

LANGZEITWIRKUNGEN DER ATMOSPHERISCHEN CO₂-ANREICHERUNG AUF
DEN KOHLENSTOFF- UND WASSERHAUSHALT VON ROTKLEE-
WIESENSCHWINGELGEMEINSCHAFTEN

Manfred Forstreuter

ABSTRACT

Plant communities of *Trifolium pratense* and *Festuca pratensis* (mixtures 1:1) were grown in out-door controlled mini-glasshouses from seedlings onwards at 350, 450, 600 and 800 ppm CO₂ in the air. CO₂ gas exchange and water loss of the model ecosystems (plants and soil) per ground area were continuously measured. The daily net CO₂ flux increased significantly with elevated CO₂ concentrations (46 %). The plant stand at 800 ppm, however, showed no significant difference compared to 600 ppm. Average daily net assimilation rates of 18.0 (350 ppm), 24.5 (450 ppm), 26.3 (600 ppm) and 23.8 g CO₂ m⁻² d⁻¹ (800 ppm) were measured in August and September. A higher rate of CO₂ loss during the night occurred in the plant stands under increased CO₂ concentrations. The evapotranspiration of the model ecosystems was affected by elevated CO₂ concentration. Absolute water use declined by 10 % in the plant community at 450 ppm, however, with higher CO₂ treatments it was nearly equal compared to the 350 ppm plant community. Water use efficiency of all stands (g CO₂/g H₂O) increased by 47 % with elevated CO₂ concentration and was more affected by the lower rather than the higher CO₂ concentration levels.

keywords: CO₂ enrichment, CO₂ gas exchange, evapotranspiration, water use efficiency

1. EINLEITUNG

Die kontinuierliche Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration ist eine gut dokumentierte Tatsache. Die jährliche globale Steigerung wird aufgrund der Messungen an verschiedenen Meßstationen auf der Erde, die bekannteste ist wohl das Mauna Loa Observatorium auf Hawaii (KEELING 1985), mit 1,5 ppm pro Jahr angegeben (TRABALKA 1985). Abweichend von diesen Messungen können in Ballungsräumen regionale Unterschiede auftreten, die eine höhere Steigerungsrate von etwa 4,5 ppm pro Jahr signalisieren (OVERDIECK 1991).

Die Ergebnisse einer großen Anzahl bestehender Arbeiten aus der ganzen Welt wurden zusammengetragen (KIMBALL 1983, STRAIN und CURE 1985). Aufbauend auf die Resultate, die die Reaktionen der Pflanzen bei einer erhöhten CO₂-Konzentration widerspiegeln, war es notwendig geworden, diese auf dem Niveau ganzer Pflanzenbestände zu bestätigen bzw. zu widerlegen. Es wurden daher Untersuchungen an ganzen Beständen aus landwirtschaftlich genutzten Pflanzen und natürlichen Vegetationseinheiten unter den verschiedenen Klimabedingungen durchgeführt (OVERDIECK, BOSSEMEYER und LIETH 1984, BAZZAZ und CARLSON 1984, JONES et al. 1985, HILBERT et al. 1987, OVERDIECK und FORSTREUTER 1987). Dabei wurde nachgewiesen, daß sich Größen wie Wachstum, Konkurrenz und CO₂-Gaswechsel in Abhängigkeit von den verschiedenen Klimafaktoren auf dem Ökosystemniveau bei Verdopplung der CO₂-Konzentration ändern.

Die Transpiration wurde mit steigender CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft reduziert. Diese Ergebnisse wurden an Einzelpflanzen, jeweils auf die Blattfläche bezogen, in vielen Kurzzeitexperimenten gewonnen (PALLAS 1965, REGEHR et al. 1975, GOUDRIAAN und VAN LAAR 1978, KIMBALL und IDSO 1983). Aber auch Langzeitexperimente zeigten eine

Reduzierung der Transpiration an verschiedenen Pflanzen (EGLI et al. 1970, CARLSON und BAZZAZ 1980). Diese Abnahme der Transpirationsraten war verbunden mit einer Steigerung der CO₂-Fixierungsraten und bedeutete damit eine Erhöhung der Wasserverbrauchs-Effizienzen bei den meisten Pflanzen (MORISON und GIFFORD 1983). Diese Einsparung des Wasserverbrauchs pro Blattfläche unter erhöhter CO₂-Konzentration, könnte durch die gleichzeitige Zunahme der Blattflächen, die an vielen Pflanzen beobachtet wurde, wieder kompensiert werden (ACOCK und ALLEN 1985).

Aufgrund dieser Ergebnisse sind Änderungen im Wasserhaushalt ganzer Vegetationseinheiten möglich. Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluß einer CO₂-Konzentrationserhöhung auf Wasserverbrauch und auf die Wasserverbrauchs-Effizienz ganzer Pflanzenbestände bei verschiedenen Konzentrationsniveaus.

2. MATERIAL UND METHODEN

Pflanzenmaterial

Die Samen von *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* wurden im Gewächshaus vorgekeimt und insgesamt 1296 Keimlinge der beiden Spezies im Verhältnis 1:1 (25 Samen dm⁻²) in Mini-Gewächshäuser auf eine Grundfläche von 80 x 80 cm pikiert. Das Substrat, ein humoser schluffiger Sand mit einer guten Nährstoffversorgung, wurde vorher homogenisiert und bis zu einer Tiefe von 60 cm in die Mini-Gewächshäuser eingefüllt (Raumgewicht 1,28 g cm⁻³). Im Laufe des Versuches wurde auf eine zusätzliche Düngung verzichtet. Die Niederschläge wurden am Standort gemessen und die entsprechenden Mengen an Leitungswasser in die Mini-Gewächshäuser gegossen.

Meßanlage

Am Standort Osnabrück (52° 18'N, 8° 2'O) wurden die Pflanzenbestände mit dem Oberboden in vier klimatisierbaren Mini-Gewächshauseinheiten aus UV-durchlässigem Acrylglas (DIN 16957, RHÖM) in der Vegetationsperiode 1987 mit CO₂ begast. Die CO₂-Konzentrationsniveaus wurden mit Hilfe elektronischer Regelsysteme und Zumischung von reinem CO₂ über thermische Massenflußmesser auf einen Sollwert von 350, 450, 600 und 800 ppm gehalten (Tab. 1). Die Häuser hatten eine Grundfläche von 0,64 m², ein abgeschlossenes Bodenvolumen von 0,38 m³ und ein Luftvolumen von 0,51 m³.

Tab. 1: In den Mini-Gewächshäusern voreingestellte Sollwerte der CO₂-Konzentrationen (350, 450, 600 und 800 ppm) und die im Versuchszeitraum erzielten CO₂-Konzentrationsniveaus mit den jeweiligen Standardabweichungen. Im weiteren Text werden nur noch die Sollwerte als CO₂-Konzentrationsstufen genannt.

CO ₂ - Konzentrationen	
350 ppm	≅ 353 ± 18 ppm
450 ppm	≅ 447 ± 17 ppm
600 ppm	≅ 607 ± 20 ppm
800 ppm	≅ 801 ± 7 ppm

Das Innenklima wurde durch ein Kühlsystem, daß sich an der Nordseite in einem Aluminium-Gehäuse befand und durch eine Plexiglaswand abgetrennt war, über eine elektronische Regelung (Eigenbau, Universität Osnabrück, RATHMANN) nach den Außenbedingungen eingestellt. Dieses System bestand aus einem Kühler, der über Schlauchwege mit einem externen Kühlaggregat verbunden war und bei Bedarf von einem Kühlflüssigkeitsgemisch durchströmt

wurde. Wichen die Lufttemperaturen, die mit einem Pt-100 Widerstandsthermometer (HARTMANN und BRAUN) jeweils innen und außen gemessen wurden, voneinander ab, so wurde die Innenluft mit einem Ventilator durch den Kühler geblasen und anschließend der Meßkammer wieder zugeführt (modifiziert nach OVERDIECK und BOSSEMEYER 1985). Es konnte eine Temperatur- (± 0.5 °C) und Luftfeuchtigkeitseinstellung (± 15 %) nach den Außenbedingungen erzielt werden. Die Messungen der Photonenflußdichte (PhAR) wurden innerhalb und außerhalb mit einem Quantum-Sensor (Li-190 SB, LICOR, Lincoln, Neb., USA) durchgeführt und ergaben eine Verminderung der Lichtintensitäten innerhalb der Mini-Gewächshäuser bis max. 17 %.

Die Windgeschwindigkeit wurde im Freiland durch ein Schalenstern-Anemometer (Typ 1469, W. LAMPRECHT) gemessen und innerhalb der Mini-Gewächshäuser durch einen zweiten Ventilator, relativ zur Geschwindigkeit außen, im Bereich von 0,5 bis 2,5 m s⁻¹ nachgeregelt.

Meßdatenerfassung

Die Erfassung der einzelnen Meßparameter (Tab. 2) erfolgte im 48 Sekunden-Takt mit einem Polycomp 2 (HARTMANN und BRAUN) auf einem Schreibstreifen. Parallel dazu wurden die Rohdaten mit einer Datenerfassungsanlage über einen Analog-Digital-Wandler (Eigenbau, Universität Osnabrück) auf einen portablen Rechner (OLIVETTI M 10) übertragen und als Halbstundenmittelwerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen auf dem Großrechner der Universität Osnabrück abgespeichert.

Tab. 2: Auflistung der Meßparameter, die während der gesamten Versuchsdauer im Freiland und in den Mini-Gewächshäuser gemessen und aufgezeichnet wurden.

Meßparameter im 48 s Takt	Sensor bzw. Meßgerät	Mini-Gewächshaus				Frei- land	Anzahl d. Meßkanäle	Einheit
		1	2	3	4			
Lufttemperatur	Pt-100, HARTMANN und BRAUN	1	1	1	1	2	6	[°C]
Bodentemperatur	Pt-100, HARTMANN und BRAUN	1	-	-	-	-	1	[°C]
Relative Luft- feuchtigkeit	Kapazitiver Fühler TESTOTHERM, Typ 9763	1	1	1	1	1	5	[%]
Windgeschwindigkeit	Schalenstern Anemo- meter Nr. 1469, W. LAMPRECHT	-	-	-	-	1	1	[km h ⁻¹]
Strahlung (PhAR)	Quantum-Sensor, LICOR (400-700 nm) Li 190 SB	1	-	-	-	1	2	[$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
CO ₂ -Konzentration	URAS 2T, 3G, HARTMANN und BRAUN	1	1	1	1	1	5	[ppm]
CO ₂ -Zugabemenge	Thermische Massenfluß- messer, Modell 5850 TR BROOKS INSTRUMENTS	1	1	1	1	-	4	[ml min ⁻¹]
Meßparameter Tageswerte	Sensor bzw. Meßgerät	Mini-Gewächshaus				Frei- land	Anzahl d. Messungen	Einheit
		1	2	3	4			
Luftdurchfluß	Schwebekörper-Durchfluß- messer, BROOKS INSTRUMENT und Gasuhren, STADTWERKE OSNABRÜCK	1	1	1	1	-	4	[m ³ h ⁻¹]
Luftdruck	Luftdruckmesser, WTM	-	-	-	-	1	1	[mbar]
Niederschlag	Regenmesser nach Prof. Hellmann, W. LAMPRECHT	-	-	-	-	1	1	[mm]
Kondenswasser	Meßzylinder	1	1	1	1	-	4	[ml]
Bodensaugspannung	Tensiometer, Mod. 2725 SOILMOISTURE	2	2	2	2	2	10	[Pa]

CO₂-Gaswechsel

Der CO₂-Gaswechsel und der Wasserverbrauch wurde an vier Modell-Ökosystemen unter vier CO₂-Konzentrationsniveaus an Pflanzenbeständen bestehend aus *Trifolium pratense* L. (Sorte: Lero) sowie *Festuca pratensis* (Sorte: Cosmos 2) und Boden bestimmt.

Bei der Meßanlage handelte es sich um ein offenes System (Abb. 1), bei dem die Meßkammer (Mini-Gewächshaus) von einem konstanten Luftvolumen (max. 2500 l h⁻¹) durchströmt wurde. Diesem Luftvolumen wurde nach dem Kompensationsprinzip reines CO₂ mit thermischen Massenflußmessern (Modell 5850 TR, BROOKS INSTRUMENTS) über eine automatische, elektronische Ventilsteuerung zugeführt, um so den voreingestellten Sollwert der CO₂-Konzentration einzuhalten (vgl. Tab. 1). Aus der Konzentrationsdifferenz der Zu- und der Abluft der Mini-Gewächshäuser, die mit einem URAS 3G (HARTMANN und BRAUN) gemessen wurde, plus der reinen CO₂-Zugabemengen, berechnete sich der Gaswechsel der Systeme (Pflanzen und Boden) nach Gleichung (1.0) und wurde wie bei OVERDIECK und BOSSEMEYER (1985) auf die Grundfläche bezogen:

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{1}{A} \left(J_v \Delta P_{\text{CO}_2} + J_{v\text{CO}_2} \frac{T_v}{T_c} \right) \frac{T_0 P M_r}{T P_0 V_0} \quad (1.0)$$

F_{CO_2} :	CO ₂ -Flußdichte	[g m ⁻² h ⁻¹]
A:	Grundfläche	[m ²]
ΔP_{CO_2} :	CO ₂ -Konzentrationsdifferenz zwischen der Zu- und der Abluft	[ppm]
J_v :	Luftdurchfluß	[m ³ h ⁻¹]
$J_{v\text{CO}_2}$:	zugemischtes, reines CO ₂	[m ³ h ⁻¹]
M_r :	Molmasse von CO ₂	44 [g mol ⁻¹]
V_0 :	Molvolumen eines idealen Gases unter Normaltemperatur	22.414 · 10 ⁻³ [m ³ mol ⁻¹]
T:	Lufttemperatur	[K]
T_0 :	Normaltemperatur	273.15 [K]
T_v :	Umgebungstemperatur der thermischen Massenflußmesser	273.15 [K]
T_c :	Kalibrierungstemperatur der thermischen Massenflußmesser	273.15 [K]
P:	Luftdruck	[Pa]
P_0 :	Normaldruck	10.13 [Pa]

Wasserverbrauch

Die Wasserabgabemengen (Evapotranspiration) der einzelnen Pflanzenbestände wurden über den Zeitraum eines Tages bestimmt. Dazu wurde aus den Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit, die mit einem kapazitiven Feuchtesensor (Typ 9763, TESTOTHERM Lenzkirch) jeweils im Freiland und in den Mini-Gewächshäusern gemessen wurde, die Wasserdampftransportrate aus den Systemen berechnet. Zusammen mit den Kondenswassermengen, die in den Kühlsystemen der Mini-Gewächshäusern anfielen, konnte der Wasserverbrauch der Modell-Ökosysteme (Pflanzen und Boden) bei den unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen nach Gleichung (2.0) ermittelt werden. Der Sättigungsdampfdruck (E_s) wurde hierbei nach einer vom Deutschen Wetterdienst (1979) angegebenen Beziehung berechnet.

$$F_{H_2O} = \frac{1}{A} \left(\frac{(rF_a E_s - rF_i E_s) J_v M_d}{RT} + J_k \right) \quad (2.0)$$

F_{H_2O} :	Wasserabgabe der Pflanzenbestände	[g m ⁻² d ⁻¹]
A:	Grundfläche	[m ²]
rF_a :	relative Luftfeuchtigkeit der ausströmenden Luft	[%]
rF_i :	relative Luftfeuchtigkeit der einströmenden Luft	[%]
J_v :	Luftdurchfluß	[m ³ d ⁻¹]
M_d :	Molmasse von Wasserdampf	18.016 [g mol ⁻¹]
R:	univers. Gaskonstante	8.3171 [J mol ⁻¹ K ⁻¹]
T:	Lufttemperatur	[K]
J_k :	Kondenswasserrate	[g d ⁻¹]
E_s :	Sättigungsdampfdruck der ein- und auströmenden Luft	[Pa]

$$E_s = c_1 e^{\frac{c_2 (T - 273.15)}{c_3 + (T - 273.15)}} \quad (3.0)$$

c_1 =	6.10780 10 ⁻²	[Pa]
c_2 =	17.08085	[]
c_3 =	234.175	[K]

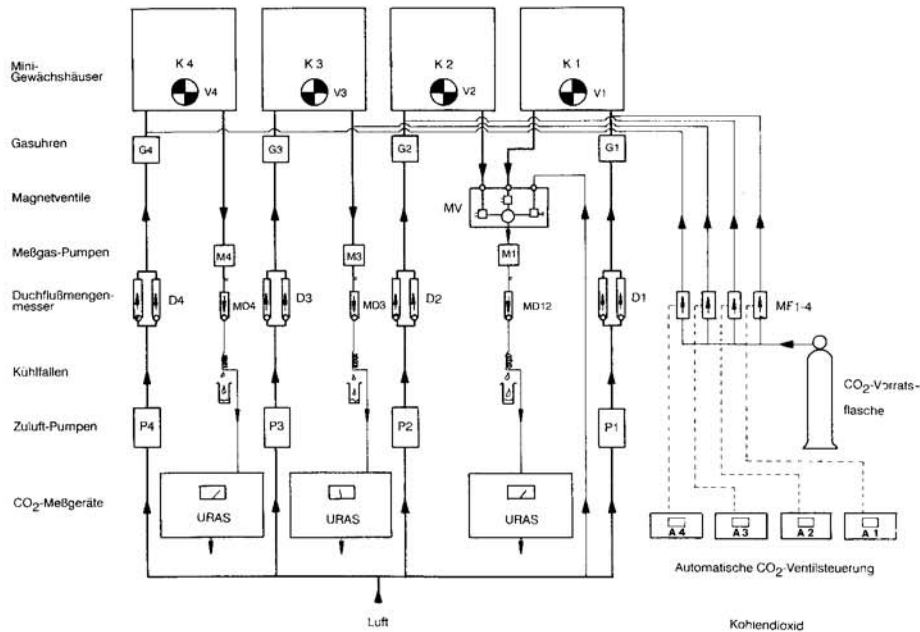


Abb. 1: Pneumatische Verbindungen (— , durchgezogene Linien) in der CO₂-Gaswechselmeßanlage mit vier Mini-Gewächshäusern (K1-4) für Luft und Kohlendioxid und die Kabel der automatischen Ventilsteuerung (- - -, gestrichelte Linien) für die CO₂-Zugabemengen durch die thermischen Massenflußmesser (MF1-4). V1-4: Ventilatoren; URAS: Ultrarotabsorptionsspektroskop

3. ERGEBNISSE

CO₂-Gaswechsel

Die Halbstundenmittelwerte des CO₂-Gaswechsels (Abb. 2) der Pflanzenbestände bei den vier CO₂-Bedingungen zeigten 29 bis 64 Tage nach Begasungsbeginn in den Tagesgängen ein deutlich höheres Niveau mit steigender CO₂-Konzentration bis hin zu 600 ppm. Dieses Niveau wurde bei 800 ppm nicht mehr übertroffen. Über den gesamten Versuchszeitraum wurden die maximalen CO₂-Gaswechselraten ($F_{CO_2, max}$) am Tage gemittelt (Tab. 3). Es ergaben sich mittlere Raten von 4,4 (350 ppm), 5,6 (450 ppm), 6,3 (600 ppm) und 6,2 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (800 ppm), wobei sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Begasungstufen 600 und 800 ppm sichern ließen. Die Streuung der CO₂-Gaswechselraten nahm mit steigender CO₂-Konzentration zu.

Tagesgänge

Die mittleren Tagesgangkurven des CO₂-Gaswechsels für den Versuchszeitraum sind in Abbildung 3 dargestellt. Sie erreichten am Tage ein deutlich höheres Niveau bei den drei CO₂-Konzentrationen 450, 600 und 800 ppm als in der Kontrolle (350 ppm). Der mittlere Tagesgang für den Pflanzenbestand bei 800 ppm erreichte gegenüber dem bei 600 ppm keine höheren CO₂-Fixierungsraten. Bei den mittleren Tagesgängen trat in den Mittagsstunden eine maximale

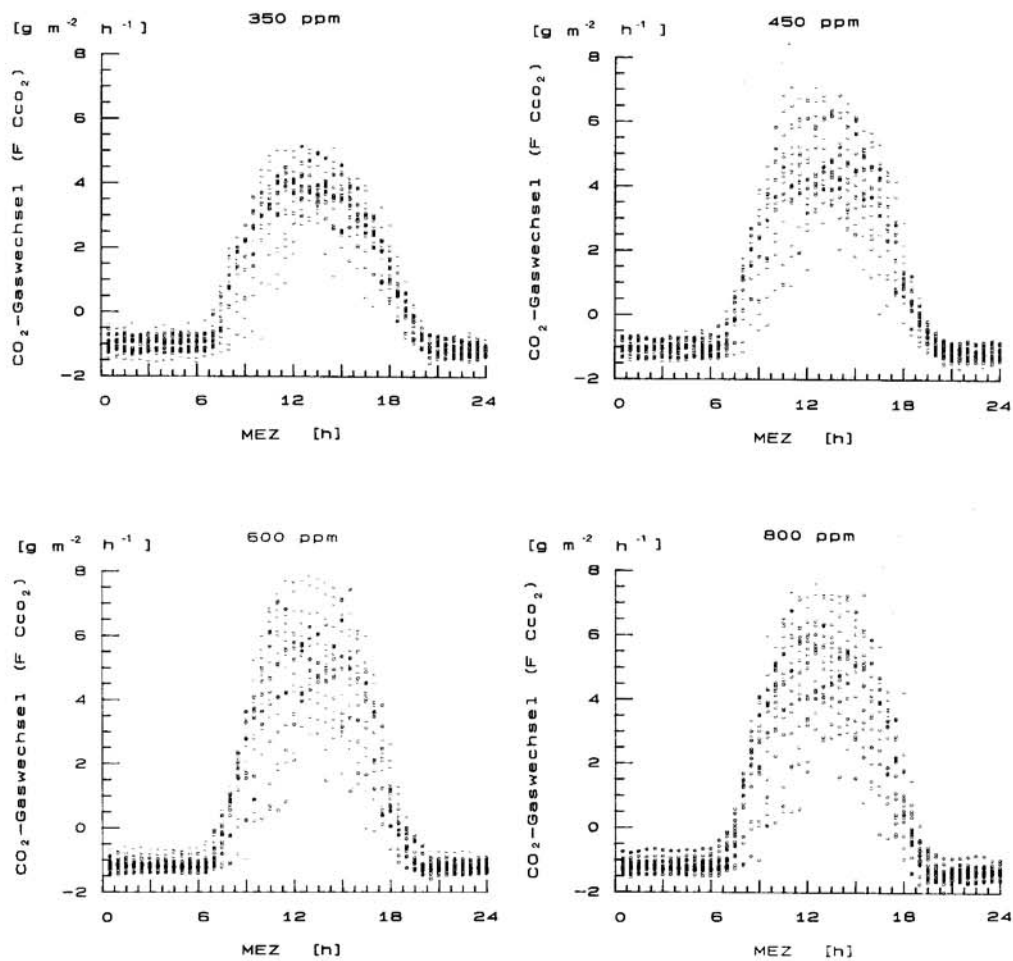


Abb. 2: Tagesgänge des CO₂-Gaswechsel (Halbstundemittelwerte) der Modell-Ökosysteme, Pflanzenbestände aus *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* (Mischung 1:1) und Boden, im Versuchszeitraum August bis September 1987 bei vier CO₂-Begasungsstufen (350, 450, 600 und 800 ppm CO₂) unter freilandnahen Bedingungen.

Differenz der CO₂-Fixierungsraten von 36 % bei 600 ppm gegenüber 350 ppm auf. Zu Beginn eines Strahlungstages lagen die Lichtkompensationspunkte der vier Pflanzenbestände auf etwa gleichem Niveau bei $103 \pm 12 \mu\text{einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Am Ende des Strahlungstages ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Lichtkompensationspunkten der Modell-Ökosysteme, die mit zunehmender Begasungsstufe höhere Werte erreichten. Die Temperaturen am Morgen lagen in dem Versuchszeitraum bei $13,0 \pm 3,0 \text{ }^\circ\text{C}$, während sie am Ende des Strahlungstages bei $21,0 \pm 4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ lagen.

Die nächtlichen Respirationsraten der Modell-Ökosysteme (Pflanzen + Boden) waren bei den Begasungsstufen von 600 und 800 ppm gegenüber 350 und 450 ppm signifikant erhöht. Sie lagen bei 1,1 (600 ppm) und 1,2 (800 ppm) gegenüber 1,0 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (350 und 450 ppm); entsprechen also einer Steigerung von 10 % bzw. 20 %.

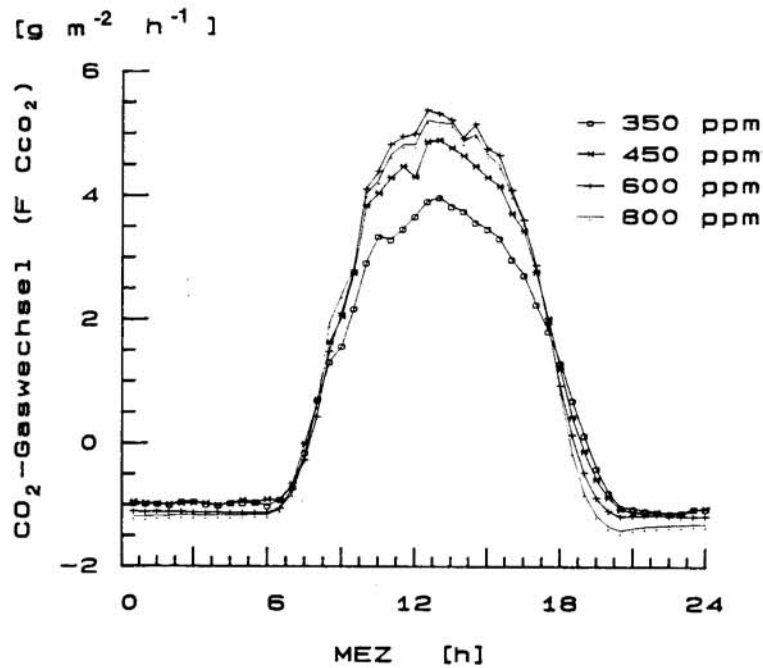


Abb. 3: Mittlere Tagesgangkurven der CO_2 -Gaswechselraten der Modell-Ökosysteme, Pflanzenbestände aus *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* (Mischung 1:1) und Boden, bei vier CO_2 -Begasungsstufen (350, 450, 600 und 800 ppm) unter freilandnahen Bedingungen.

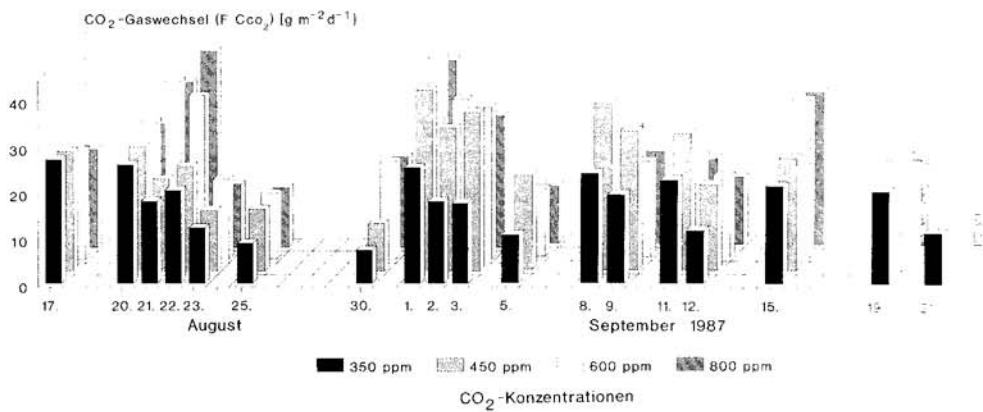


Abb. 4: Tagesbilanzen der CO_2 -Gaswechselraten ($F C_{\text{CO}_2}$) der Pflanzenbestände aus *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* (Mischung 1:1) und Boden, bei vier CO_2 -Begasungsstufen (350, 450, 600 und 800 ppm) im Versuchszeitraum August bis September 1987 unter freilandnahen Bedingungen.

Tagesbilanzen

Aus den Halbstundenmittelwerten des CO₂-Gaswechsels wurden die Tagesbilanzen der Pflanzenbestände bei den jeweiligen Begasungsstufen berechnet (Abb. 4). Im Versuchszeitraum August bis September 1987 lagen die mittleren Tagesbilanzen bei 18,0 g CO₂ m⁻² d⁻¹ (350 ppm) und waren jeweils signifikant bei 450 ppm auf 24,5, bei 600 ppm auf 26,3 und bei 800 ppm auf 23,8 g CO₂ m⁻² d⁻¹ gesteigert. Relativ zu den Ergebnissen bei 350 ppm entsprach dieses einer Steigerung von 36 % bei 450 ppm, von 46 % bei 600 ppm und von 32 % bei 800 ppm CO₂ in der Umgebungsluft (Abb. 5).

Wasserverbrauch

Die von den Modell-Ökosystemen abgegebenen absoluten Wassermengen waren gegenüber der Kontrolle (350 ppm) bei der Pflanzengemeinschaft unter 450 ppm um 10 % erniedrigt. Mit steigender CO₂-Konzentration glichen sich die Werte denen der Kontrolle immer mehr an. So lagen sie für 600 ppm um 6 % niedriger und bei 800 ppm auf dem gleichen Niveau.

Die Evapotranspirationsraten [g H₂O m⁻²] der Pflanzenbestände wurden gegen den Gaswechsel [g CO₂ m⁻²] bei den jeweiligen Begasungsstufen aufgetragen (Abb. 6). Bei allen CO₂-Stufen waren die Größen miteinander korreliert ($r > 0,8$). Die in einer linearen Regressionsanalyse gefundenen Steigungen nahmen in der Tendenz mit steigendem CO₂-Angebot ab.

Die Werte der Wasserverbrauchs-Effizienzen (water use efficiency: WUE) variierten an den verschiedenen Meßtagen (Abb. 7). Die mittleren Werte der WUE betragen 6,4 bei 350 ppm, 9,4 bei 450 ppm, 9,1 bei 600 ppm und $7,9 \cdot 10^{-3}$ bei 800 ppm (vgl. Tab. 3). Relativ zu den Ergebnissen bei 350 ppm entsprach dieses einer Steigerung von 47 % bei 450 ppm, von 41 % bei 600 ppm und nur 23 % bei 800 ppm (Abb. 5).

4. DISKUSSION

CO₂-Gaswechsel

Der CO₂-Gaswechsel der Vegetationseinheiten war deutlich durch eine Anhebung des CO₂-Konzentrationsniveau gesteigert. Die größten Differenzen traten bei den höchsten Strahlungsintensitäten auf, wie bei MOSS et al. (1961) beschrieben. JONES et al. (1985) bestimmten an einem Bestand von *Glyceria maxima* bei 800 ppm eine mittägliche Steigerung der CO₂-Fixierungsrate auf 87 % gegenüber einer Konzentration von 330 ppm CO₂ bei Photonenfußdichten von etwa $1300 \mu\text{einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In unserem Versuch waren die $F_{\text{CO}_2\text{max}}$ -Werte des gesamten Pflanzenbestandes bei $1088 \mu\text{einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$ um 41 % gesteigert. Überraschend war, daß die CO₂-Fixierungsrate des Pflanzenbestandes bei 800 ppm im Tagesgang nicht gegenüber denen bei 600 ppm gesteigert waren, auch nicht bei den maximal auftretenden Strahlungsintensitäten von $1088 \mu\text{einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Es wäre zu erwarten, daß bei höheren Strahlungsintensitäten höhere Gaswechselraten bei 800 ppm im Vergleich zu 600 ppm auftreten.

Die Respirationsraten des Modell-Ökosystems waren bei 800 ppm während der Nacht deutlich größer als in der Kontrolle und im Vergleich zu 600 ppm um 10 % erhöht. Zu entsprechenden Ergebnissen kamen OVERDIECK und BOSSEMEYER (1985). NIJS (1989) stellte bei Monokulturen von *Trifolium repens* und *Lolium perenne* eine erhöhte Dunkelatmung von 9 bis 40 % bzw. 4 bis 28 % fest. Die erhöhten Atmungsrate waren auf die mit steigender CO₂-Konzentration vermehrte Phytomassenakkumulation in dem System zurückzuführen (OVERDIECK und FORSTREÜTER 1987). Diese müssen zunächst durch die Photosyntheseleistung der Pflanzen am Tage kompensiert werden. Der Pflanzenbestand bei 800 ppm, dessen Atmungsrate im Dunkeln um 20 % gegenüber der Kontrolle (350 ppm) gesteigert war, konnte bei den aufgetretenen Strahlungsintensitäten im Vergleich zu dem 600 ppm-System keine höhere CO₂-Fixierungsrate erzielen.

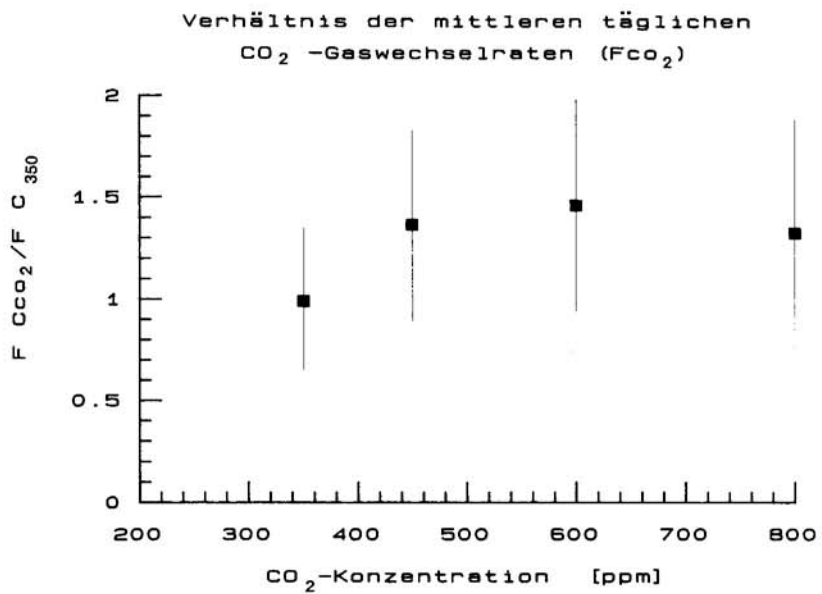
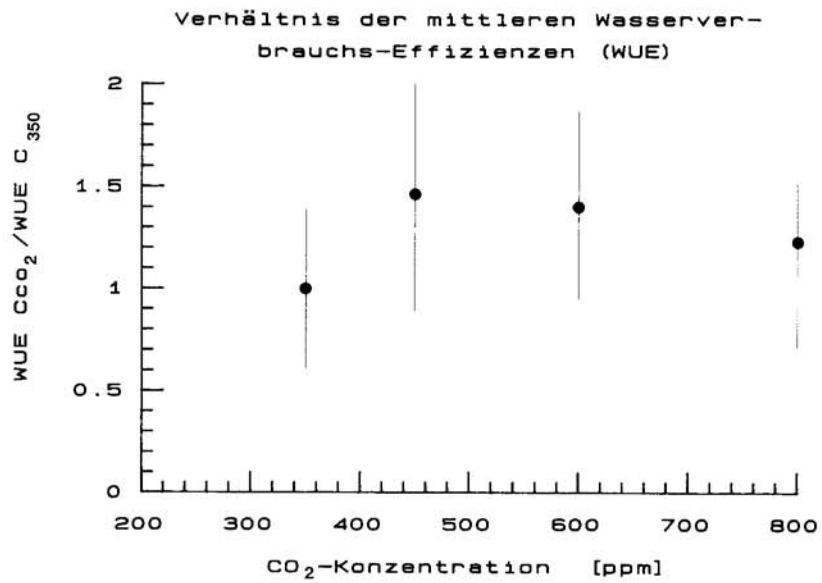


Abb. 5: Verlauf der relativen Steigerungsraten des CO₂-Gaswechsels (unten) und der Wasserverbrauchs-Effizienzen (WUE, oben) bei den verschiedenen CO₂-Begasungsstufen 350, 450, 600 und 800 ppm. Die jeweiligen Werte wurden mit denen bei 350 ppm in der Umgebungsluft ins Verhältnis gesetzt.

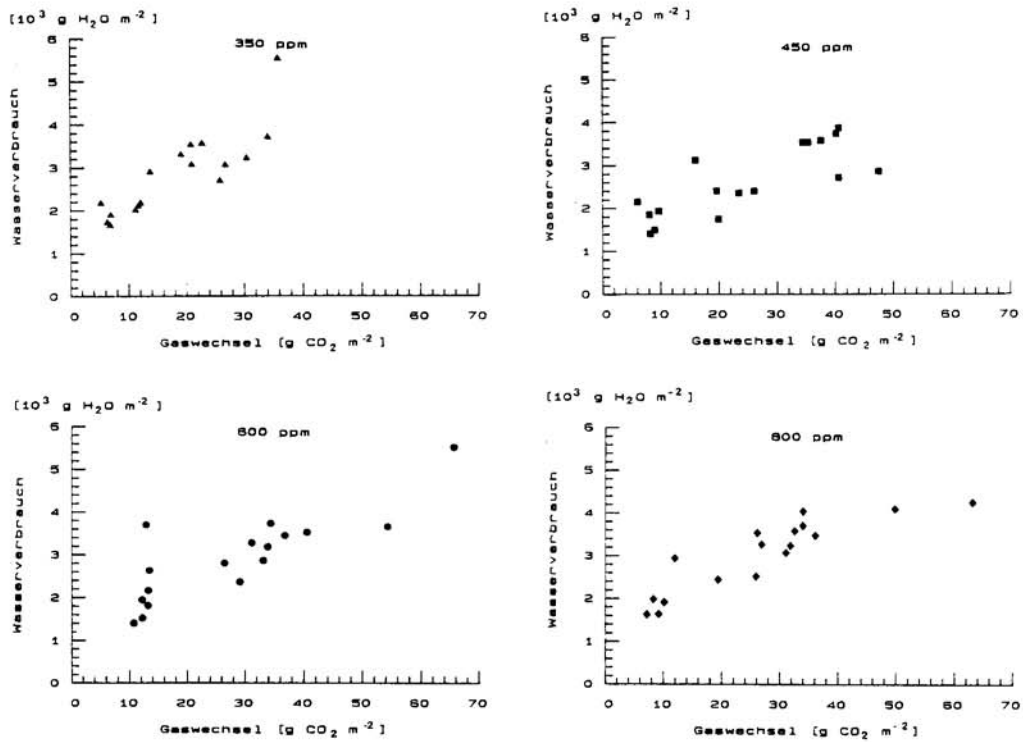


Abb. 6: Der Wasserverbrauch gegenüber den CO_2 -Gaswechselraten der Modell-Ökosysteme, aus *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* (Mischung 1:1) und Boden, bei vier CO_2 -Begasungsstufen (350, 450, 600 und 800 ppm) im Versuchszeitraum August bis September 1987 unter freilandnahen Bedingungen.

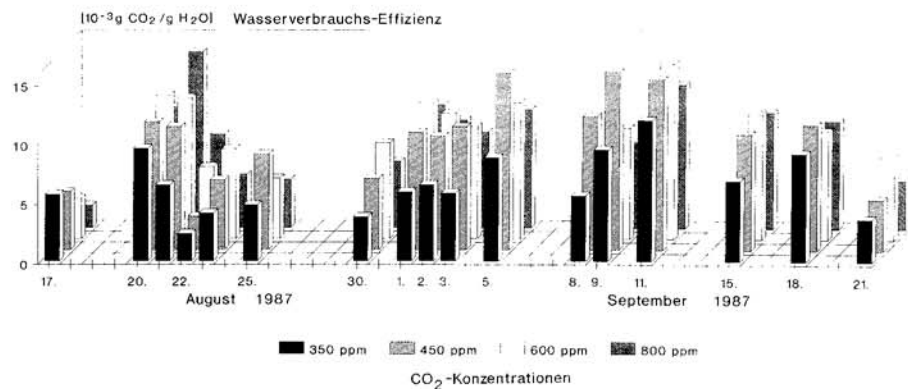


Abb. 7: Werte der Wasserverbrauchs-Effizienz (WUE) der Modell-Ökosysteme, aus *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* (Mischung 1:1), und Boden, bei vier CO_2 -Begasungsstufen (350, 450, 600 und 800 ppm) im Versuchszeitraum August bis September 1987 unter freilandnahen Bedingungen.

Tab. 3: Mittlere Werte der maximalen CO₂-Fixierungsraten (F_{C_{CO₂} max), der Tagesbilanzen (F_{C_{CO₂}}) und der Wasserverbrauchs-Effizienzen (WUE) ganzer Pflanzenbestände aus *Trifolium pratense* und *Festuca pratensis* (Mischung 1:1) bei den verschiedenen CO₂-Konzentrationen.}

CO ₂ - Konzentration	F _{C_{CO₂} max}	F _{C_{CO₂}}	WUE 10 ⁻³
	[g m ⁻² h ⁻¹]	[g m ⁻² d ⁻¹]	[g CO ₂ /g H ₂ O]
350 ppm	4.42 ±0.49	18.0 ±6.3	6.4 ±2.6
450 ppm	5.58 ±0.98	24.5 ±8.6	9.4 ±3.8
600 ppm	6.34 ±0.98	26.3 ±9.5	9.1 ±2.9
800 ppm	6.19 ±0.93	23.8 ±10.1	7.9 ±3.3

Über den gesamten Versuchszeitraum schwankten die Halbstundenmittelwerte der CO₂-Fixierungsraten am Tage stärker. Dies war sicherlich auf die im Vergleich zu dem Pflanzenbestand bei 350 ppm erhöhte Dunkelatmungsrate zurückzuführen. An Tagen, bei denen kurzfristige Abnahmen der Lichtintensitäten durch z.B. Wolken auftraten, waren die CO₂-Fixierungsraten der Pflanzenbestände stark vermindert. Die Temperaturen in den Pflanzenbeständen, die im wesentlichen die Atmungsraten beeinflussen, blieben aber annähernd auf dem gleichen Niveau. Die Lichtkompensationspunkte der Pflanzenbestände lagen am Morgen für alle Begasungsstufen auf dem gleichen Niveau ($103 \pm 12 \mu\text{einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und waren am Abend mit steigendem CO₂-Niveau verschieden. Dieses kann ebenfalls auf einen Temperatureffekt zurückgeführt werden. Die Temperaturen waren am Abend durchschnittlich um 8,0 °C höher.

Die gemittelten Tagesgangkurven des CO₂-Gaswechsels der Pflanzenbestände bei 350 ppm und 600 ppm CO₂ stimmten weitgehend überein mit den von NIJS (1989) ermittelten Kurven. Aus Messungen an einer Monokultur von *Lolium perenne* wurde ein mittlerer Tagesgang im Juni unter zu Hilfenahme eines Modells von ACOCK (1978) für die beiden Begasungsstufen simuliert.

Im Vergleich dazu lagen die höchsten Gaswechselwerte bei 350 ppm bei 4,2 (simuliert) gegenüber 4,0 g CO₂ m⁻² h⁻¹ und für 600 ppm bei 5,8 (simuliert) gegenüber 5,4 g CO₂ m⁻² h⁻¹ und bestätigten die gemessene Steigerungsrate von 36 % (38 % simuliert) bei einer Erhöhung der CO₂-Konzentration auf 600 ppm.

Tagesbilanzen

Die Steigerung der Tagesbilanzen des CO₂-Gaswechsels bei 800 ppm auf nur 32 % gegenüber der Kontrolle (350 ppm) war auf die im Versuchszeitraum niedrigen Photonenflußdichten (PhAR) zurückzuführen. JONES et al. (1985) fanden bei Beständen von *Glyceria maxima* eine Zunahme der Tagesbilanzwerte von 87 %. Diese wurden bei strahlungsintensiven Tagen (28 einstein m⁻² d⁻¹) gemessen, während im gesamten Versuchszeitraum mittlere Werte von 17,4 einstein m⁻² d⁻¹ erreicht wurden.

Die Messungen an einer Monokultur von *Trifolium repens* (NIJS et al. 1989) von April und Mai bestätigten die in unserem Versuch erzielten Ergebnisse der Tagesbilanzen von 18,0 und 26,3 g CO₂ m⁻² d⁻¹ bei 350 ppm und 600 ppm. Sie lagen dort bei 16,6 (350 ppm) und 27,8 g CO₂ m⁻² d⁻¹ (600 ppm). OVERDIECK und BOSSEMEYER (1985) ermittelten an einer Mischkultur von *Trifolium repens* und *Lolium perenne* bei 600 ppm eine durchschnittliche Zunahme der Bilanzwerte auf 50 %. Messungen an gleichen Pflanzenbeständen (OVERDIECK

und FORSTREUTER 1987) ergaben eine Steigerung um 60 %. Die Tageswerte des Pflanzenbestandes bei 450 ppm lag bereits auf dem Niveau von 800 ppm ($24,5 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Wasserverbrauch

Messungen der Transpiration an einzelnen Pflanzen oder Blättern verschiedener Arten bei steigenden CO_2 -Konzentrationen zeigten, daß die Transpiration erniedrigt und die Netto-Assimilationsraten gleichzeitig gesteigert wurden (BIERHUIZEN 1965, ROSENBERG 1981, OVERDIECK 1989). CARLSON (1980) gibt eine Transpirationsverminderung von 52 % bei krautigen Arten an. Nach KIMBALL und IDSO (1983) ist sie um durchschnittlich 34 % reduziert bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration.

Im vorliegenden Versuch wurde der Wasserverbrauch (die Evapotranspiration) der Modell-Ökosysteme bezogen auf die Grundfläche bei einer CO_2 -Konzentration von 450 ppm um 10 % gegenüber der Kontrolle (350 ppm) gesenkt. Mit steigender CO_2 -Konzentration lagen die Wasserverbrauchswerte wieder auf dem Niveau der Kontrolle. Die Ersparnis lag bei 600 ppm bei 6 %, während bei 800 ppm kein Unterschied festzustellen war.

Dieses bedeutet, daß Pflanzenbestände bei einer leichten Anhebung der CO_2 -Konzentration auf 450 ppm weniger Wasser an die Atmosphäre abgeben und somit der Bodenwasservorrat über einen längeren Zeitraum in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Arten könnten somit dort wachsen, wo es vorher für sie zu trocken war (DOWNTON et al. 1980).

Andererseits hätte eine gleichzeitige Erhöhung der durchschnittlichen Temperaturen wiederum eine Zunahme der Evapotranspirationsraten zur Folge. NIJS (1989) konnte eine 9 % höhere Evapotranspiration bei Monokulturen von *Trifolium repens* bei 600 ppm feststellen. JONES et al. (1985) fanden keine Änderungen des Wasserverbrauchs von Beständen der Sojabohne bei 800 ppm.

Aufgrund der erniedrigten Evapotranspiration und der deutlich gesteigerten CO_2 -Gaswechsellraten bei CO_2 -Anreicherung in der Umgebungsluft zeigten sich Steigerungen der Wasserverbrauch-Effizienz (WUE) von maximal 47 % bei Anhebung der CO_2 -Konzentration auf 450 ppm, 42 % bei 600 ppm und 23 % bei 800 ppm. Dies entsprach etwa der von JONES et al. (1985) bei Beständen der Sojabohne bei 800 ppm CO_2 ermittelten Steigerung von 24 %. Monokulturen von *Trifolium repens* bei 600 ppm zeigten eine Zunahme der WUE um 35 % und 53 % (zwei Versuchsansätze) und bei Monokulturen von *Lolium perenne* eine Steigerung um 25 % (NIJS 1989).

Eine Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration auf etwa 450 ppm würde den Wasserhaushalt ganzer Pflanzenbestände und Vegetationseinheiten im größeren Maße beeinflussen, als eine Erhöhung auf 600 ppm CO_2 .

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Axel Tschuschke und Herrn Ralf Stänner, die am Aufbau und der Durchführung des Experimentes wesentlich beteiligt waren. Die elektronischen Regeleinheiten sowie die Analog-Digital-Wandler zur automatischen Datenerfassung wurden in Zusammenarbeit mit der Elektronik-Werkstatt der Universität Osnabrück, insbesondere Herrn Dipl.-Phys. Dirk Rathmann, entwickelt und gebaut.

LITERATUR

- ACOCK B., ALLEN L.H.Jr., 1985: Crop responses to elevated carbon dioxide concentrations. - In: STRAIN, B., CURE, J.D. (eds.): Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. Durham, N.C., US DOE/ER-0238.
- ACOCK B., CHARLES-EDWARDS D.A., FITTER D.J., HAND D.W., LUDWIG L.J., WARREN WILSON J., WITHERS A.C., 1978: The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy photosynthesis: an experimental examination of two canopy models. - J. Exp. Bot. 29: 815-827.
- BAZZAZ F.A., CARLSON R.W., 1984: The response of plants to elevated CO_2 . I. Competition among an assemblage of annuals at two levels of soil moisture. - Oecologia 62: 196-198.

- BIERHUIZEN J.F., SLATYER R.O., 1965: Effects of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration photosynthesis relationships of cotton leaves. - Agric. Meteorol. 2: 259-270.
- CARLSON R.W., BAZZAZ F.A., 1980: The effects of elevated carbon dioxide concentrations on growth, photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of plants. Environmental and climatic impact of coal utilization. - J.J. SINGH and A. DEEPAK (eds.). Academic Press, New York: 609-622.
- DEUTCHER WETTERDIENST, 1979: Aspirations-Psychrometer-Tafeln. - 6. durchgesehene und erweiterte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden: 5.
- DOWNTON W.J., BJÖRKMANN O., PIKE C.S., 1980: Consequences of increased atmospheric concentrations of carbon dioxide for growth and photosynthesis of higher plants. - In: PEARMAN, G.I. (ed.), Carbon dioxide and climate: Australian Research, Aust. Acad. Sci., Canberra, Australia: 143-151.
- EGLI D.B., PENDLETON J.W., PETERS D.B., 1970: Photosynthetic rate of three soybean communities as related to carbon dioxide levels and solar radiation. - Agr. J. 62: 411-414.
- GOUDRIAAN J., VAN LAAR H.H., 1978: Relations between leaf resistance, CO₂ concentration and CO₂ assimilation in maize, beans, lalang grass and sunflower. - Photosynthetica 12: 241-249.
- HILBERT D.W., PUDHOMME T.I., OECHEL W.C., 1987: Response of tussock tundra to elevated carbon dioxide regimes: Analysis of ecosystem CO₂ flux through nonlinear modelling. - Oecologia 72: 466-472.
- JONES P., ALLEN L.H. Jr., JONES J.W., VALLE R., 1985: Photosynthesis and transpiration responses of soybean canopies to short and long term CO₂ treatments. - Agr. J. 77: 119-126.
- KEELING C.D., 1985: Concentration of atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory, Hawaii. - In: WHITE, M.R. (ed.): Characterization of information requirements for studies of CO₂ effects: Water resources, agriculture, fisheries, forests and human health. US DOE/ER-0236, p 11.
- KIMBALL B.A., IDSO S.B., 1983: Increasing atmospheric CO₂: Effects on crop yield, water use, and climate. - Agric. Water Management 7: 55-72.
- KIMBALL B.A., 1983: Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 770 prior observations. - WCL Report 14, U.S. Dept. of Agric., Agric. Res. Serv., 71 pp.
- KIMBALL B.A., 1983: Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. - Agron. J. 75: 779-788.
- MORISON J.I.L., GIFFORD R.M., 1983: Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity. - Plant Physiology 71: 789-796.
- MORISON J.I.L., GIFFORD R.M., 1984: Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentration. II. Plant dry weight, partitioning and water use efficiency. - Australian Journal of Plant Physiology 11: 375-384.
- MOSS D.N., MUSGRAVE R.B., LEMON E.R., 1961: Photosynthesis under field conditions. III. Some effects of light, carbon dioxide, temperature, and soil moisture on photosynthesis, respiration, and transpiration of corn. - Crop Science 1: 83-87.
- NIJS I., 1989: De langetermijn impact van een verhoogd CO₂-gehalte in de atmosfeer op planten. - Dissertation, Departement Biologie, Universiteit Antwerpen.
- NIJS I., IMPENS I., BEHAEGHE T., 1989: Effects of different CO₂ environments on the photosynthesis-yield relationship and the carbon and water balance of a white clover (*Trifolium repens* L. cv. *Blanca*) sward. - J. Exp. Bot. 40: 353-359.
- OVERDIECK D., 1989: The effects of preindustrial and predicted future atmospheric CO₂ concentration on *Lyonia mariana* L. D. Don. - Functional Ecology 3: 353-359.
- OVERDIECK D., 1991: Direkte Wirkungen der atmosphärischen CO₂-Anreicherung auf die einheimische Vegetation (Pflanzengemeinschaften des Grünlandes und der Wälder). - Verh. Ges. Ökol. (Osnabrück) XIX/III: 243-263.
- OVERDIECK D., BOSSEMEYER D., 1985: Langzeit-Effekte eines erhöhten CO₂-Angebotes auf den CO₂-Gaswechsel eines Modell-Ökosystems. - Angewandte Botanik 59: 179-198.
- OVERDIECK D., FORSTREUTER M., 1987: Langzeit-Effekte eines erhöhten CO₂-Angebotes bei Rotklee- Wiesenschwingelgemeinschaften. - Verh. Ges. Ökol. (Gießen 1986) XVI: 197-206.

- OVERDIECK D., BOSSEMAYER D., LIETH H., 1984: Long term effects of an increased CO₂ concentration level on terrestrial plants in model-ecosystem. I. Phytomass production and competition of *Trifolium repens L.* and *Lolium perenne L.* - Progress in Biometeorology 3: 344-352.
- PALLAS J.E. Jr., 1965: Transpiration and stomatal opening with changes in carbon dioxide content of the air. - Science 147: 171-173.
- REGEHR D.L., BAZZAZ F.A., BOGGESS W.R., 1975: Photosynthesis, transpiration and leaf conductance of *Populus deltoides* in relation to flooding and drought. - Photosynthetica 9: 52-61.
- ROSENBERG N.J., 1981: The increasing CO₂ concentration in the atmosphere and its implication on agricultural productivity. I. Effects on photosynthesis, transpiration and water use efficiency. - Climatic Change 3: 265-279.
- STRAIN B.R., CURE J.D. (eds.), 1985: Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. - Durham, N.C., US DOE/ER-0238, 286 pp.
- TRABALKA J.R. (ed.), 1985: Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle. - Oak Ridge National Laboratory, Oake Ridge, TN. US DOE/ER-0239, 315 pp.

ADRESSE

Dipl.-Biol. Manfred Forstreuter
Technische Universität Berlin
FB 14, Institut für Ökologie
Ökologie der Gehölze
Königin-Luise-Str. 22
D-1000 Berlin 33