571	-12.166	145
5.31	2.109	-89.939	145	2.68	1.842	-23.545	145	2.68	1.842	-23.545	145
6.44	3.111	-93.535	145	2.484	2.063	-11.829	145	2.484	2.063	-11.829	145
5.846	4.04	-50.743	145	1.877	1.706	-4.805	145	1.877	1.706	-4.805	145
3.931	2.624	-36.723	145	2.886	2.063	-22.562	145	2.886	2.063	-22.562	145
3.15	2.221	-26.102	145	2.79	1.487	-36.61	145	2.79	1.487	-36.61	145
1.797	1.183	-17.252	145	2.952	1.314	-46.023	145	2.952	1.314	-46.023	145
1.594	1.366	-6.406	145	4.547	3.383	-32.705	145	4.547	3.383	-32.705	145
3.277	2.609	-18.769	145	1.437	1.225	-5.957	145	1.437	1.225	-5.957	145
3.109	2.617	-13.824	145	3.392	2.312	-30.345	145	3.392	2.312	-30.345	145
1.953	1.737	-6.069	145	2.083	1.89	-5.423	145	2.083	1.89	-5.423	145
3.585	2.709	-24.613	145	2.39	2.182	-5.844	145	2.39	2.182	-5.844	145

## Darstellung der COS –Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 5 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



— Regressionsgerade der COS- Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS- Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

### COS- Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-11.971
$G_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	8.652
N	31
R	-0.592
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	337.03
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	15.342
m in $\text{pmol}/(\text{ppt}\cdot\text{m}^2\text{s})$	-0.046

### Systemparameter beim Experiment:

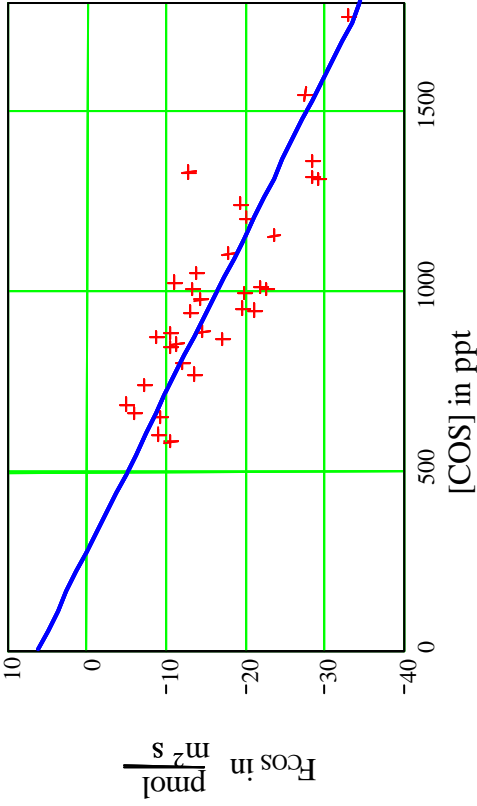
$\vartheta_{\text{Kivette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

### Messergebnisse:

$\frac{\text{mg}}{\text{ng}}$	$\frac{\text{m}_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.921	1.78	-3.122	184	1.927	1.884	-0.952	184	1.927	1.884	-0.952	184
2.415	1.887	-11.691	184	3.105	2.426	-15.034	184	3.105	2.426	-15.034	184
2.5	1.974	-11.647	184	2.507	2.011	-10.982	184	2.507	2.011	-10.982	184
2.545	1.496	-23.227	184	2.596	1.24	-30.024	184	2.596	1.24	-30.024	184
1.636	1.715	1.749	184	2.505	1.555	-21.035	184	2.505	1.555	-21.035	184
1.39	1.426	0.797	184	3.363	1.573	-39.634	184	3.363	1.573	-39.634	184
2.3	1.254	-23.16	184	2.548	2.01	-11.912	184	2.548	2.01	-11.912	184
1.71	1.292	-9.255	184	2.523	2.037	-10.761	184	2.523	2.037	-10.761	184
2.094	1.227	-19.197	184	2.308	1.991	-7.019	184	2.308	1.991	-7.019	184
1.616	0.303	-29.072	184	2.383	0.957	-31.574	184	2.383	0.957	-31.574	184
1.917	1.565	-7.794	184	1.597	1.391	-4.561	184	1.597	1.391	-4.561	184
1.859	1.511	-7.705	184	2.221	2.017	-4.517	184	2.221	2.017	-4.517	184
1.441	1.595	3.41	184				184				184
3.019	2.31	-15.698	184				184				184
2.026	1.585	-9.764	184				184				184
1.777	1.54	-5.248	184				184				184
2.833	2.53	-6.709	184				184				184
1.356	1.395	0.864	184				184				184
2.294	2.124	-3.764	184				184				184

# Darstellung der COS –Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Fagus sylvatica* 6 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration , Messreihe Herbst 1999



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-7.518
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	4.005
N	34
R	-0.836
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	268.66
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	6.096
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.023

## Systemparameter beim Experiment:

$\vartheta_{\text{Kivette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

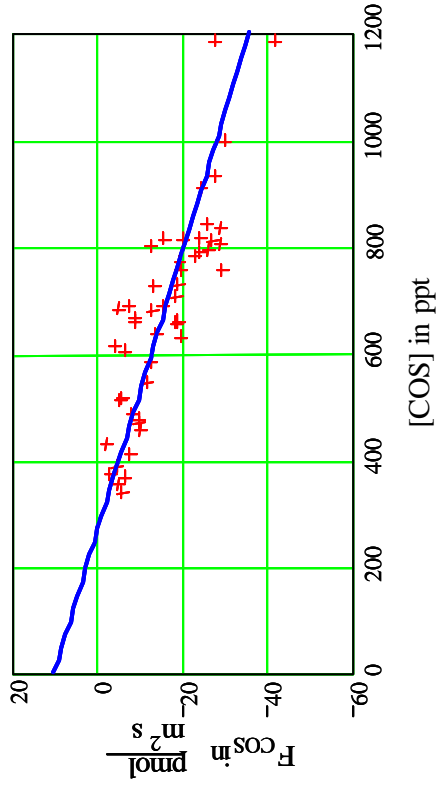
## Messergebnisse:

$m_k$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$m_k$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
3.125	2.363	-11.33	274	3.574	2.605	-14.408	274	-14.408	274
3.492	2.166	-19.716	274	3.191	2.602	-8.758	274	-8.758	274
3.676	2.781	-13.308	274	3.676	2.155	-22.616	274	-22.616	274
3.256	2.273	-14.616	274	3.466	2.04	-21.203	274	-21.203	274
3.762	3.022	-11.003	274	2.381	1.754	-9.323	274	-9.323	274
3.693	2.226	-21.813	274	2.926	2.106	-12.192	274	-12.192	274
3.846	2.906	-13.977	274	2.418	2.001	-6.2	274	-6.2	274
3.644	2.312	-19.805	274	2.125	1.412	-10.602	274	-10.602	274
4.228	2.646	-23.523	274	2.206	1.584	-9.248	274	-9.248	274
4.548	3.243	-19.404	274	2.5	2.158	-5.085	274	-5.085	274
4.054	2.858	-17.783	274	2.821	1.906	-13.605	274	-13.605	274
4.879	4.014	-12.862	274	3.23	2.514	-10.646	274	-10.646	274
3.092	2.374	-10.676	274	2.69	2.202	-7.39	274	-7.39	274
4.832	2.902	-28.697	274	3.181	2.021	-17.248	274	-17.248	274
3.446	2.56	-13.174	274						
4.408	3.055	-20.118	274						
5.668	3.806	-27.686	274						
6.474	4.244	-33.158	274						
4.802	2.828	-29.351	274						
4.984	3.067	-28.504	274						



## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 8 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



— Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentell ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

### COSAustauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-12.921
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	4.931
N	50
R	-0.857
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{s})$	263.688
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2 \text{s})$	10.13
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.038

### Systemparameter beim Experiment:

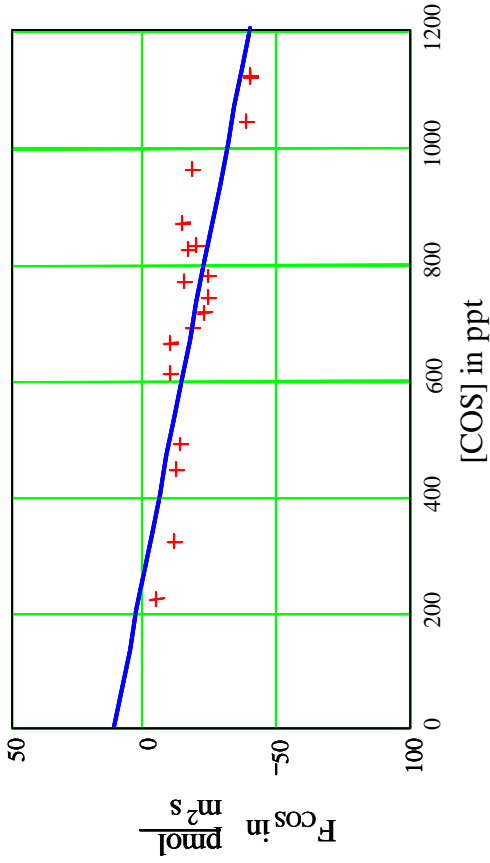
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_{\text{S}}$ in l	1.5

### Messergebnisse

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
1.501	1.383	-7.946	60.5	2.911	1.26	-26.071	60.5	2.911	1.26	-26.071	60.5
1.299	1.226	-4.916	60.5	1.668	1.032	-10.043	60.5	1.668	1.032	-10.043	60.5
1.235	1.151	-5.657	60.5	1.784	1.263	-8.227	60.5	1.784	1.263	-8.227	60.5
2.504	2.428	-5.118	60.5	2.657	1.815	-13.296	60.5	2.657	1.815	-13.296	60.5
2.497	2.302	-13.131	60.5	2.999	1.472	-24.113	60.5	2.999	1.472	-24.113	60.5
2.443	2.309	-9.024	60.5	2.248	1.989	-4.09	60.5	2.248	1.989	-4.09	60.5
3.423	3.01	-27.811	60.5	2.947	1.099	-29.182	60.5	2.947	1.099	-29.182	60.5
2.934	2.746	-12.66	60.5	1.366	1.185	-2.858	60.5	1.366	1.185	-2.858	60.5
2.983	2.746	-15.96	60.5	4.825	2.694	-33.651	60.5	4.825	2.694	-33.651	60.5
3.338	1.778	-24.634	258	2.771	1.508	-19.944	258	2.771	1.508	-19.944	258
2.528	1.556	-15.349	258	2.529	2.06	-7.406	258	2.529	2.06	-7.406	258
2.773	0.901	-29.561	258	2.972	1.261	-27.018	258	2.972	1.261	-27.018	258
2.679	1.465	-19.17	258	1.714	1.097	-9.743	258	1.714	1.097	-9.743	258
4.345	1.694	-41.862	258	1.874	1.53	-5.432	258	1.874	1.53	-5.432	258
3.658	1.749	-30.145	258	3.095	1.455	-25.897	258	3.095	1.455	-25.897	258
2.827	1.599	-19.391	258	2.425	1.863	-8.875	258	2.425	1.863	-8.875	258
1.341	0.915	-6.721	258	2.218	1.805	-6.522	258	2.218	1.805	-6.522	258
2.339	1.472	-13.691	258	2.899	1.365	-24.223	258	2.899	1.365	-24.223	258
3.061	1.236	-28.819	258	1.575	1.441	-2.116	258	1.575	1.441	-2.116	258
1.424	1.14	-4.485	258	1.999	1.253	-11.78	258	1.999	1.253	-11.78	258
2.314	1.05	-19.96	258	1.743	1.112	-9.964	258	1.743	1.112	-9.964	258
2.584	1.412	-18.507	258	2.407	1.239	-18.444	258	2.407	1.239	-18.444	258
2.42	1.208	-19.139	258	1.892	1.522	-5.843	258	1.892	1.522	-5.843	258
2.982	1.708	-20.118	258	2.869	1.42	-22.881	258	2.869	1.42	-22.881	258
4.348	2.594	-27.697	258	2.139	1.334	-12.712	258	2.139	1.334	-12.712	258

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 12 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



— Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.836
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	6.35
N	19
R	-0.939
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	249.993
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	10.597
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.042

### Systemparameter beim Experiment:

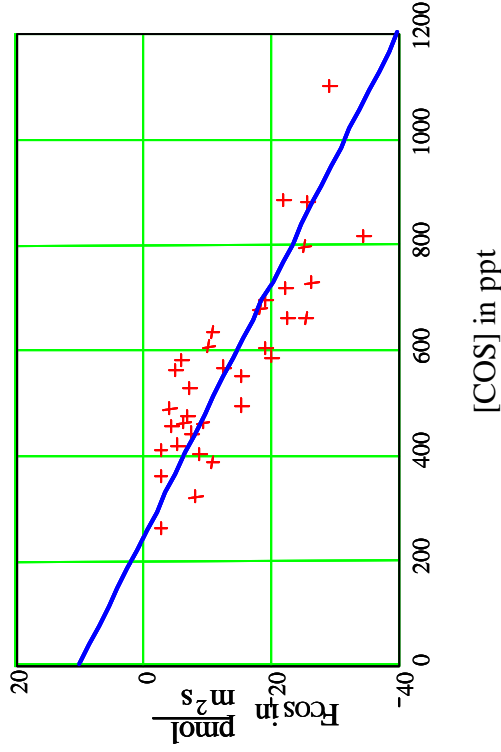
$\vartheta_{\text{Kivette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	2.5
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

### Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2\text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
3.833	2.939	-38.721	119
4.113	2.953	40.193	119
4.127	2.996	-40.193	119
3.532	5.416	-18.35	119
7.981	0.658	-87.815	119
0.812	1.277	-5.272	119
1.637	1.388	-12.325	119
1.796	0.82	-13.968	119
1.174	2.355	-12.12	119
2.818	2.124	-15.851	119
2.851	2.452	-24.89	119
3.043	2.519	-20.233	119
3.026	2.763	-17.358	119
3.192	2.014	-14.687	119
2.723	1.94	-24.273	119
2.619	1.942	-23.246	119
2.238	1.98	-10.134	119
2.531	2.123	-18.864	119
2.432		-10.579	119

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 6 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.918
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	4.782
N	34
R	-0.843
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	241.40
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	10.043
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.042

### Systemparameter beim Experiment:

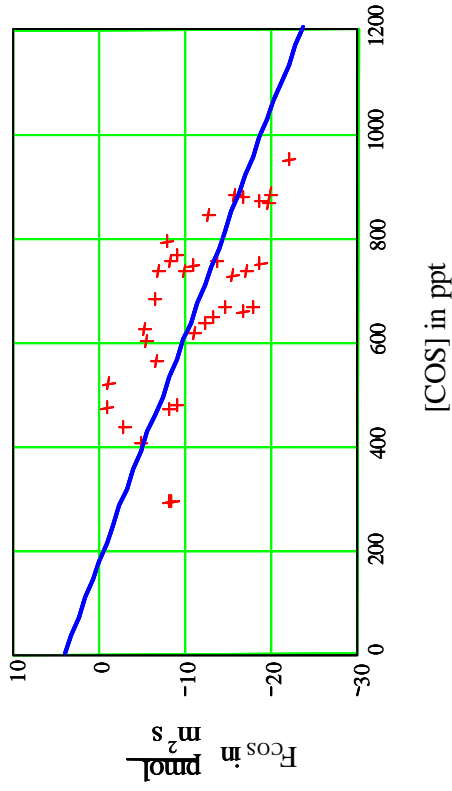
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

### Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol m}^{-2}\text{s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol m}^{-2}\text{s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol m}^{-2}\text{s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
4.032	2.849	-29.034	166	1.411	0.972	-10.774	166	-10.774	166
3.243	2.347	-21.99	166	1.169	0.843	-8.001	166	-8.001	166
2.982	1.584	-34.311	166	1.805	1.181	-15.315	166	-15.315	166
1.683	1.426	-6.307	166	2.479	1.731	-18.358	166	-18.358	166
2.144	1.328	-20.027	166	2.064	1.552	-12.566	166	-12.566	166
2.325	1.882	-10.872	166	1.529	1.306	-5.473	166	-5.473	166
1.49	1.386	-2.552	166	1.786	1.617	-4.148	166	-4.148	166
1.726	1.441	-6.995	166	2.667	1.595	-26.31	166	-26.31	166
1.608	1.301	-7.535	166	2.625	1.722	-22.162	166	-22.162	166
2.913	1.889	-25.132	166	2.22	1.808	-10.112	166	-10.112	166
1.919	1.631	-7.068	166	2.418	1.5	-22.53	166	-22.53	166
2.014	1.392	-15.266	166	2.061	1.861	-4.909	166	-4.909	166
1.463	1.114	-8.565	166	2.537	1.759	-19.094	166	-19.094	166
0.952	0.84	-2.749	166	2.198	1.42	-19.094	166	-19.094	166
1.309	1.195	-2.798	166	3.231	2.179	-25.819	166	-25.819	166
2.425	1.392	-25.353	166	2.113	1.867	-6.037	166	-6.037	166
1.659	1.472	-4.589	166						
1.687	1.313	-9.179	166						

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Quercus ilex* 9 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

+++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$
1.07	0.839	-8.556	110	2.703	1.821	-17.193	209				
1.068	0.851	-8.037	110	1.904	1.849	-1.072	209				
3.239	2.701	-19.926	110	1.72	1.307	-8.051	209				
3.477	2.882	-22.037	110	1.737	1.686	-0.994	209				
2.261	1.959	-11.185	110	2.335	1.702	-12.339	209				
2.438	1.957	-17.815	110	2.438	1.683	-14.717	209				
2.766	2.397	-13.667	110	2.054	1.713	-6.647	209				
2.802	2.556	-9.111	110	1.756	1.29	-9.084	209				
2.693	2.428	-9.815	110	1.603	1.456	-2.865	209				
2.37	2.01	-13.333	110	1.482	1.235	-4.815	209				
2.41	1.957	-16.778	110	2.281	2.012	-5.244	209				
3.191	2.687	-18.667	110	2.667	1.876	-15.419	209				
3.216	2.765	-16.704	110	2.735	2.171	-10.994	209				
3.184	2.65	-19.778	110	2.764	2.341	-8.246	209				
3.098	2.753	-12.778	110	2.197	1.916	-5.478	209				
3.224	2.798	-15.778	110								
2.502	2.326	-6.519	110								
2.703	2.517	-6.889	110								
2.899	2.49	-7.973	209								
2.741	1.786	-18.616	209								

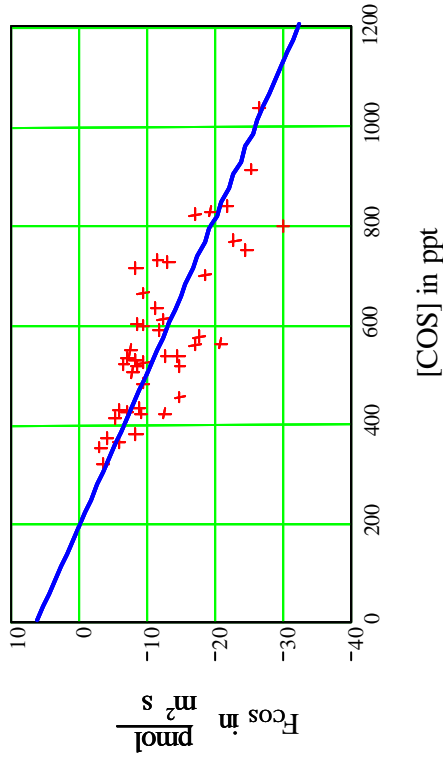
## Systemparameter beim Experiment:

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	-9.84
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	4.142
N	35
R	-0.681
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	172
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	3.966
m in $\text{pmol}/(\text{ppt} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$	-0.023

$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_e$ in l	1.5

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 10 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1998



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	-13.27
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	4.052
N	45
R	-0.791
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	187.12
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	6.014
m in $\text{pmol}/(\text{ppt}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})$	-0.032

## Systemparameter beim Experiment:

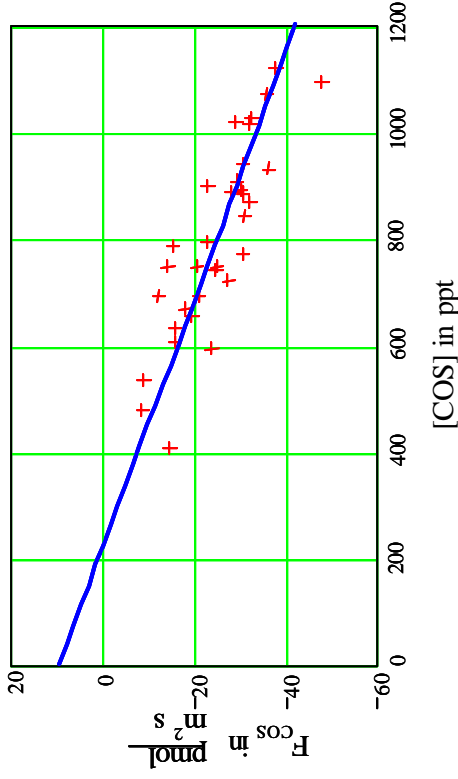
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_S$ in $\text{l}$	1.5

## Messergebnisse

$m_K$ $\frac{\text{ng}}{\text{ng}}$	$m_M$ $\frac{\text{ng}}{\text{ng}}$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s}\cdot\text{m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$m_R$ $\frac{\text{ng}}{\text{ng}}$	$m_M$ $\frac{\text{ng}}{\text{ng}}$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s}\cdot\text{m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s}\cdot\text{m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$
2.204	1.769	-8.687	204	1.839	1.442	-7.928	204	-7.928	204
2.06	1.019	-20.79	204	2.153	1.561	-11.823	204	-11.823	204
2.82	1.68	-22.767	204	3.009	2.151	-17.135	204	-17.135	204
3.067	1.972	-21.868	204	3.813	2.482	-26.581	204	-26.581	204
3.038	2.069	-19.352	204	1.947	1.587	-7.19	204	-7.19	204
2.012	1.631	-7.609	204	1.323	1.028	-5.891	204	-5.891	204
2.617	2.196	-8.408	204	1.291	1.131	-3.195	204	-3.195	204
1.568	1.271	-5.931	204	1.555	1.196	-7.17	204	-7.17	204
2.049	1.194	-17.075	204	1.536	1.083	-9.047	204	-9.047	204
1.358	1.15	-4.154	204	1.498	1.231	-5.332	204	-5.332	204
1.9	1.568	-6.63	204	2.749	1.511	-24.724	204	-24.724	204
1.758	1.29	-9.346	204	1.959	1.31	-12.961	204	-12.961	204
1.166	0.986	-3.595	204	1.939	1.517	-8.428	204	-8.428	204
1.57	1.126	-8.867	204	1.542	0.908	-12.866	204	-12.866	204
2.666	2.005	-13.201	204	1.869	1.46	-8.568	204	-8.568	204
1.916	1.451	-9.286	204	1.378	0.957	-8.408	204	-8.408	204
2.242	1.625	-12.322	204	3.35	2.082	-25.323	204	-25.323	204
2.671	2.093	-11.543	204	1.661	0.919	-14.818	204	-14.818	204
2.924	1.421	-30.016	204	1.958	1.221	-14.719	204	-14.719	204
2.185	1.719	-9.306	204	2.428	1.964	-9.267	204	-9.267	204
1.938	1.523	-8.288	204	2.56	1.626	-18.653	204	-18.653	204
2.11	1.232	-17.534	204	2.329	1.754	-11.483	204	-11.483	204
1.894	1.152	-14.818	204						

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 2 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-16.438
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	4.868
N	33
R	-0.854
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	218
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	9.405
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.043

### Systemparameter beim Experiment:

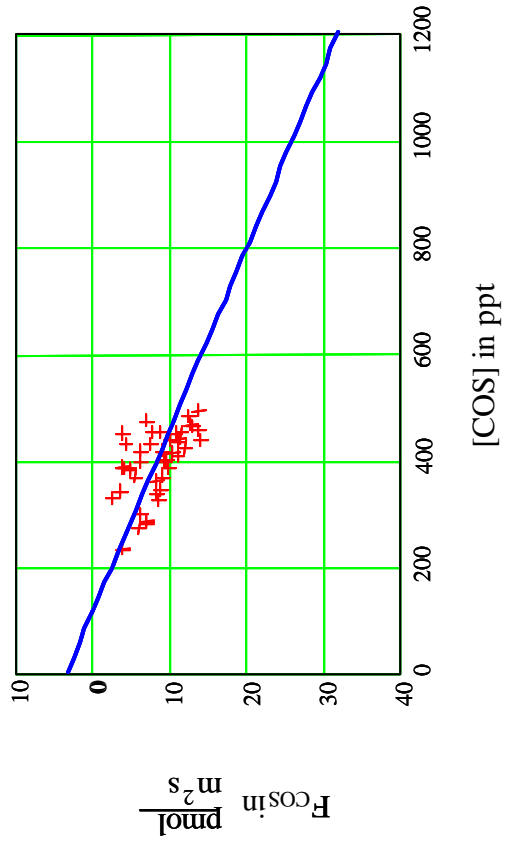
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_s$ in $\text{l}$	1.5

### Messergebnisse

$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
2.919	1.657	-23.056	223	3.452	1.785	-30.455	223	2.919	1.657	-23.056	223
3.939	1.988	-35.644	223	2.541	1.401	-20.827	223	3.939	1.988	-35.644	223
4.119	2.05	-37.799	223	2.227	1.358	-15.876	223	4.119	2.05	-37.799	223
3.279	1.63	-30.126	223	3.423	1.442	-36.192	223	3.279	1.63	-30.126	223
3.27	1.735	-28.044	223	1.76	1.284	-8.696	223	3.27	1.735	-28.044	223
4.028	1.413	-47.774	223	1.76	1.284	-8.696	223	4.028	1.413	-47.774	223
3.198	1.429	-32.319	223	2.321	1.446	-15.986	223	3.198	1.429	-32.319	223
2.716	1.376	-24.481	223	2.885	2.042	-15.401	223	2.716	1.376	-24.481	223
2.643	1.141	-27.441	223	2.182	0.877	-23.842	223	2.643	1.141	-27.441	223
2.537	1.877	-12.058	223	2.745	1.96	-14.341	223	2.537	1.877	-12.058	223
3.098	1.411	-30.82	223	3.249	1.568	-30.711	223	3.098	1.411	-30.82	223
3.335	1.722	-29.469	223	2.406	1.354	-19.219	223	3.335	1.722	-29.469	223
3.766	1.989	-32.465	223	1.49	0.697	-14.486	223	3.766	1.989	-32.465	223
2.743	1.381	-24.883	223	1.966	1.475	-8.97	223	2.743	1.381	-24.883	223
2.741	1.61	-20.663	223	3.733	1.963	-32.337	223	2.741	1.61	-20.663	223
2.836	1.163	-30.565	223	3.753	2.156	-29.176	223	2.836	1.163	-30.565	223
3.304	2.049	-22.928	223					3.304	2.049	-22.928	223
2.459	1.453	-18.379	223					2.459	1.453	-18.379	223

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 8 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.403
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	2.684
N	44
R	-0.555
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	109.42
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	3.312
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.029

## Systemparameter beim Experiment:

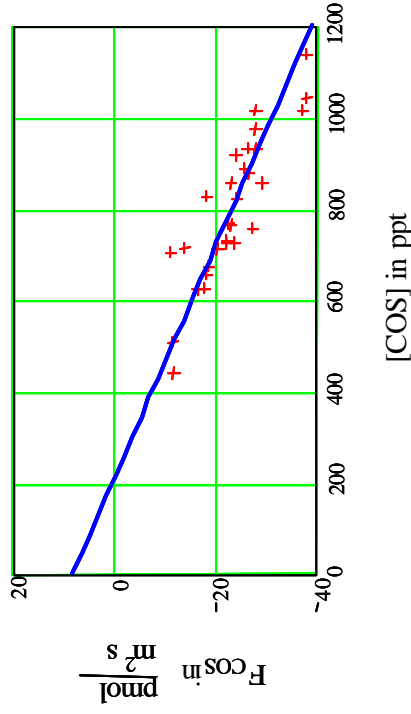
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
O in l/min	2.2
$V_s$ in l	1.5

## Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
1.251	0.971	308.96	1.668	0.625	-3.692	308.96	-13.753	1.251	0.971	-3.692	308.96
1.458	0.975	308.96	1.038	0.496	-6.369	308.96	-7.147	1.458	0.975	-6.369	308.96
1.411	1.044	308.96	0.995	0.533	-4.839	308.96	-6.092	1.411	1.044	-4.839	308.96
1.53	1.047	308.96	1.513	0.717	-6.369	308.96	-10.496	1.53	1.047	-6.369	308.96
1.654	0.972	308.96	1.236	0.593	-8.993	308.96	-8.479	1.654	0.972	-8.993	308.96
1.4	1.108	308.96	1.402	0.656	-3.85	308.96	-9.837	1.4	1.108	-3.85	308.96
1.34	0.905	308.96	1.489	0.647	-5.736	308.96	-11.103	1.34	0.905	-5.736	308.96
1.646	1.359	308.96	1.6	0.538	-3.785	308.96	-14.004	1.646	1.359	-3.785	308.96
1.397	1.033	308.96	1.033	0.486	-4.8	308.96	-7.213	1.397	1.033	-4.8	308.96
1.73	1.192	308.96	1.801	0.745	-7.094	308.96	-13.925	1.73	1.192	-7.094	308.96
1.197	0.996	308.96	1.703	0.728	-2.65	308.96	-12.857	1.197	0.996	-2.65	308.96
1.654	1.065	308.96	1.267	0.603	-7.767	308.96	-8.756	1.654	1.065	-7.767	308.96
1.424	1.135	308.96	1.471	0.745	-3.811	308.96	-9.573	1.424	1.135	-3.811	308.96
1.4	1.093	308.96	0.851	0.552	-4.048	308.96	-3.943	1.4	1.093	-4.048	308.96
1.571	1.239	308.96	1.098	0.616	-4.378	308.96	-6.356	1.571	1.239	-4.378	308.96
1.701	0.707	308.96	1.578	0.996	-13.107	308.96	-7.674	1.701	0.707	-13.107	308.96
1.607	0.75	308.96	1.523	0.84	-11.301	308.96	-9.006	1.607	0.75	-11.301	308.96
1.191	0.532	308.96	1.774	0.808	-8.69	308.96	-12.738	1.191	0.532	-8.69	308.96
1.348	0.655	308.96	1.591	0.74	-9.138	308.96	-11.222	1.348	0.655	-9.138	308.96
1.32	0.676	308.96	1.653	0.824	-8.492	308.96	-10.932	1.32	0.676	-8.492	308.96
1.454	0.736	308.96	1.593	0.818	-9.468	308.96	-10.219	1.454	0.736	-9.468	308.96
1.659	0.783	308.96	1.55	0.637	-11.551	308.96	-12.039	1.659	0.783	-11.551	308.96

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Quercus ilex* 12 unter 350 ppn $\ddot{u}$  CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

### COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-15.398
$\sigma_F$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	3.416
N	29
R	-0.88
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	207.859
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	8.162
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0.039

### Systemparameter beim Experiment:

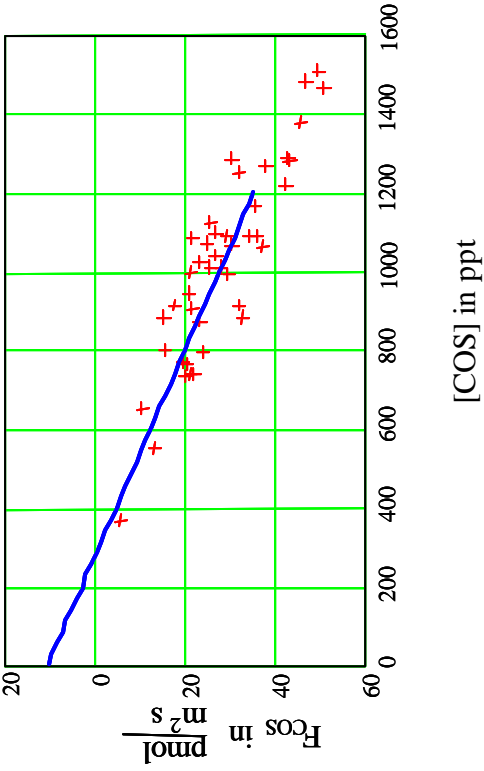
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in °C	25
O in l/min	2.2
$V_s$ in l	1.5

### Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol m <sup>2</sup> s	$A_{\text{Blatt}}$ cm <sup>2</sup>	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol m <sup>2</sup> s	$A_{\text{Blatt}}$ cm <sup>2</sup>
3.138	0.831	-29.189	322	3.42	1.213	-27.924	322
1.614	0.697	-11.602	322	3.146	1.318	-23.129	322
2.616	1.017	-20.231	322	3.416	1.337	-26.304	322
1.866	0.969	-11.349	322	2.284	0.987	-16.41	322
2.667	0.926	-22.028	322	3.734	0.807	-37.034	322
3.739	1.531	-27.937	322	3.034	1.592	-18.245	322
2.821	1.054	-22.357	322	2.621	1.542	-13.652	322
3.26	1.22	-25.811	322	2.594	1.717	-11.096	322
4.183	1.207	-37.654	322	2.776	2.044	-27.111	110
2.68	0.921	-22.256	322	2.656	2.016	-23.704	110
2.409	0.962	-18.308	322				
3.828	0.812	-38.16	322				
3.234	1.135	-26.557	322				
3.578	1.384	-27.759	322				
3.371	1.487	-23.837	322				
2.293	0.899	-17.637	322				
2.804	0.974	-23.154	322				
2.472	1.017	-18.409	322				
3.024	1.112	-24.191	322				

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Quercus ilex* 6 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-12.598
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	4.811
N	43
R	-0.891
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	271.21
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	10.392
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.038

## Systemparameter im Experiment:

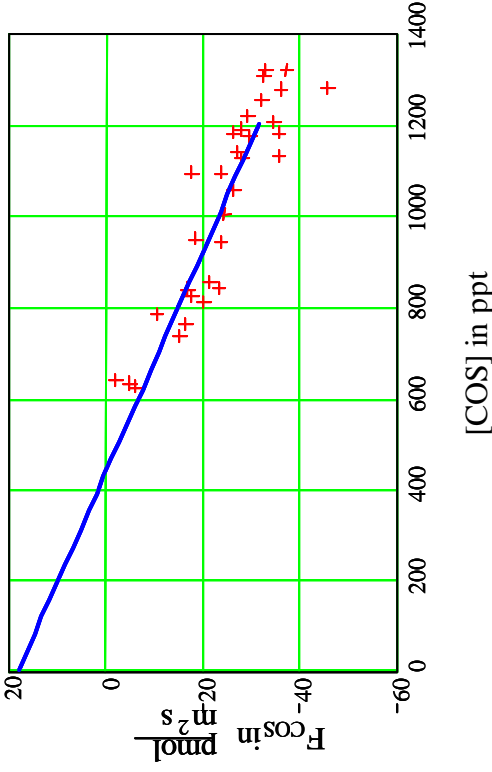
$\vartheta_{\text{Kivette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

## Messergebnisse

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$
3.664	2.482	-21.594	223	5.45	2.879	-46.971	223	2.879	2.879	-46.971	223
2.926	1.612	-24.006	223	4.654	2.562	-38.22	223	2.562	2.562	-38.22	223
3.713	2.311	-25.614	223	3.978	2.782	-21.85	223	2.782	2.782	-21.85	223
4.738	2.393	42.842	223	4.595	2.824	-32.355	223	2.824	2.824	-32.355	223
2.933	2.06	-15.949	223	5.053	2.539	-45.929	223	2.539	2.539	-45.929	223
3.348	2.378	-17.721	223	3.827	2.354	-26.911	223	2.354	2.354	-26.911	223
1.338	1.027	5.682	223	3.756	2.479	-23.33	223	2.479	2.479	-23.33	223
3.932	2.56	-25.066	223	4.285	2.316	-35.972	223	2.316	2.316	-35.972	223
2.821	1.727	-19.987	223	3.895	1.846	-37.434	223	1.846	1.846	-37.434	223
2.702	1.597	-20.188	223	3.348	1.589	-32.136	223	1.589	1.589	-32.136	223
2.706	1.49	-22.216	223	3.713	2.162	-28.336	223	2.162	2.162	-28.336	223
2.387	1.804	-10.651	223	3.992	2.383	-29.395	223	2.383	2.383	-29.395	223
3.245	1.429	-33.177	223	3.236	2.4	-15.273	223	2.4	2.4	-15.273	223
2.719	1.546	-21.43	223	4.002	2.027	-36.082	223	2.027	2.027	-36.082	223
3.204	1.92	-23.458	223	3.642	2.006	-29.889	223	2.006	2.006	-29.889	223
4.699	2.322	43.426	223	2.813	1.681	-20.681	223	1.681	1.681	-20.681	223
5.382	2.6	-50.825	223	3.466	2.321	-20.918	223	2.321	2.321	-20.918	223
4.715	3.037	-30.656	223	3.322	2.134	-21.704	223	2.134	2.134	-21.704	223
4.12	2.71	-25.76	223	3.912	2.23	-30.729	223	2.23	2.23	-30.729	223
5.545	2.812	49.93	223	4.031	2.55	-27.057	223	2.55	2.55	-27.057	223
4.483	2.162	42.403	223				223				223
2.014	1.282	-13.373	223				223				223

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 9 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-7.038
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	4.223
N	32
R	-0.908
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	429.71
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	17.759
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.041

## Systemparameter beim Experiment:

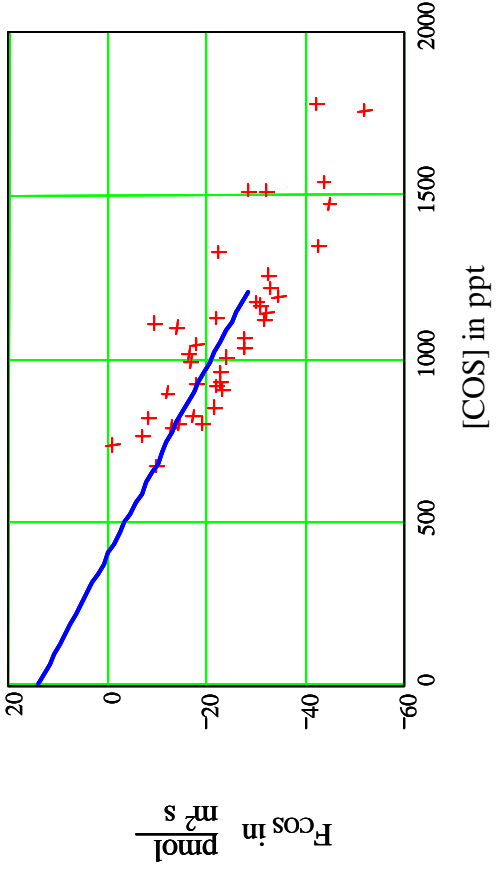
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_{\text{S}}$ in l	1.5

## Messergebnisse

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol}} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol}} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
4.614	2.394	-32.312	279.9	2.88	2.158	-10.514	279.9
2.974	1.592	-20.103	279.9	4.367	2.428	-28.225	279.9
3.137	1.67	-21.343	279.9	4.694	2.203	-36.259	279.9
2.293	1.873	-6.113	279.9	4.811	2.572	-32.591	279.9
3.083	1.926	-16.837	279.9	4.019	2.784	-17.972	279.9
3.09	1.48	-23.439	279.9	4.424	2.048	-34.582	279.9
2.311	1.955	-5.187	279.9	4.703	1.555	-45.813	279.9
3.457	1.83	-23.684	279.9	3.886	2.054	-26.653	279.9
4.848	2.58	-33.01	279.9	4.339	2.501	-26.758	279.9
4.322	2.278	-29.762	279.9	3.481	2.208	-18.531	279.9
4.19	2.32	-27.229	279.9	4.146	1.784	-17.92	279.9
4.855	2.299	-37.202	279.9	2.694	1.626	-15.545	279.9
4.337	1.886	-35.665	279.9	3.679	1.988	-24.609	279.9
4.025	2.378	-23.963	279.9	4.165	1.705	-35.805	279.9
2.346	2.196	-2.183	279.9				
4.478	2.465	-29.308	279.9				
2.791	1.642	-16.732	279.9				

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 10 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 1999



- Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-7.358
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	6.247
N	40
R	-0.838
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	390.88
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	13.753
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.035

## Systemparameter beim Experiment:

$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.5

## Messergebnisse

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{s m}^2}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
2.786	2.362	-7.051	245	3.773	2.101	-27.803	245	2.101	2.362	-7.051	245
6.521	3.987	-42.138	245	3.773	2.101	-27.803	245	2.101	3.987	-42.138	245
3.721	2.725	-16.562	245	3.101	1.793	-21.751	245	1.793	2.725	-16.562	245
2.936	2.047	-14.783	245	4.453	2.468	-33.008	245	2.468	2.047	-14.783	245
2.977	2.479	-8.281	245	4.248	2.374	-31.163	245	2.374	2.479	-8.281	245
2.893	2.11	-13.02	245	3.508	2.122	-23.048	245	2.122	2.11	-13.02	245
3.627	2.594	-17.178	245	3.661	2.198	-24.328	245	2.198	2.594	-17.178	245
3.262	2.52	-12.339	245	2.932	1.773	-19.273	245	1.773	2.52	-12.339	245
2.689	2.637	-0.865	245	5.409	2.713	-44.831	245	2.713	2.637	-0.865	245
2.453	1.868	-9.728	245	3.818	2.722	-18.225	245	2.722	1.868	-9.728	245
4.104	2.776	-22.083	245	3.888	2.227	-27.621	245	2.227	2.776	-22.083	245
3.352	2.021	-22.133	245	3.888	2.227	-27.621	245	2.227	2.021	-22.133	245
4.603	2.644	-32.576	245	3.362	2.932	-18.06	245	2.932	2.644	-32.576	245
6.446	3.296	-52.381	245	4.914	3.897	-42.715	245	3.897	3.296	-52.381	245
5.544	3.6	-32.327	245	4.867	4.325	-22.764	245	4.325	3.6	-32.327	245
4.36	2.282	-34.555	245	4.059	3.832	-9.534	245	3.832	2.282	-34.555	245
3.391	1.998	-23.164	245	4.007	3.668	-14.238	245	3.668	1.998	-23.164	245
3.301	1.904	-23.231	245	5.539	4.86	-28.519	245	4.86	1.904	-23.231	245
4.084	2.165	-31.911	245	4.298	3.582	-30.073	245	3.582	2.165	-31.911	245
3.013	1.971	-17.327	245	5.648	4.604	-43.849	245	4.604	1.971	-17.327	245
4.183	2.237	-32.36	245	5.648	4.604	-43.849	245	4.604	2.237	-32.36	245



Darstellung der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],Baum: *Quercus ilex* 2 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000

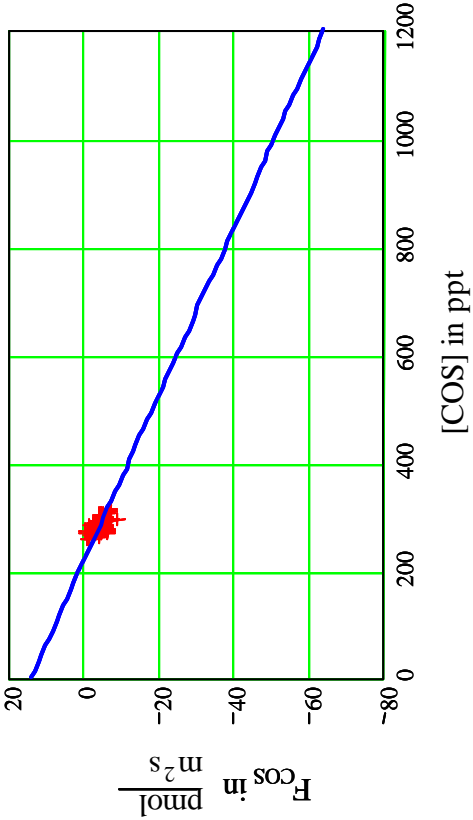
## Messergebnisse

$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
0.834	0.785	-3.191	94	0.837	0.768	-4.467	94
0.839	0.778	-3.988	94	0.854	0.775	-5.105	94
0.864	0.78	-5.424	94	0.844	0.768	-4.945	94
0.918	0.822	-6.222	94	0.842	0.778	-4.148	94
1.364	1.006	-23.291	94	0.839	0.807	-2.074	94
1.332	1.021	-20.26	94	0.829	0.761	-4.467	94
1.382	1.033	-22.653	94	0.834	0.795	-2.552	94
1.386	1.063	-21.058	94	0.834	0.775	-3.829	94
1.416	1.036	-24.727	94	0.815	0.761	-3.51	94
1.345	1.038	-19.941	94	0.839	0.758	-5.264	94
1.342	0.999	-22.334	94	0.866	0.751	-7.498	94
1.416	1.016	-26.003	94	0.847	0.766	-5.264	94
1.345	1.067	-18.027	94	0.849	0.793	-3.669	94
1.399	1.033	-23.77	94	0.856	0.756	-6.541	94
1.399	1.09	-20.101	94	0.834	0.751	-5.424	94
1.409	1.09	-20.739	94	0.839	0.761	-5.105	94
1.438	1.067	-24.089	94	0.795	0.748	-3.031	94
1.458	1.05	-26.482	94	0.824	0.785	-2.552	94
1.416	1.045	-24.089	94	0.856	0.795	-3.988	94
1.409	1.099	-20.101	94	0.847	0.766	-5.264	94

$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.433	1.038	-25.684	94	1.536	1.065	-30.63	94
1.421	1.109	-20.26	94	1.543	1.224	-20.739	94
1.455	1.094	-23.451	94	1.561	1.065	-32.225	94
1.467	1.112	-23.132	94	1.561	1.065	-32.225	94
1.394	1.10	-18.984	94	1.529	1.117	-26.801	94
1.377	1.097	-18.186	94	1.578	1.087	-31.906	94
1.436	1.109	-21.217	94	1.58	1.107	-30.789	94
1.426	1.117	-20.101	94	1.58	1.104	-30.949	94
1.465	1.085	-24.727	94	1.551	1.117	-28.237	94
1.543	1.102	-28.715	94	1.58	1.121	-29.832	94
1.516	1.104	-26.801	94	1.651	1.117	-34.778	94
1.507	1.033	-30.789	94	1.593	1.092	-32.544	94
1.519	1.104	-26.961	94	1.58	1.097	-31.427	94
1.526	1.033	-32.065	94	1.583	1.107	-30.949	94
1.509	1.087	-27.439	94	1.566	1.087	-31.108	94
1.507	1.104	-26.163	94	1.585	1.08	-32.863	94
1.526	1.063	-30.151	94	1.556	1.06	-32.225	94
1.521	1.09	-28.077	94	1.541	1.109	-28.077	94
1.521	1.085	-28.396	94	1.553	1.239	-20.42	94
1.536	1.065	-30.63	94				

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 8 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



— Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$   
 +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-25.14
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	1.5
N	81
R	-0.48
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	212
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	13.80
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.065

## Systemparameter beim Experiment :

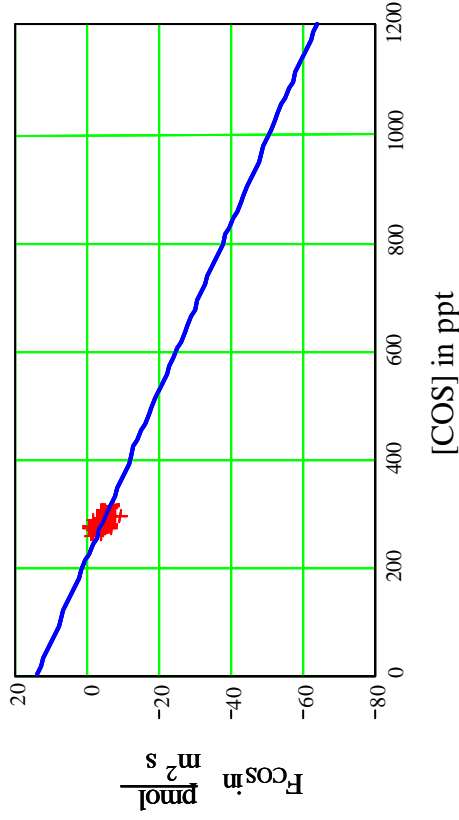
$\vartheta_{\text{Klimate}} \text{ in } ^\circ\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

## Messergebnisse

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$
0.721	0.601	-6.123	120	0.67	0.589	-4.124	120	0.67	0.589	-4.124	120
0.672	0.555	-5.998	120	0.636	0.606	-1.5	120	0.636	0.606	-1.5	120
0.719	0.633	4.374	120	0.677	0.613	-3.249	120	0.677	0.613	-3.249	120
0.724	0.569	-7.873	120	0.672	0.631	-2.124	120	0.672	0.631	-2.124	120
0.697	0.572	-6.373	120	0.655	0.613	-2.124	120	0.655	0.613	-2.124	120
0.677	0.547	-6.623	120	0.67	0.618	-2.624	120	0.67	0.618	-2.624	120
0.663	0.555	-5.498	120	0.692	0.626	-3.374	120	0.692	0.626	-3.374	120
0.685	0.559	-6.373	120	0.69	0.616	-3.749	120	0.69	0.616	-3.749	120
0.677	0.572	-5.373	120	0.712	0.643	-3.499	120	0.712	0.643	-3.499	120
0.66	0.594	-3.374	120	0.672	0.655	-0.875	120	0.672	0.655	-0.875	120
0.672	0.542	-6.623	120	0.665	0.648	-0.875	120	0.665	0.648	-0.875	120
0.67	0.547	-6.248	120	0.69	0.626	-3.249	120	0.69	0.626	-3.249	120
0.66	0.528	-6.748	120	0.677	0.636	-2.124	120	0.677	0.636	-2.124	120
0.677	0.572	-5.373	120	0.675	0.613	-3.124	120	0.675	0.613	-3.124	120
0.631	0.599	-1.625	120	0.672	0.613	-2.999	120	0.672	0.613	-2.999	120
0.67	0.535	-6.873	120	0.687	0.633	-2.749	120	0.687	0.633	-2.749	120
0.717	0.532	-9.372	120	0.692	0.658	-1.75	120	0.692	0.658	-1.75	120
0.643	0.559	-4.249	120	0.709	0.626	-4.249	120	0.709	0.626	-4.249	120
0.672	0.586	-4.374	120	0.658	0.621	-1.874	120	0.658	0.621	-1.874	120
0.672	0.574	-4.999	120	0.658	0.626	-4.249	120	0.658	0.626	-4.249	120
0.65	0.567	-4.249	120	0.69	0.626	-3.249	120	0.69	0.626	-3.249	120
0.658	0.564	-4.749	120				120				120

Darstellung der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 8 unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



- Regressionsgerade der COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

**COS-Austauschparameter:**

$F_{\text{CO}_2}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-25.14
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	1.5
N	81
R	-0.48
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	212
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	13.80
m in $\text{pmol}/(\text{Ppt m}^2\text{s})$	-0.065

**Systemparameter beim Experiment:**

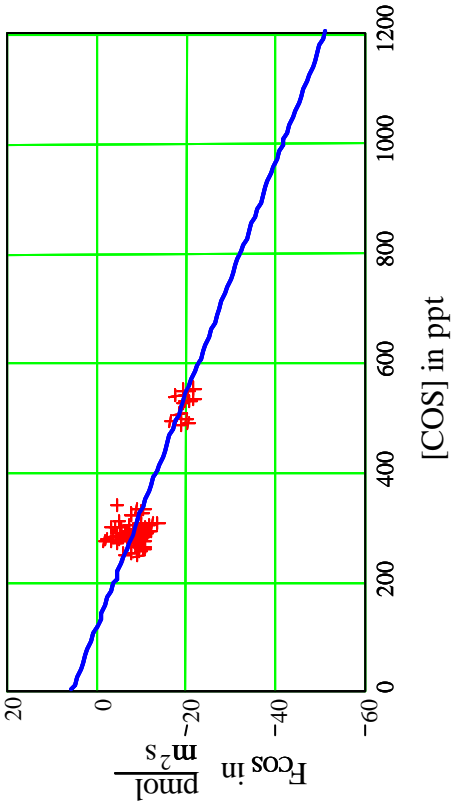
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_s$ in l	1.0

**Messergebnisse**

$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_k}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
0.702	0.586	5.873	120	0.724	0.64	4.249	120	0.724	0.64	4.249	120
0.667	0.567	5.124	120	0.707	0.613	4.749	120	0.707	0.613	4.749	120
0.721	0.589	6.748	120	0.739	0.628	5.623	120	0.739	0.628	5.623	120
0.692	0.589	5.249	120	0.694	0.633	3.124	120	0.694	0.633	3.124	120
0.702	0.596	5.373	120	0.702	0.65	2.624	120	0.702	0.65	2.624	120
0.692	0.606	4.374	120	0.726	0.604	6.248	120	0.726	0.604	6.248	120
0.697	0.599	4.999	120	0.768	0.626	7.248	120	0.768	0.626	7.248	120
0.712	0.589	6.248	120	0.714	0.594	6.123	120	0.714	0.594	6.123	120
0.719	0.606	5.748	120	0.744	0.658	4.374	120	0.744	0.658	4.374	120
0.699	0.606	4.749	120	0.721	0.616	5.373	120	0.721	0.616	5.373	120
0.68	0.616	3.249	120	0.746	0.638	5.498	120	0.746	0.638	5.498	120
0.712	0.623	4.499	120	0.746	0.655	4.624	120	0.746	0.655	4.624	120
0.714	0.609	5.373	120	0.739	0.623	5.873	120	0.739	0.623	5.873	120
0.704	0.613	4.624	120	0.739	0.658	4.124	120	0.739	0.658	4.124	120
0.731	0.613	5.998	120	0.714	0.623	4.624	120	0.714	0.623	4.624	120
0.748	0.611	6.998	120	0.721	0.633	4.499	120	0.721	0.633	4.499	120
0.712	0.64	3.624	120	0.763	0.616	7.498	120	0.763	0.616	7.498	120
0.736	0.633	5.249	120	0.741	0.648	4.749	120	0.741	0.648	4.749	120
0.717	0.621	4.874	120	0.739	0.618	6.123	120	0.739	0.618	6.123	120
				0.724	0.64	4.249	120	0.724	0.64	4.249	120

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Quercus ilex* 12 unter 350 ppmv  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{\text{CO}_2}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-23.10
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	2.5
N	94
R	-0.86
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	112
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	5.3
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.047

## Systemparameter beim Experiment :

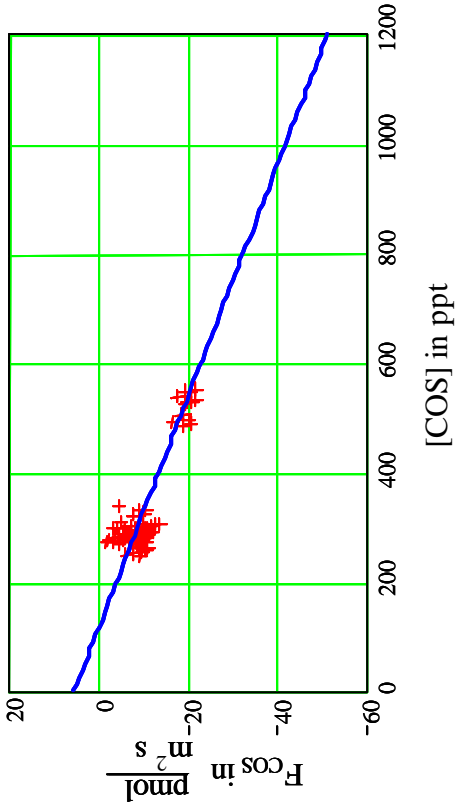
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

## Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$
1.189	0.907	-20.56	86	0.64	0.506	-7.78	86	-7.78	86
1.21	0.922	-18.977	86	0.662	0.5	-9.913	86	-9.913	86
1.2	0.933	-20.002	86	0.64	0.529	-9.451	86	-9.451	86
1.237	0.967	-16.586	86	0.66	0.509	-9.325	86	-9.325	86
1.238	0.967	-19.2	86	0.645	0.511	-10.553	86	-10.553	86
1.29	0.974	-18.729	86	0.656	0.511	-9.48	86	-9.48	86
1.295	0.995	-20.985	86	0.656	0.532	-8.753	86	-8.753	86
1.301	1.014	-19.976	86	0.751	0.532	-8.753	86	-8.753	86
1.282	0.995	-21.796	86	0.658	0.684	-4.814	86	-4.814	86
1.336	1.011	-19.299	86	0.732	0.596	-4.462	86	-4.462	86
1.336	1.044	-20.78	86	0.683	0.576	-11.062	86	-11.062	86
1.345	1.062	-19.479	86	0.688	0.574	-7.784	86	-7.784	86
1.314	1.039	-21.754	86	0.695	0.622	-4.72	86	-4.72	86
1.314	1.064	-17.74	86	0.679	0.596	-7.041	86	-7.041	86
0.81	1.064	-17.74	86	0.665	0.59	-6.333	86	-6.333	86
0.812	0.66	-10.682	86	0.686	0.619	-3.247	86	-3.247	86
0.796	0.686	-8.936	86	0.787	0.632	-3.843	86	-3.843	86
0.828	0.655	-10.007	86	0.787	0.679	-7.679	86	-7.679	86
0.596	0.766	-4.446	86	0.728	0.671	-7.679	86	-7.679	86
0.624	0.464	-9.385	86	0.728	0.68	-4.033	86	-4.033	86
0.633	0.485	-9.868	86	0.726	0.68	-3.409	86	-3.409	86
0.608	0.485	-10.481	86	0.72	0.644	-5.847	86	-5.847	86
0.64	0.522	-6.14	86	0.687	0.597	-8.699	86	-8.699	86
0.615	0.485	-10.963	86	0.687	0.576	-7.88	86	-7.88	86
0.64	0.504	-7.927	86	0.702	0.576	-9.011	86	-9.011	86
0.615	0.506	-9.508	86	0.712	0.576	-9.671	86	-9.671	86

Darstellung der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 12 unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

**COS-Austauschparameter**

$F_{600}$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	-23.10
$\sigma_F$ in pmol/(m <sup>2</sup> s)	2.5
N	94
R	-0.86
KP in pmol/(m <sup>2</sup> s)	112
b in pmol/(m <sup>2</sup> s)	5.3
m in pmol/(ppt m <sup>2</sup> s)	-0.047

**Systemparameter beim Experiment :**

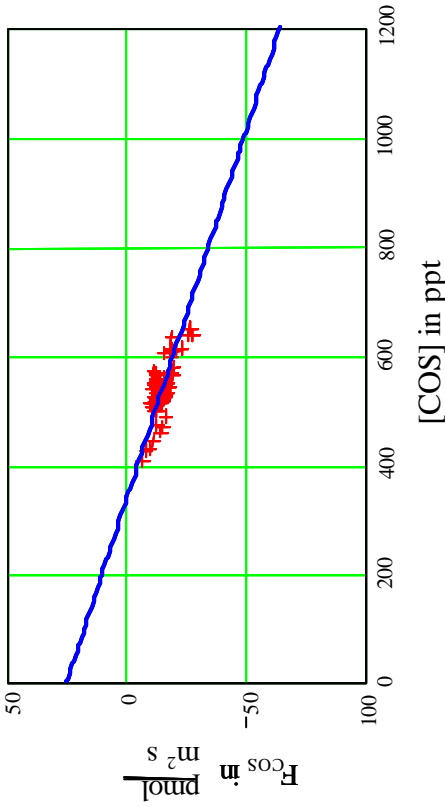
Küvette in °C	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

**Messergebnisse**

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol m <sup>2</sup> s	$A_{\text{Blatt}}$ cm <sup>2</sup>	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol m <sup>2</sup> s	$A_{\text{Blatt}}$ cm <sup>2</sup>	$n_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol m <sup>2</sup> s	$A_{\text{Blatt}}$ cm <sup>2</sup>
0.7	0.585	-8.166	86	0.698	0.545	-10.867	86	0.698	0.545	-10.867	86
0.701	0.628	-5.215	86	0.698	0.553	-10.316	86	0.698	0.553	-10.316	86
0.683	0.602	-5.794	86	0.668	0.54	-9.092	86	0.668	0.54	-9.092	86
0.687	0.608	-5.559	86	0.715	0.545	-12.03	86	0.715	0.545	-12.03	86
0.696	0.613	-5.922	86	0.707	0.548	-11.289	86	0.707	0.548	-11.289	86
0.666	0.563	-7.36	86	0.739	0.573	-11.798	86	0.739	0.573	-11.798	86
0.697	0.605	-6.521	86	0.702	0.545	-11.151	86	0.702	0.545	-11.151	86
0.743	0.597	-10.356	86	0.712	0.548	-11.613	86	0.712	0.548	-11.613	86
0.687	0.576	-7.88	86	0.72	0.573	-10.433	86	0.72	0.573	-10.433	86
0.687	0.576	-7.88	86	0.7	0.545	-10.954	86	0.7	0.545	-10.954	86
0.702	0.576	-9.011	86	0.748	0.553	-13.829	86	0.748	0.553	-13.829	86
0.712	0.576	-9.671	86	0.682	0.54	-10.065	86	0.682	0.54	-10.065	86
0.7	0.585	-8.166	86	0.67	0.639	-2.167	86	0.67	0.639	-2.167	86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215	86				86				86
0.683	0.602	-5.794	86				86				86
0.687	0.608	-5.559	86				86				86
0.696	0.613	-5.922	86				86				86
0.666	0.563	-7.36	86				86				86
0.697	0.605	-6.521	86				86				86
0.743	0.597	-10.356	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.687	0.576	-7.88	86				86				86
0.702	0.576	-9.011	86				86				86
0.712	0.576	-9.671	86				86				86
0.7	0.585	-8.166	86				86				86
0.701	0.628	-5.215									

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 6 unter 800ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$E_{\text{COS}}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-19.576
$\sigma_E$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	2.6
N	146
R	-0.78
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	336
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	25
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.074

## Systemparameter beim Experiment :

$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_s$ in $\text{l}$	1.0

## Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol $\text{m}^2 \text{ s}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol $\text{m}^2 \text{ s}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ pmol $\text{m}^2 \text{ s}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
1.158	0.839	-12.996	150	1.487	1.004	-19.694	150	1.487	1.004	-19.694	150
1.048	0.802	-9.997	150	1.377	1.08	-12.097	150	1.377	1.08	-12.097	150
0.994	0.839	-6.298	150	1.377	1.08	-12.097	150	1.377	1.08	-12.097	150
1.197	0.802	-16.095	150	1.318	1.06	-10.497	150	1.318	1.06	-10.497	150
1.222	0.942	-11.397	150	1.256	1.001	-10.397	150	1.256	1.001	-10.397	150
1.352	0.977	-15.296	150	1.377	0.898	-19.495	150	1.377	0.898	-19.495	150
1.261	0.955	-12.497	150	1.342	0.928	-16.895	150	1.342	0.928	-16.895	150
1.59	0.947	-26.193	150	1.318	1.031	-11.697	150	1.318	1.031	-11.697	150
1.259	0.955	-12.397	150	1.256	0.93	-13.296	150	1.256	0.93	-13.296	150
1.34	0.942	-16.195	150	1.254	0.905	-14.196	150	1.254	0.905	-14.196	150
1.298	0.932	-14.896	150	1.298	0.932	-14.896	150	1.298	0.932	-14.896	150
1.274	0.896	-15.396	150	1.298	0.932	-14.896	150	1.298	0.932	-14.896	150
1.347	1.001	-14.096	150	1.34	0.932	-16.595	150	1.34	0.932	-16.595	150
1.32	0.886	-17.695	150	1.34	0.932	-16.595	150	1.34	0.932	-16.595	150
1.32	0.886	-17.695	150	1.281	1.001	-11.397	150	1.281	1.001	-11.397	150
1.323	0.928	-16.095	150	1.256	0.886	-15.096	150	1.256	0.886	-15.096	150
1.367	1.031	-13.696	150	1.259	0.886	-15.196	150	1.259	0.886	-15.196	150
1.251	0.93	-13.096	150	1.34	1.065	-11.197	150	1.34	1.065	-11.197	150
1.382	0.905	-19.395	150	1.298	1.004	-11.997	150	1.298	1.004	-11.997	150
1.256	0.932	-13.196	150	1.274	0.898	-15.296	150	1.274	0.898	-15.296	150
1.347	0.932	-16.895	150	1.347	0.928	-17.095	150	1.347	0.928	-17.095	150
1.298	0.945	-14.396	150	1.32	1.031	-11.797	150	1.32	1.031	-11.797	150
1.462	1.001	-18.795	150	1.32	0.93	-15.896	150	1.32	0.93	-15.896	150
1.288	0.886	-16.395	150	1.32	0.93	-15.896	150	1.32	0.93	-15.896	150
1.288	0.886	-16.395	150	1.347	0.932	-16.895	150	1.347	0.932	-16.895	150
1.352	1.065	-11.697	150	1.32	0.945	-15.296	150	1.32	0.945	-15.296	150

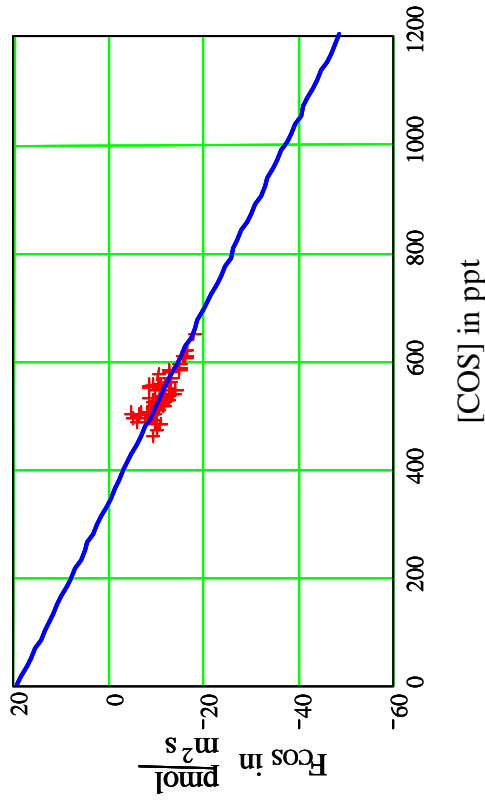
Darstellung der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],Baum: *Quercus ilex*  $\delta$  unter 800ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000

## Messergebnisse

$m_R$ ng	$m_M$ ng	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol}} \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol}} \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol}} \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\text{pmol}} \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.256	1.001	-10.397	150	1.494	1.031	-18.895	150	1.347	0.932	-16.895	150	1.32	1.004	-12.896	150
1.254	1.018	-9.597	150	1.286	0.93	-14.496	150	1.32	0.945	-15.296	150	1.32	1.004	-12.896	150
1.259	0.982	-11.297	150	1.384	0.932	-18.395	150	1.256	1.001	-10.397	150	1.409	0.928	-19.595	150
1.32	0.989	-13.496	150	1.504	0.932	-23.293	150	1.254	1.018	-9.597	150	1.494	1.031	-18.895	150
1.504	1.065	-17.895	150	1.281	0.886	-16.095	150	1.259	0.982	-11.297	150	1.286	0.93	-14.496	150
1.399	1.119	-11.397	150	1.274	0.905	-14.996	150	1.32	0.989	-13.496	150	1.286	0.93	-14.496	150
1.362	1.077	-11.597	150	1.32	0.886	-17.695	150	1.504	1.065	-17.89	150	1.384	0.932	-18.395	150
1.548	1.087	-18.795	150	1.558	0.886	-27.392	150	1.399	1.119	-11.397	150	1.504	0.932	-23.293	150
1.261	0.991	-10.997	150	1.558	0.886	-27.392	150	1.362	1.077	-11.597	150	1.281	0.886	-16.095	150
1.494	0.982	-20.894	150	1.22	0.908	-12.696	150	1.548	1.087	-18.795	150	1.274	0.905	-14.996	150
1.286	1.009	-11.297	150	1.33	0.932	-16.195	150	1.261	0.991	-10.997	150	1.274	0.905	-14.996	150
1.384	1.094	-11.797	150	1.283	0.945	-13.796	150	1.494	0.982	-20.89	150	1.32	0.886	-17.695	150
1.259	0.991	-10.897	150	1.229	0.93	-12.197	150	1.286	1.009	-11.297	150	1.32	0.886	-17.695	150
1.364	0.986	-15.396	150	1.244	0.93	-12.796	150	1.384	1.094	-11.797	150	1.558	0.886	-27.392	150
1.274	0.93	-13.996	150	1.556	0.94	-25.093	150	1.259	0.991	-10.897	150	1.558	0.886	-27.392	150
1.281	0.903	-15.396	150	1.288	0.945	-13.996	150	1.364	0.986	-15.396	150	1.22	0.908	-12.696	150
1.59	0.93	-26.892	150	1.232	0.982	-10.197	150	1.364	0.986	-15.396	150	1.33	0.932	-16.195	150
1.259	0.94	-12.996	150	1.477	1.099	-15.396	150	1.274	0.93	-13.996	150	1.283	0.945	-15.396	150
1.34	0.913	-17.395	150	1.121	0.766	-14.496	150	1.281	0.903	-15.396	150	1.229	0.93	-12.197	150
1.298	0.886	-16.795	150	1.146	0.788	-14.596	150	1.59	0.93	-26.892	150	1.229	0.93	-12.197	150
1.274	0.886	-15.796	150	1.08	0.81	-10.997	150	1.259	0.94	-12.996	150	1.244	0.93	-12.796	150
1.347	1.065	-11.497	150	1.038	0.839	-8.098	150	1.34	0.913	-17.395	150	1.556	0.94	-25.093	150
1.32	1.004	-12.896	150	1.32	1.031	-11.797	150	1.298	0.886	-16.795	150	1.288	0.945	-13.996	150
1.32	1.004	-12.896	150	1.32	0.93	-15.896	150	1.274	0.886	-15.796	150	1.288	0.945	-13.996	150
1.409	0.928	-19.595	150	1.32	0.93	-15.896	150	1.347	1.065	-11.497	150	1.232	0.982	-10.197	150

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Quercus ilex* 9 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.929
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	1.695
N	74
R	-0.801
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	335.68
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	18.959
m in $\text{pmol}/(\text{ppt}\cdot\text{m}^2\text{s})$	-0.056

## Systemparameter beim Experiment :

$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0

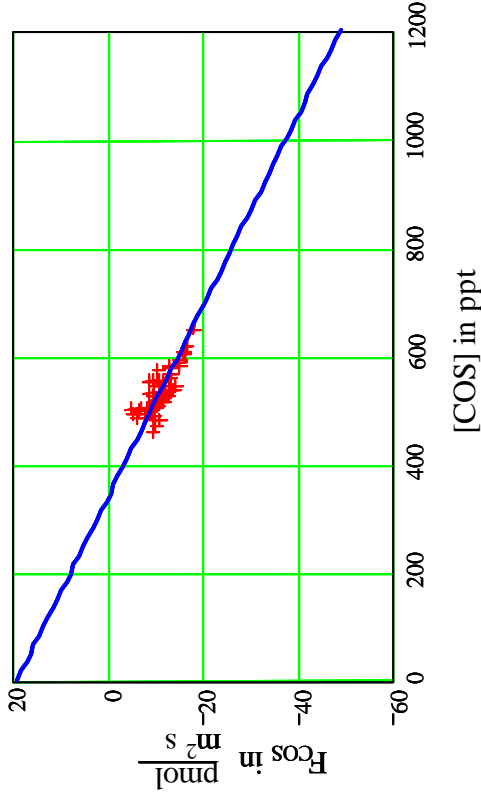
## Messergebnisse

$\frac{\text{m}_R}{\text{ng}}$	$\frac{\text{m}_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{m}_R}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{m}_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.227	1.07	-5.051	190	1.22	-9.392	190	0.928	-9.392	190
1.227	1.009	-7.024	190	1.259	-10.971	190	0.918	-10.971	190
1.222	1.013	-6.709	190	1.283	-9.234	190	0.996	-9.234	190
1.188	0.947	-7.735	190	1.31	-10.813	190	0.974	-10.813	190
1.33	0.947	-12.312	190	1.386	-13.181	190	0.977	-13.181	190
1.33	0.986	-11.05	190	1.31	-11.365	190	0.957	-11.365	190
1.227	0.94	-9.234	190	1.328	-9.787	190	1.023	-9.787	190
1.251	0.945	-9.866	190	1.224	-9.313	190	0.935	-9.313	190
1.251	0.945	-9.866	190	1.202	-7.971	190	0.955	-7.971	190
1.234	0.964	-8.682	190	1.244	-10.576	190	0.915	-10.576	190
1.229	0.923	-9.866	190	1.315	-13.417	190	0.898	-13.417	190
1.19	0.996	-6.235	190	1.224	-8.208	190	0.969	-8.208	190
1.278	0.905	-11.997	190	1.153	-10.102	190	0.839	-10.102	190
1.313	0.903	-13.181	190	1.175	-9.945	190	0.866	-9.945	190
1.227	0.947	-8.997	190	1.119	-9.471	190	0.824	-9.471	190
1.266	0.932	-10.734	190	1.175	-11.128	190	0.829	-11.128	190
1.2	0.932	-8.603	190	1.175	-11.128	190	0.829	-11.128	190
1.335	0.893	-14.207	190	1.175	-11.128	190	0.829	-11.128	190
1.335	0.893	-14.207	190	1.313	-13.654	190	0.888	-13.654	190
1.281	0.994	-9.234	190	1.35	-11.918	190	0.979	-11.918	190
1.281	0.886	-12.707	190	1.193	-9.708	190	0.891	-9.708	190

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Fortsetzung

Baum: *Quercus ilex* 9 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



— Regressionsgerade der  $\text{COS}$ -Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$   
 +++ Experimentelle ermittelte  $\text{COS}$ -Austauschraten,  $F_{\text{COS}}$

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-14.929
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	1.695
N	74
R	-0.801
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	335.68
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	18.959
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.056

## Systemparameter beim Experiment :

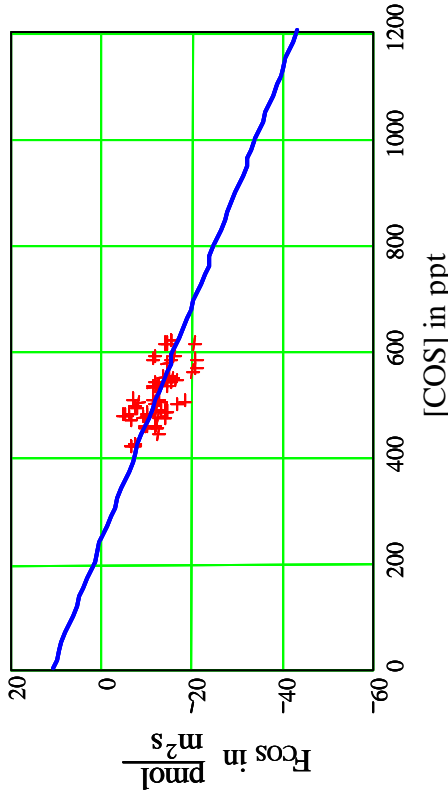
$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_s$ in l	1.0

## Messergebnisse

$n_R$ ng	$n_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$	$n_R$ ng	$n_M$ ng	$F_{\text{COS}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$A_{\text{Blatt}}$ $\text{cm}^2$
1.256	0.893	-11.681	190	1.359	1.094	-8.524	190
1.264	0.908	-11.444	190	1.355	1.021	-10.734	190
1.261	0.94	-10.339	190	1.355	1.016	-10.892	190
1.345	1.075	-8.682	190	1.421	0.955	-14.996	190
1.391	0.972	-13.496	190	1.421	1.021	-12.865	190
1.482	0.994	-15.706	190	1.421	1.021	-12.865	190
1.482	0.994	-15.706	190	1.421	1.021	-12.865	190
1.202	1.038	-5.288	190	1.482	0.979	-16.18	190
1.271	0.95	-10.339	190	1.593	1.028	-18.153	190
1.237	0.974	-8.445	190	1.453	0.994	-15.075	190
1.301	0.928	-11.997	190	1.401	1.077	-10.418	190
1.305	0.93	-12.076	190	1.433	0.964	-15.075	190
1.271	0.92	-11.286	190	1.261	0.947	-10.102	190
1.202	1.038	-5.288	190				
1.301	1.038	-8.445	190				
1.512	0.999	-16.495	190				
1.512	0.999	-16.495	190				
1.413	1.011	-12.944	190				
1.475	0.974	-16.101	190				
1.359	1.063	-9.55	190				
1.374	0.972	-12.944	190				

## Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der COS Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Quercus ilex* 10 unter 800 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, Messreihe 2000



— Regressionsgerade der COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$   
 +++ Experimentelle ermittelte COS-Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## Messergebnisse

$n_R$ ng	$m_M$ ng	$\frac{F_{\text{COS}}}{A_{\text{Blatt}}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$	$m_R$ ng	$m_M$ ng	$\frac{F_{\text{COS}}}{A_{\text{Blatt}}}$ $\frac{\text{pmol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
1.308	0.996	-12.287	155	1.345	0.962	-15.093	155
1.168	1.028	-5.515	155	1.229	1.021	-8.224	155
1.18	1.026	-6.095	155	1.337	0.935	-15.867	155
1.2	1.001	-7.837	155	1.239	0.95	-11.416	155
1.21	1.026	-7.256	155	1.32	0.955	-14.415	155
1.428	0.891	-21.188	155	1.229	0.935	-11.61	155
1.166	0.849	-12.48	155	1.305	1.021	-11.223	155
1.183	0.827	-14.028	155	1.504	0.986	-20.414	155
1.178	0.92	-10.158	155	1.32	1.018	-11.9	155
1.117	0.859	-10.158	155	1.305	0.935	-14.609	155
1.173	0.915	-10.158	155	1.313	0.996	-12.48	155
1.197	0.891	-12.093	155	1.239	1.06	-7.063	155
1.185	0.849	-13.254	155	1.323	0.928	-15.576	155
1.124	0.827	-11.706	155	1.497	1.126	-14.609	155
1.163	0.92	-9.578	155	1.413	1.043	-14.609	155
1.372	0.859	-20.22	155	1.426	1.036	-15.383	155
1.335	0.915	-16.544	155	1.497	1.141	-14.028	155
1.239	0.915	-12.771	155	1.514	1.121	-15.48	155
1.384	0.849	-21.091	155	1.516	1.126	-15.383	155
1.301	1.013	-11.319	155	1.445	1.141	-11.997	155
1.345	0.991	-13.932	155				

## COS-Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	-16.363
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	2.848
N	72
R	-0.682
KP in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	237.95
b in $\text{pmol}/(\text{m}^2\text{s})$	10.755
m in $\text{pmol}/(\text{ppt m}^2\text{s})$	-0.045

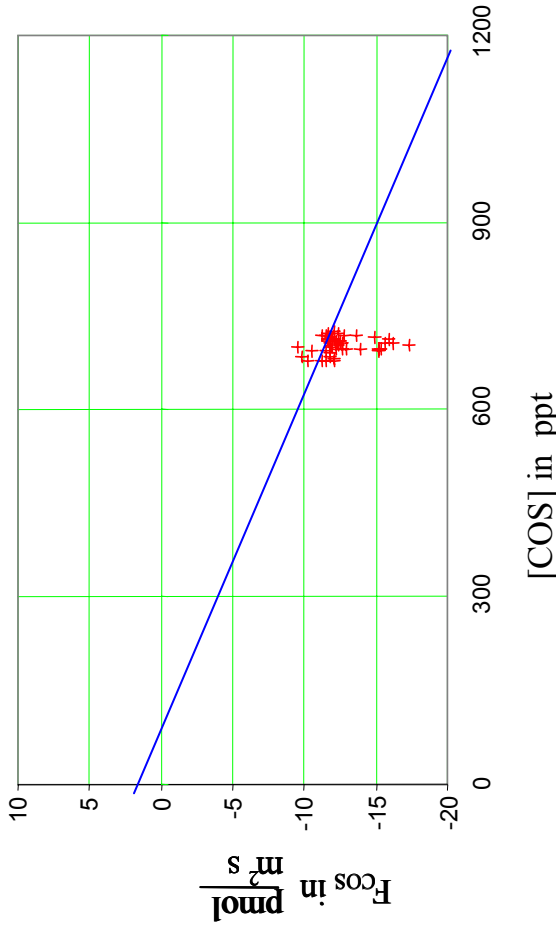
## Systemparameter beim Experiment :

$\vartheta_{\text{Küvette}}$ in $^{\circ}\text{C}$	25
Q in l/min	2.2
$V_S$ in l	1.0



# Darstellung der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>, in Abhängigkeit der COS-Umgebungskonzentration, [COS],

Baum: *Picea abies* unter 350 ppm CO<sub>2</sub>-Umgebungskonzentration



- Regressionsgerade der COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>
- +++ Experimentell ermittelte COS-Austauschrate, F<sub>COS</sub>

## COS-Austauschparameter

F <sub>600</sub> in pmol/(s m <sup>2</sup> )	-12.57
σ <sub>F</sub> in pmol/(s m <sup>2</sup> )	1.72
N	43
R	-0.02
KP in pmol/(s m <sup>2</sup> )	10.5
b in pmol/(s m <sup>2</sup> )	2.22
m in pmol/(ppt v s m <sup>2</sup> )	-0.021

## Systemparameter beim Experiment:

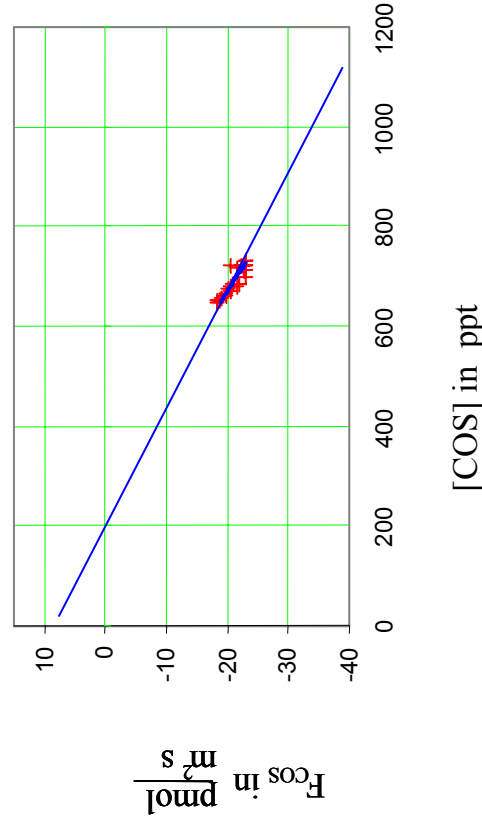
θ <sub>Kivette</sub> in °C	25
Q in l/min	2.2
V <sub>s</sub> in l	1.5

## Messergebnisse :

m <sub>R</sub> ng	m <sub>M</sub> ng	F <sub>COS</sub> pmol s m <sup>2</sup>	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	m <sub>R</sub> ng	m <sub>M</sub> ng	F <sub>COS</sub> pmol s m <sup>2</sup>	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>	F <sub>COS</sub> pmol s m <sup>2</sup>	A <sub>Blatt</sub> cm <sup>2</sup>
2.813	2.495	-9.481	111	2.885	2.378	-11.252	111	-11.252	111
2.887	2.503	-11.476	111	2.915	2.371	-12.075	111	-12.075	111
2.889	2.433	-13.632	111	2.789	2.313	-10.582	111	-10.582	111
2.873	2.374	-14.930	111	2.757	2.316	-9.793	111	-9.793	111
2.843	2.320	-15.632	111	2.729	2.270	-10.202	111	-10.202	111
2.802	2.338	-13.879	111	2.777	2.244	-11.849	111	-11.849	111
2.860	2.329	-15.896	111	2.736	2.195	-12.018	111	-12.018	111
2.836	2.296	-16.158	111	2.733	2.214	-11.523	111	-11.523	111
2.823	2.246	-17.252	111	2.729	2.188	-12.021	111	-12.021	111
2.801	2.287	-15.359	111	2.733	2.227	-11.252	111	-11.252	111
2.795	2.286	-15.206	111	2.757	2.227	-11.788	111	-11.788	111
2.801	2.294	-15.148	111	2.807	2.222	-12.979	111	-12.979	111
2.871	2.343	-11.730	111	2.807	2.238	-12.624	111	-12.624	111
2.864	2.329	-11.881	111	2.804	2.253	-12.241	111	-12.241	111
2.877	2.348	-11.762	111	2.811	2.275	-11.913	111	-11.913	111
2.869	2.329	-12.015	111	2.830	2.270	-12.427	111	-12.427	111
2.860	2.334	-11.681	111	2.844	2.274	-12.667	111	-12.667	111
2.845	2.315	-11.767	111	2.792	2.274	-11.513	111	-11.513	111
2.904	2.348	-12.364	111	2.847	2.294	-12.280	111	-12.280	111
2.905	2.383	-11.588	111	2.886	2.310	-12.803	111	-12.803	111
2.863	2.336	-11.703	111	2.852	2.287	-12.546	111	-12.546	111
2.858	2.334	-11.637	111				111		111

# Darstellung der COS-Austauschrate, $F_{\text{COS}}$ , in Abhängigkeit der $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration, $[\text{COS}]$ ,

Baum: *Pinus sylvestris* unter 350 ppm  $\text{CO}_2$ -Umgebungskonzentration



- Regressionsgerade der  $\text{CO}_2$ -Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$
- +++ Experimentell ermittelte  $\text{CO}_2$ -Austauschrate,  $F_{\text{COS}}$

## $\text{CO}_2$ -Austauschparameter

$F_{600}$ in $\text{pmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	-21.13
$\sigma_F$ in $\text{pmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	1.65
N	23
R	-0.77
KP in $\text{pmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	275
b in $\text{pmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	13.78
m in $\text{pmol}/(\text{ppt} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2)$	-0.05

## Systemparameter beim Experiment:

$g_{\text{Kivette}}$ in $^\circ\text{C}$	25
O in $\text{l}/\text{min}$	2.2
$V_s$ in $\text{l}$	1.5

## Messergebnisse

$\frac{m_R}{\text{ng}}$	$\frac{m_M}{\text{ng}}$	$\frac{F_{\text{COS}}}{\frac{\text{pmol}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{A_{\text{Blatt}}}{\text{cm}^2}$
2.802	1.769	-22.963	157
2.867	1.831	-23.021	157
2.898	1.868	-22.888	157
2.902	1.883	-22.646	157
2.933	1.893	-23.095	157
2.908	1.876	-22.929	157
2.908	1.902	-22.346	157
2.931	1.894	-23.049	157
2.907	1.994	-20.297	157
2.884	1.921	-21.412	157
2.857	1.835	-22.710	157
2.754	1.772	-21.815	157
2.729	1.766	-21.405	157
2.734	1.815	-20.436	157
2.755	1.822	-20.729	157
2.718	1.809	-20.212	157
2.701	1.786	-20.321	157
2.675	1.779	-19.916	157
2.653	1.771	-19.593	157
2.607	1.780	-18.370	157
2.615	1.778	-18.607	157
2.638	1.781	-19.030	157
2.615	1.788	-18.363	157