

ABGABE VON BODENBÜRTIGEM LACHGAS ÜBER PFLANZEN

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der
Agrarwissenschaften

vorgelegt der
Fakultät Agrarwissenschaften
der Universität Hohenheim

von

Norbert-Jakob Ferch

aus Singen (Htwl.)

2003

Ferch, Norbert-Jakob:
Abgabe von bodenbürtigem Lachgas über Pflanzen.

Dissertation Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenernährung, 2003

Von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. sc. agr.) am 17.07.2002 angenommene Dissertation.

Tag der mündlichen Prüfung: 11.02.2003

Berichterstatter, 1. Prüfer: Prof. Dr. V. Römheld

Mitberichterstatter, 2. Prüfer: Prof. Dr. W. Claupein

3. Prüfer: Prof. Dr. Drs. h.c. J. Zeddies

Prodekan: Prof. Dr. K. Stahr

Norbert-Jakob Ferch
Sauerbruchstr. 13, 78224 Singen, Deutschland
E-Mail: norferch@web.de

INHALTSVERZEICHNIS

Kapitel 1.

Einführung

1.1	Allgemeiner Überblick	1
1.2	Lachgaskonzentrationen und dazugehörige Einheiten	6
1.2.1	Lachgas als Teil eines Gasgemisches	6
1.2.2	Lachgas in Flüssigkeiten	6
1.3	Ziele der vorliegenden Arbeit	8

Kapitel 2.

Methodische Vorarbeiten

2.1	Einleitung	10
2.2	Methoden zur Lachgasmessung	16
2.2.1	Probengewinnung über Molekularsiebe	17
2.2.2	Probengewinnung über Vakutainer	19
2.2.3	Direkte Messung mit spektroskopischen Verfahren: NDIR und Photoakustik	21
2.3	Vergleich der photoakustischen Messung mit der Gaschromatographie	24
2.3.1	Methodik der Vergleichsmessungen	24
2.3.2	Ergebnis der Vergleichsmessungen	25
2.4	Überprüfung der Kompensation für Wasserdampf	27
2.5	Auswahl des Nährmediums	34
2.6	Aus den Vorversuchen resultierende Anforderungen an die Methodik	36

Kapitel 3.

Allgemeine Methodik

3.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	39
3.2	Versuchsdurchführung	44
3.3	Statistik	48

Kapitel 4.

Experimente mit Sonnenblume ohne definiertes Luftkissen im Wurzelraum

4.1	Zusammenfassung	49
4.2	Einleitung	50
4.3	Material und Methoden	50
4.4	Ergebnisse	53
4.5	Diskussion und Schlussfolgerungen	60

Kapitel 5.

Experimente mit Sonnenblume: Vergleich mit und ohne Luftkissen

5.1	Zusammenfassung	66
5.2	Einleitung	68
5.3	Material und Methoden	69
5.4	Ergebnisse	72

5.5	Diskussion und Schlussfolgerungen	83
Kapitel 6.		
Experimente mit Gerste		
6.1	Zusammenfassung	89
6.2	Einleitung	90
6.3	Material und Methoden	91
6.4	Ergebnisse	97
6.5	Diskussion und Schlussfolgerungen	106
Kapitel 7.		
Experimente mit Mais		
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Einleitung	114
7.3	Material und Methoden	115
7.4	Ergebnisse	120
7.4.1	Versuche ohne Luftkissen im Wurzelraum	120
7.4.2	Versuche mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum	136
7.5	Diskussion und Schlussfolgerungen	150
Kapitel 8.		
Experimente mit Reis		
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Einleitung	156
8.3	Material und Methoden	157
8.4	Ergebnisse	161
8.4.1	Versuche ohne Luftkissen im Wurzelraum	161
8.4.2	Versuche mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum	166
8.5	Diskussion und Schlussfolgerungen	176
Kapitel 9.		
	Synopsis	186
	Zusammenfassung	193
	Abstract	196
	Literaturverzeichnis	199

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Nummer</i>	<i>Seite</i>
Abb. 1.1: Verlauf der ambienten Lachgaskonzentration gemessen in Hohenheim in einer Höhe von 50 cm über dem Boden. In unmittelbarer Nähe der Messstelle verläuft eine Strasse.	2
Abb. 1.2: Darstellung des Stickstoffkreislaufs in Biosphäre, Pedosphäre und Atmosphäre mit den dazugehörigen vereinfachten Umsetzungsprozessen (HACK, 1999).....	4
Abb. 2.1.1: Schematischer Aufbau eines geschlossenen Systems und eines Systems mit kontrollierter Luftzufuhr. Die Pfeile zeigen einen Austausch des Mediums und die Richtung des Austausches an.	10
Abb. 2.1.2: Verlauf der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Belüftungsintensität im diurnalen Verlauf. Versuchspflanze war Sonnenblume in einem kontrolliert offenen System. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte, zu denen die Belüftungsintensitäten geändert wurden.....	12
Abb. 2.1.3: Vermutlich durch zu hohe Luftfeuchtigkeit am Hypokotyl von Sonnenblume (Sorte Frankasol) hervorgerufene Schäden.....	12
Abb. 2.1.4: Verlauf der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von kurzzeitigem, vollkommenen Kammerschluss und der Belüftungsintensität. Versuchspflanze war Reis.....	14
Abb. 2.1.5: Vergleich der Temperaturverläufe unter einer Acrylglasabdeckung, der simulierten Oberflächentemperatur eines darunter befindlichen Blattes und der Temperatur der Außenluft in Abhängigkeit von der Belüftungsintensität. Versuchspflanze war Sonnenblume.	15
Abb. 2.2.2.1: Gasdicht verschlossenes Versuchsgefäß mit Acrylglashaube und Doppelkanüle zur Entnahme von Gasproben mit Vakutainern.	20
Abb. 2.3.1.1: Versuchsaufbau zur Durchführung der Vergleichsmessungen zwischen Gaschromatographie und Photoakustik.	24
Abb. 2.3.2.1: Ergebnisse der Vergleichsmessungen für N₂O zwischen dem im Institut für Pflanzenernährung (Inst. 330) für Lachgasmessungen verwendeten Gaschromatographen und dem Multigasmonitor 1312 der Firma <i>Innova AirTech Instruments</i> (Dänemark).....	25
Abb. 2.3.2.2: Ergebnisse der Vergleichsmessungen für CH₄ zwischen dem im Institut für Pflanzenernährung (Inst. 330) für CH₄-Messungen verwendeten Gaschromatographen und dem Multigasmonitor 1312 der Firma <i>Innova AirTech Instruments</i> (Dänemark).....	26
Abb. 2.4.1: Versuchsaufbau zur Durchführung der Messungen zur Prüfung der Feuchtigkeitskompensation.....	27

Abb. 2.4.2: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.	28
Abb. 2.4.3: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.	29
Abb. 2.4.4: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch mit dem Gaschromatographen und einem photoakustischen Messgerät. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.	30
Abb. 2.4.5: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von CO₂ in einem Gasgemisch. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.	31
Abb. 2.4.6: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch im Vergleich zu den Zertifikatsangaben des verwendeten Kalibrationsgases. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.	31
Abb. 2.6.1: Vergleich der Lachgaskonzentrationen in der Außenluft und unter einer pflanzenbewachsenen Acrylglasabdeckung bei vollkommenem Kammerschluss und mit kontinuierlicher Belüftung. Versuchspflanze Reis (<i>Oryza sativa</i> L. cv. 94D-22).	36
Abb. 3.1.1: Schematische Darstellung des kontrolliert offenen Systems. Die Pfeile zeigen die Richtung der Luft- bzw. Flüssigkeitsströme an.	39
Abb. 3.1.2: Ansicht eines aufgebauten Kultursystems (a.) und daraus vergrößerte Ansicht des durch die Mittelplatte vermittelten Übergangs von Wurzel- zu Sprosskompartiment (b.).	40
Abb. 3.1.3: Ansicht der Oberseite der Mittelplatte (a.) und daraus vergrößert der innen liegende O-Ring (b.) zur Abdichtung des Sprosskompartiments. Ansicht der Unterseite der Mittelplatte (c.) und daraus vergrößert der außen liegende O-Ring (d.) zur Abdichtung des Wurzelkompartiments.	40
Abb. 3.1.4: Außenansicht des Wurzelkompartiments (a.), Innenansicht des Wurzelkompartiments (b.) und Ansicht des Sprosskompartiments (c.)	41
Abb. 3.1.5: Mechanische Durchflussmesser (Flowmeter) mit Schwebkörper (<i>Fischer & Porter</i>). Oben die Verstellechraube. Der eingestellte Fluss wird von den Schwebkörpern (Kugel) angezeigt und an der Skala abgelesen.	42
Abb. 3.2.1: In Quarzsand zur Keimung gebrachte Sonnenblumen (a.) und Reis (b.).	44
Abb. 3.2.2: In die Mittelplatte eingebrachte Sonnenblumenkeimlinge (a.), die sofort abgedeckt wurden (b.).	45

Abb. 3.2.3: Messgerät mit Messstellenumschalter.....	45
Abb. 3.2.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Simulation von luftgefülltem Porenraum im Gegensatz zu luftfreiem Wurzelraum. Die Pfeile zeigen die Richtung der Luft- bzw. Flüssigkeitsströme an.....	47
Abb. 4.3.1: Mittelplatte mit fünf abgedichteten Sonnenblumenpflanzen zum Versuchszeitpunkt. Auf Grund des sekundären Dickenwachstums hatten sich die Pflanzen größtenteils schon selbst abgedichtet.....	51
Abb. 4.3.2: Vorder- und Hinteransicht des Versuchsaufbaus in der Klimakammer während des Versuchs mit Sonnenblumen.....	51
Abb. 4.3.3: Pflanzen (Sonnenblume) zum Versuchszeitpunkt.....	52
Abb. 4.4.1: Gemessene Transpirationsraten Tag/Nacht ohne Bezug zu einer anderen Größe; es sind die Messungen jedes einzelnen Gefäßes dargestellt (Versuchspflanze Sonnenblume).....	53
Abb. 4.4.2.: Transpirationsraten Tag/Nacht. Bezugsgröße Trockengewicht; es sind die Messungen jedes einzelnen Gefäßes dargestellt (Versuchspflanze Sonnenblume).....	54
Abb. 4.4.3: Darstellung der unbereinigten gemessenen Lachgasemissionen und der ambienten Lachgaskonzentration (Versuchspflanze Sonnenblume).....	55
Abb. 4.4.4: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten absoluten Lachgasemissionen (Versuchspflanze Sonnenblume).....	56
Abb. 4.4.5: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten und auf die jeweiligen Trockengewichte bezogenen absoluten Lachgasemissionen. Zur besseren Übersicht zeigt jede Grafik ein einander zugeordnetes Gefäßpaar (Versuchspflanze Sonnenblume).....	57
Abb. 4.4.6: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten und auf die jeweiligen Trockengewichte bezogenen absoluten Lachgasemissionen. Die Grafik zeigt alle einander zugeordneten Gefäßpaare und den Verlauf der Lachgaskonzentration im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (Versuchspflanze Sonnenblume).....	58
Abb. 4.4.7: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten absoluten Lachgasemissionen bezogen auf ein Gramm transpiriertes Wasser (Versuchspflanze Sonnenblume).....	59
Abb. 4.5.1: Repräsentative Quer- und Längsschnitte durch Sonnenblumenwurzeln. ..	63
Abb. 5.4.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen aller Einzelgefäße während des gesamten Versuchszeitraums und Verlauf der Lachgaskonzentration in den Proben zur Erfassung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft. Die Pfeile geben die Zeitpunkte an, zu denen Veränderungen bei der Gasmessung vorgenommen wurden (Versuchspflanze Sonnenblume).....	72
Abb. 5.4.2: Absolute Lachgasemissionen aller Einzelgefäße während des gesamten Versuchszeitraums. Die Pfeile geben die Zeitpunkte an, zu denen Veränderungen bei der Gasmessung vorgenommen wurden. Als Gerade und auf der rechten	

- Seite skaliert ist der Verlauf der gemessenen Lachgaskonzentration im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes aufgetragen (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 75
- Abb. 5.4.3: Gemessene Transpirationsraten aller Gefäße für die aufgrund vorliegender Messungen darstellbaren Versuchszeiträume und Verlauf der Luftfeuchtigkeit in den Proben zur Erfassung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft. Zum Zeitpunkt 2 wurde der zur Probenlufttrocknung zwischen Messgerät und Messstellenumschalter eingebaute Naphionschlauch entfernt. Zum Zeitpunkt 3 wurde begonnen, die Proben zur Erfassung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft über einen Naphionschlauch zu befeuchten (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 76
- Abb. 5.4.4: Absolute Transpirationsraten aller Gefäße für den erfassten Versuchszeitraum (Versuchspflanze Sonnenblume). 77
- Abb. 5.4.5: Korrigierte Lachgasabgabe aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00 aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte. Korrekturfaktor $1,16769E-05$ (Versuchspflanze Sonnenblume). 78
- Abb. 5.4.6: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasabgabe aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Korrekturfaktor $6,38446E-06$ (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 78
- Abb. 5.4.7: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Korrekturfaktor $1,16769E^{-05}$ (Versuchspflanze Sonnenblume). 80
- Abb. 5.4.8: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Korrekturfaktor $6,38446E^{-06}$ (Versuchspflanze Sonnenblume). 80
- Abb. 5.4.9: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Es sind die Mittelwerte der jeweiligen Behandlungen, der Kontrolle und die jeweils dazugehörigen Standardfehler dargestellt. Korrekturfaktor $1,16769E^{-05}$ (Versuchspflanze Sonnenblume). 81
- Abb. 5.4.10: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Es sind die Mittelwerte der jeweiligen Behandlungen, der Kontrolle und die jeweils dazugehörigen Standardfehler dargestellt. Korrekturfaktor $6,38446E^{-06}$ (Versuchspflanze Sonnenblume). 82
- Abb. 6.3.1: Überblick des Versuchsaufbaus. Auf der linken Seite ist im Vordergrund das für die Lachgasanreicherung verwendete Ausgleichsgefäß zu sehen (Versuchspflanze Gerste)..... 91
- Abb. 6.3.2: Auswahl einiger zu unterschiedlichen Behandlungen gehöriger Versuchsgefäße. Die unterschiedliche Belegungsdichte, Bestockung und der unterschiedliche Vitalitätszustand sind deutlich zu sehen (Versuchspflanze Gerste). 92
- Abb. 6.3.3: Abdichtung der Gerstenpflanzen im Spross- (a. u. b.) und im Wurzelraum (Versuchspflanze Gerste)..... 93

Abb. 6.3.4: Entwicklung und Zustand der Wurzeln am Ende des Versuchszeitraums (Versuchspflanze Gerste).....	94
Abb. 6.4.1: Absolute Transpirationsrate aller Versuchsgefäße (Versuchspflanze Gerste).	97
Abb. 6.4.2: Absolute Lachgasabgabe aller auf Grund der diurnalen Transpiration als verwertbar erachteten Versuchsvarianten und der Kontrollen (Versuchspflanze Gerste).	99
Abb. 6.4.3: Darstellung der jeweils einander zugeordneten Wiederholungen zur besseren Identifikation der gasdichten Versuchsgefäße (Versuchspflanze Gerste).	101
Abb. 6.4.4: Absolute Lachgasabgabe der auf Grund der Auswertungen als dicht identifizierten Gefäße. Auf der rechten Skala ist der N₂O-Konzentrationsverlauf im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes abzulesen (Versuchspflanze Gerste).	102
Abb. 6.4.5: Absolute emittierte Lachgasmenge bezogen auf das transpierte Wasser (Versuchspflanze Gerste).....	104
Abb.7.3.1: Mit Mais bepflanzte Versuchsgefäße. Die Hauben wurden für Abdichtungsarbeiten am Spross abgenommen.....	115
Abb. 7.3.2: Im Sprosskompartiment mit unterschiedlichen Materialien abgedichtete Maispflanzen (a.). Wurzelsystem eines Versuchsgefäßes (b.). Durch das Wachstum der Maispflanzen in Mitleidenschaft gezogene Abdichtung (c.). Zerstörung der Abdichtung durch Adventivwurzeln bei Maispflanzen (d.).	116
Abb. 7.4.1.1: Transpirationsraten aller Versuchsgefäße. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Er ist durch die Messung der Lachgaskonzentration im Ausgleichsgefäß bedingt (Versuchspflanze Mais).	121
Abb. 7.4.1.2: Mittelwerte der Transpirationsraten mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).....	121
Abb. 7.4.1.3: Lachgasabgaberraten aller Versuchsgefäße pro Gefäß und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Linie ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).....	123
Abb. 7.4.1.4: Mittelwerte der Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser	

- einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 124
- Abb. 7.4.1.5: Lachgasabgabe bezogen auf die transpierte Wassermenge aller Versuchgefäße. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais)..... 125
- Abb. 7.4.1.6: Mittelwerte, der auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen und mit den nachfolgenden Ergebnissen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 126
- Abb. 7.4.1.7: Korrigierte Lachgasabgaberraten aller Versuchgefäße pro Gefäß und die gemessene Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration ist als Linie ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais)..... 127
- Abb. 7.4.1.8: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen und mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais)... 128
- Abb. 7.4.1.9: Korrigierte Lachgasabgabe bezogen auf die transpierte Wassermenge aller Versuchgefäße. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais)..... 129
- Abb. 7.4.1.10: Mittelwerte, der auf die transpierte Wassermenge bezogenen und korrigierten Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen und mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 130
- Abb. 7.4.1.11: Korrigierte Lachgasabgaberraten aller Versuchgefäße pro Gefäß und gemessene Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$

- ³)⁻¹. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Linie ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais). 131
- Abb. 7.4.1.12: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 132
- Abb. 7.4.1.13: Korrigierte Lachgasabgabe bezogen auf die transpierte Wassermenge aller Versuchgefäße. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais). 133
- Abb. 7.4.1.14: Mittelwerte, der auf die transpierte Wassermenge bezogenen korrigierten Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 134
- Abb. 7.4.2.1: Transpirationsraten aller Versuchgefäße. Die Linie ohne Symbole gibt den Verlauf der Luftfeuchtigkeit in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais). 136
- Abb. 7.4.2.2: Mittelwerte der Transpirationsraten mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren (Versuchspflanze Mais). 137
- Abb. 7.4.2.3: Lachgasabgaberraten (pro Gefäß) aller Versuchgefäße und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Gerade ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert (Versuchspflanze Mais). 138
- Abb. 7.4.2.4: Mittelwerte der Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 139

- Abb. 7.4.2.5: Lachgasabgabe aller Versuchgefäße bezogen auf die transpirierte Wassermenge. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchsgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais)..... 140
- Abb. 7.4.2.6: Mittelwerte, der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Die Kurve ohne Standardfehler gibt den Verlauf für das Kontrollgefäß wieder. Um die Ergebnisse mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 141
- Abb. 7.4.2.7: Korrigierte Lachgasabgaberraten (pro Gefäß) aller Versuchgefäße und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchsgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Gerade ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert (Versuchspflanze Mais). 142
- Abb. 7.4.2.8: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 143
- Abb. 7.4.2.9: Korrigierte Lachgasabgabe aller Versuchgefäße bezogen auf die transpirierte Wassermenge. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchsgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais)..... 144
- Abb. 7.4.2.10: Mittelwerte, der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Standardfehler gibt den Verlauf für das Kontrollgefäß wieder. Um die Ergebnisse mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais)..... 145
- Abb. 7.4.2.11: Korrigierte Lachgasabgaberraten (pro Gefäß) aller Versuchgefäße und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchsgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Gerade ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert (Versuchspflanze Mais). 146

- Abb. 7.4.2.12:** Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais). 147
- Abb. 7.4.2.13:** Korrigierte Lachgasabgabe aller Versuchgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais)..... 148
- Abb. 7.4.2.14:** Mittelwerte der auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Standardfehler gibt den Verlauf für das Kontrollgefäß wieder. Um die Ergebnisse mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais)..... 149
- Abb. 8.3.1:** Versuchgefäß mit Reispflanzen (a.). Vergrößerte Aufnahme der Abdichtung der Reispflanzen mit Silikonkautschuk (Fa. *Thauer*, Dresden) (b.)..... 158
- Abb. 8.4.1.1:** Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Transpirationsraten von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung (Versuchspflanze Reis). 161
- Abb. 8.4.1.2:** Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchgefäße (auf der linken Seite skaliert) und als Gerade ohne Symbole ist die Konzentration der Lachgasanreicherung im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (auf der rechten Seite skaliert) eingezeichnet (Versuchspflanze Reis)..... 162
- Abb. 8.4.1.3:** Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung (Versuchspflanze Reis). 163
- Abb. 8.4.1.4:** Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge (Versuchspflanze Reis). 164
- Abb. 8.4.1.5:** Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung (Versuchspflanze Reis). 164
- Abb. 8.4.2.1:** Einzelwerte der Transpirationsrate von zwei Versuchgefäßen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung als Kontrollen, von drei Versuchgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung ohne Luftkissen im Wurzelraum und von zwei Versuchgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung mit Luftkissen im Wurzelraum (Versuchspflanze Reis). 166
- Abb. 8.4.2.2:** Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Transpirationsraten von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im

Wurzelraum, drei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum (Versuchspflanze Reis).....	167
Abb. 8.4.2.3: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße (auf der linken Seite skaliert) und als Gerade ohne Symbole die Konzentration der Lachgasanreicherung im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (auf der rechten Seite skaliert). Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).....	168
Abb. 8.4.2.4: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, drei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum. Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).....	169
Abb. 8.4.2.5: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge. Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).....	170
Abb. 8.4.2.6: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, drei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum. Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).	171
Abb. 8.4.2.7: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße (auf der linken Seite skaliert) und als Kurve ohne Symbole die Konzentration der Lachgasanreicherung im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (auf der rechten Seite skaliert) (Versuchspflanze Reis).....	173
Abb. 8.4.2.8: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen von zwei Kontrollgefäßen und vier Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, zwei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum (Versuchspflanze Reis).....	174
Abb. 8.4.2.9: Repräsentative Auswahl mikroskopischer Schnitte durch Reiswurzeln unterschiedlichen Alters bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Die Wurzelaerenchyme (durch Pfeile ist jeweils beispielhaft ein Aerenchym markiert) sind gut ausgeprägt und gut zu erkennen.	175
Abb. 8.4.2.10: Repräsentative Auswahl mikroskopischer Schnitte durch Reisblätter bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Die Blattaerenchyme sind gut ausgeprägt und gut zu erkennen(durch Pfeile ist jeweils beispielhaft ein Aerenchym markiert).	175

TABELLENVERZEICHNIS

Nummer.....	Seite
Tab. 2.2.1: Darstellung der Messgenauigkeit einiger Messverfahren zur Bestimmung von N ₂ O.	16
Tab. 2.4.1: Überprüfung der Querkompensation von CO ₂ , CH ₄ und H ₂ O bei der Messung von N ₂ O bei Vorliegen verschiedener Gasgemische und Variation des Feuchtigkeitsgehaltes der Messproben. Negative Werte für die Konzentrationsminima resultieren einerseits aus den jeweils eingestellten Kalibrationsbereichen und andererseits aus der Querkompensation in Messproben, die das gemessene Gas nicht enthielten.....	32
Tab. 2.5.1: Standardnährlösung für monokotyle Pflanzen, wie sie am Institut für Pflanzenernährung (330) der Universität Hohenheim eingesetzt wird.....	34
Tab. 2.5.2: Standardnährlösung für dikotyle Pflanzen, wie sie am Institut für Pflanzenernährung (330) der Universität Hohenheim eingesetzt wird.....	35
Tab. 4.4.1: Frisch- und Trockengewichte von Blättern, Stängel und Wurzeln der mit N ₂ O behandelten (var 1 – 4) und unbehandelten (k 1 - 4) Sonnenblumenpflanzen in g * Gefäß-1(5 Pflanzen pro Gefäß).....	55
Tab. 4.5.1: Durchschnittliche Lachgasabgabe bzw. –aufnahme auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. Mit „var“ sind die Gefäße bezeichnet, die mit Lachgas angereichert wurden; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Sonnenblume).	60
Tab. 4.5.2: Zu dimensionslosen Emissionskoeffizienten zusammengefasste Verhältnisse der durchschnittlichen Lachgasabgabe zur errechneten Lachgaskonzentration in der Nährlösung auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. Mit „var“ sind die Gefäße bezeichnet, die mit Lachgas angereichert wurden; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Sonnenblume).....	62
Tab. 5.3.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen und deren Mittelwerte im Luftpolster des für die Anreicherung der jeweiligen Wurzelkompartimente verwendeten Ausgleichsgefäßes. Die höchsten Messwerte sind jeweils fett dargestellt (Versuchspflanze Sonnenblume).	70
Tab. 5.4.1: Im Luftpolster des Anreicherungsgefäßes gemessene und daraus errechnete Lachgaskonzentrationen im Luftkissen bzw. in der Nährlösung der Versuchsgefäße mit Lachgasanreicherung. Die jeweils höchsten Messwerte sind fett wiedergegeben (Versuchspflanze Sonnenblume).....	74
Tab. 5.5.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume).....	83

- Tab. 5.5.2:**Durchschnittliche relative Lachgasabgabe pro g transpirierten Wassers auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von 6,38446E-06. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 85
- Tab. 5.5.3:**Durchschnittliche relative Lachgasabgabe pro g transpirierten Wassers auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von 1,16769E-05. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 86
- Tab. 5.5.4:** Emissionskoeffizienten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von 6,38446E-06. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 86
- Tab. 5.5.5:** Emissionskoeffizienten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von 1,16769E-05. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume)..... 87
- Tab. 6.4.1:** Durchschnittliche Transpirationsraten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste)..... 98
- Tab. 6.4.2:** Durchschnittliche absolute Lachgasabgaben pro Gefäß auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste). 100
- Tab. 6.4.3:**Durchschnittliche relative Lachgasabgabe pro g transpirierten Wassers auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste). 103

Tab. 6.5.1:	Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße (Versuchspflanze Gerste).	108
Tab. 6.5.2:	Emissionskoeffizienten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste).....	108
Tab. 7.4.1.1:	Tages- und Nachtmittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge ohne Korrektur für außerhalb des Kalibrationsbereiches liegende Luftfeuchtigkeit und für zwei ermittelte Korrekturfaktoren. Negative Werte bedeuten eine Lachgasaufnahme (Versuchspflanze Mais).	135
Tab. 7.4.2.1:	Tages- und Nachtmittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge ohne Korrektur für außerhalb des Kalibrationsbereiches liegende Luftfeuchtigkeit und für zwei ermittelte Korrekturfaktoren. Negative Werte bedeuten eine Lachgasaufnahme (Versuchspflanze Mais).	149
Tab. 7.5.1:	Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße für den Versuchszeitraum 14.09.01-17.09.01 (Versuchspflanze Mais).....	151
Tab. 7.5.2:	Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße für den Versuchszeitraum 19.09.01-20.09.01 (Versuchspflanze Mais).....	152
Tab. 8.4.1.1:	Für unterschiedliche Versuchsabschnitte errechnete Mittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge. Es sind die Werte von zwei Kontrollgefäßen (Kont.) und fünf Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen der einzelnen unterschiedlichen Behandlungen wiedergegeben (Versuchspflanze Reis).	165
Tab. 8.4.2.1:	Für unterschiedliche Versuchsabschnitte errechnete Mittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge. Es sind die Werte von zwei Kontrollgefäßen (Kont.), drei Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) und zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum (MLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen der einzelnen unterschiedlichen Behandlungen wiedergegeben (Versuchspflanze Reis).....	171
Tab. 8.5.1:	Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten	

	Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den ersten Versuchszeitraum (19.01.02 – 26.01.02) (Versuchspflanze Reis).....	177
Tab. 8.5.2:	Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den zweiten Versuchszeitraum (26.01.02 – 27.01.02) (Versuchspflanze Reis).....	178
Tab. 8.5.3:	Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den dritten Versuchszeitraum (31.01.02 – 07.02.02) (Versuchspflanze Reis).....	178
Tab. 8.5.4:	Emissionskoeffizienten, die für den Versuchsabschnitt vom 19.01.02-23.01.02 berechnet werden konnten. Es sind die Werte von fünf Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen angegeben (Versuchspflanze Reis).	179
Tab. 8.5.5:	Emissionskoeffizienten, die für den Versuchsabschnitt vom 26.01.02 – 27.01.02 berechnet wurden. Es sind die Werte von drei Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) und zwei Gefäßen mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum (MLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen der einzelnen unterschiedlichen Behandlungen wiedergegeben (Versuchspflanze Reis).	181
Tab. 9.1:	Zusammenstellung der Ergebnisse von Untersuchungen zu Lachgasemissionen durch Pflanzen.....	187
Tab. 9.2:	Zusammenfassung der aus den eigenen Versuchen gezogenen Schlussfolgerungen bezüglich der Lachgasemissionen durch Pflanzen....	188

**Meinen lieben, unermüdlichen Eltern für ihre
bedingungslose Unterstützung!**

**WER NICHTS MEHR SAGT
HAT AUFGEgeben.**

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung

°C Taupunkt	Temperatur, die erreicht werden muss, damit das in der Luft als Dampf enthaltene Wasser anfängt sich als Tau niederzuschlagen
c	Konzentration
ECD	<u>E</u> lectron <u>C</u> apturing <u>D</u> etector
FAO	<u>F</u> ood and <u>A</u> griculture <u>O</u> rganisation of the United Nations
FTIR	<u>F</u> ourier <u>t</u> ransformierte <u>I</u> nfrar <u>o</u> t Spektroskopie
g	<u>G</u> ramm
GC	<u>G</u> as <u>c</u> hromatograph
GWP	<u>G</u> lobal <u>W</u> arming <u>P</u> otential
IFA	<u>I</u> nternational <u>F</u> ertilizer Industry <u>A</u> ssociation
IPCC	<u>I</u> ntergovernmental <u>P</u> anel on <u>C</u> limate <u>C</u> hange
IR	<u>I</u> nfrar <u>o</u> t Spektroskopie
J	<u>J</u> ahr
MLK	<u>m</u> it <u>L</u> uft <u>k</u> issen
N	Stickstoff
n. b.	<u>n</u> icht <u>b</u> estimmt
NDIR	<u>N</u> icht <u>d</u> ispersive <u>I</u> nfrar <u>o</u> t Spektroskopie
OLK	<u>o</u> hne <u>L</u> uft <u>k</u> issen
PE	<u>P</u> oly <u>e</u> thylen, <u>P</u> oly <u>e</u> then
ppb	<u>p</u> arts <u>p</u> er <u>b</u> illion
ppm	<u>p</u> arts <u>p</u> er <u>m</u> illion
ppmv	<u>p</u> arts <u>p</u> er <u>m</u> illion <u>v</u> olume
ppt	<u>p</u> arts <u>p</u> er <u>t</u> rillion

PVC	P oly v inyl cl hlorid
TDL	T unable D iode L aser
T	T erra (10^{12})
u [g]	Molgewicht [g]

PUBLIKATIONEN AUS DIESER DISSERTATION

1. Ferch, N. J., V. Römheld: „Release of water-dissolved nitrous oxide by plants: Does the transpiration water flow contribute to the emission of dissolved N₂O by sunflower?” In Horst, W. J. et al. (Eds.): Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands (2001), 228-229.
2. Ferch, N. J., B. Leick & V. Römheld: „Comparison of methods for nitrous oxide measurement – gas chromatography versus photo-acoustic infra red spectroscopy”. In 11th Nitrogen Workshop, Book of Abstracts. INRA, Reims, France, September 9 – 12 (2001), 79-80.
3. Ferch, N. J., V. Römheld: „Abgabe in Wasser gelösten Lachgases durch Pflanzen: Trägt der Transpirationsstrom zur Emission von gelöstem Lachgas durch Sonnenblume (*Helianthus annuus* L. cv. Frankasol) bei?”. In agrar spectrum (Band 34) “Umweltrelevante Spurengase in der Land- und Forstwirtschaft: Herausforderung für Wissenschaft, Politik und Praxis” / hrsg. vom Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung. Red.: I. Ruhnau & L. Hövelmann. Frankfurt (Main): DLG-Verl.; Stuttgart: Ulmer; Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverl., (2002) 157-159.
4. Ferch, N. J., V. Römheld: „Release of water dissolved nitrous oxide by plants: Does the transpiration water flow contribute to the emission of N₂O?” In van Ham, J. et al. (Eds.): Non CO₂ Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control Options and Policy Aspects. Proceedings of the Third International Symposium, Maastricht, Netherlands, 21-23 January, 2002 .Millpress Science Publishers, Rotterdam, Netherlands (2002), 203-204.
5. Ferch, N. J., V. Römheld: „Release of water dissolved nitrous oxide by plants: Possible pathways of N₂O through plants”, In R. Böcker. (Hrsg.): Globale Klimaerwärmung und Ernährungssicherung. 34. Hohenheimer Umwelttagung, 25. Januar 2002, Verlag Günter Heimbach, Deutschland (2002), 137-141.

Kapitel 1.

EINFÜHRUNG

1.1 Allgemeiner Überblick

Lachgas (N_2O , Distickstoffmonooxid; Stickstoff(I)oxid, Stickoxydul) ist ein so genanntes klimarelevantes Spurengas. Im Gegensatz zu den meisten halogenierten Kohlenwasserstoffen kommt es wie die anderen klimarelevanten Gase Wasserdampf (H_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Ozon (O_3) und Methan (CH_4) auch natürlich vor. Außer als Nebenprodukt bei Verbrennungsprozessen kann Lachgas während Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen sowohl unter oxidischen als auch unter anoxischen Bedingungen entstehen. Des Weiteren zeigen neue Untersuchungen, dass Lachgas auch im menschlichen Körper gebildet wird und durch die Atemluft an die umgebende Atmosphäre abgegeben wird (R. Russow et al., 2002). In Anlehnung daran ist es nahe liegend anzunehmen, dass zumindest alle Säugetiere mit der Atemluft während des Stickstoffmetabolismus entstandenes Lachgas emittieren können.

Die durchschnittliche Konzentration von Lachgas in der gut durchmischten Atmosphäre wird für 1991 mit 310 ppb (ENQUETEKOMMISSION DES 12. DEUTSCHEN BUNDESTAGES; 1995; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 1995), für 1998 mit 314 ppb (IPCC, 2001a) und für 2000 mit 316 ppb (IPCC, 2002) angegeben. Von vorindustrieller Zeit (1000 – 1750 n. Chr.) mit 270 ppb (IPCC 2002) stieg die Lachgaskonzentration auf den heutigen Wert. Bis in die Mitte der 80er Jahre wurde ein Konzentrationsanstieg in der gut durchmischten Atmosphäre von jährlich 0,25% angenommen (CRUTZEN und GRÄDEL, 1986). Nach IPCC (2001b) wird für den Zeitraum von 1980 bis 1998 ebenfalls von einem jährlichen Anstieg der Lachgaskonzentration von 0,25 % ausgegangen. Wohingegen FAHEY (1994) eine schnellere Konzentrationssteigerung von 0,3 – 0,36% jährlich annimmt. Eigene Messungen von Außenluft in einer Höhe von ca. 50 cm über dem Boden ergaben durchschnittliche Konzentrationen von 345 ppb (Abb1.1). Es wurde angenommen, dass die eigenen Messungen wegen der Nähe der Probenahmestelle zum Boden und der in unmittelbarer Nähe verlaufenden Straße im Mittel höher lagen als die Literaturangaben und aus eben diesen Gründen sehr starken Schwankungen

unterworfen waren.

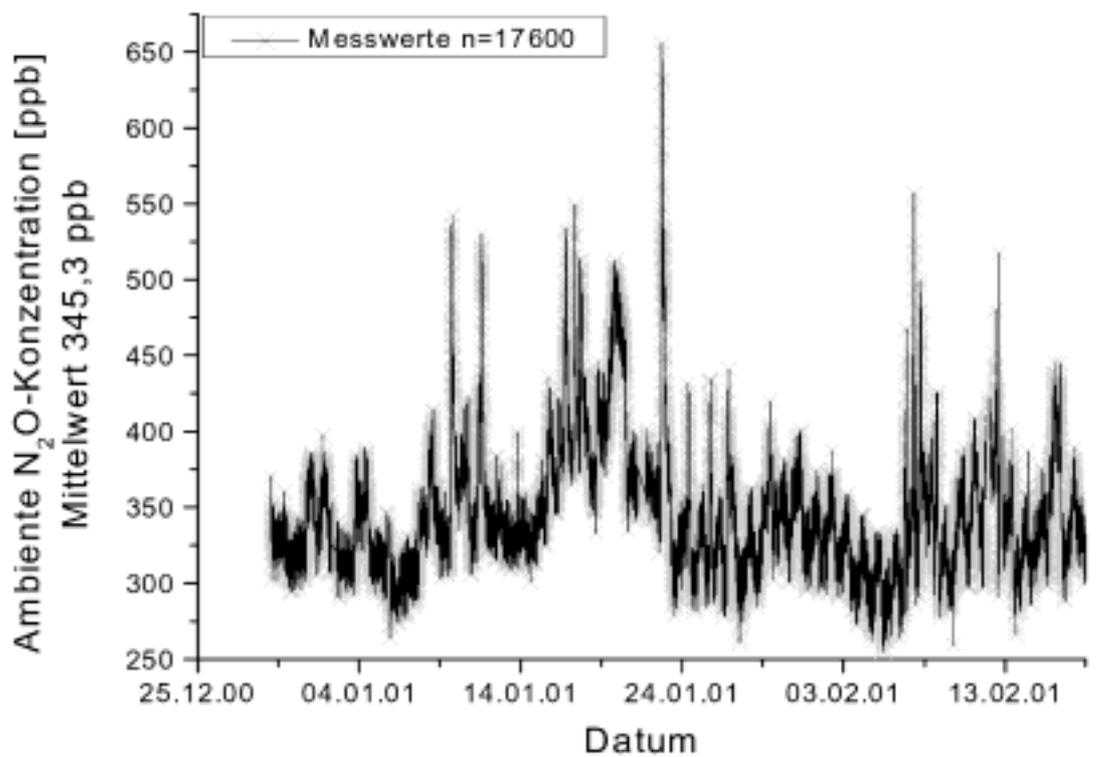


Abb. 1.1: Verlauf der ambienten Lachgaskonzentration gemessen in Hohenheim in einer Höhe von 50 cm über dem Boden. In unmittelbarer Nähe der Messstelle verläuft eine Strasse.

Die Konzentration von Lachgas erscheint im Vergleich zu den Konzentrationen der anderen klimarelevanten Gase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Wasser (H₂O) in der bodennahen Atmosphäre relativ gering. Allerdings wird das Erwärmungspotential (GWP – **G**lobal **W**arming **P**otential) von Lachgas auf Sicht der kommenden 100 Jahre, bezogen auf die heutige Konzentration in der Atmosphäre, 296-mal höher eingestuft als das von CO₂ (IPCC, 2001c). Es wird geschätzt, dass Lachgas mit einer Rückstrahlung von 0,15 W/m² einen Anteil von 6% am gesamten Erwärmungspotential der langlebigen und global durchmischten klimarelevanten Gase hat (IPCC, 2001b). Zusätzlich wird bei Lachgas von einer atmosphärischen Lebensdauer von 114 Jahren ausgegangen (IPCC, 2001a). Bei dieser Angabe der atmosphärischen Lebensdauer ist der indirekte Effekt des Gases auf seine eigene Verweildauer in der Atmosphäre berücksichtigt.

Außer einem Beitrag zur Klimaerwärmung hat N₂O eine weitere negative Eigenschaft. Auf Grund der hohen chemischen Stabilität des Moleküls unter den Bedingungen der unteren Schichten der Atmosphäre (Troposphäre) steigt dieses in

höhere Schichten der Atmosphäre (Stratosphäre) auf. Dort trägt es über photochemische Prozesse zur Zerstörung der Ozonschicht bei. Gleichzeitig ist dieser Vorgang auch der „Entgiftungsmechanismus“ für das ansonsten höchst stabile N_2O .

Das Verhältnis von natürlicher Lachgasemission zu menschlich verursachten Emissionen wurde durch IPCC (2001b) für 1990 auf 10 zu 7 geschätzt. Es wurde angenommen, dass 10 Tg Stickstoff (N) als N_2O pro Jahr aus natürlichen Quellen stammen. 65% davon aus Böden und weitere 30% aus den Weltmeeren. 7TgN/J sollen aus anthropogenen Quellen wie Landwirtschaft, Verbrennung von Biomasse, industriellen Prozessen und Tierhaltung stammen.

Es wird angenommen, dass weltweit über 50% der anthropogenen N_2O -Emissionen auf den Einsatz von Stickstoffdüngemitteln zurückzuführen sind, wobei der Anteil der düngungsverursachten Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland auf ca. 33% geschätzt wird (UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, 1994). Der im weltweiten Vergleich geringere Anteil der Stickstoffdüngung an der gesamten Lachgasemission Deutschlands ist vordergründig nicht in einem geringen Düngungsniveau der landwirtschaftlichen Nutzflächen begründet. Dies liegt eher an der vergleichsweise hohen Industrialisierung und dem hohen Verbrauch an aus Verbrennungsprozessen stammender Energie (Transport / Verkehr, Heizung etc.). Zusätzlich wäre es von Nöten in diesem Zusammenhang: die Anteile der jeweils angewandten Stickstoffformen, den Anteil von stickstofffixierenden Pflanzenarten an der bewirtschafteten Fläche, die Produktionssysteme einschließlich des Düngungsniveaus und die bei den angebauten Pflanzenarten verwendeten Produktionssysteme (u. a. Nass- oder Trockenreisanbau, Bewässerungsform und -intensität) eingehender zu betrachten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass nach heutigem Stand des Wissens Böden jeglicher Form – seien sie natürlich (submers, hydromorph etc.) oder anthropogen beeinflusst – als Hauptemittent von N_2O angesehen werden müssen.

Ein Überblick über das Vorkommen, die Entstehung und den Abbau von N_2O gibt die Abb.1.2 (HACK, 1999).

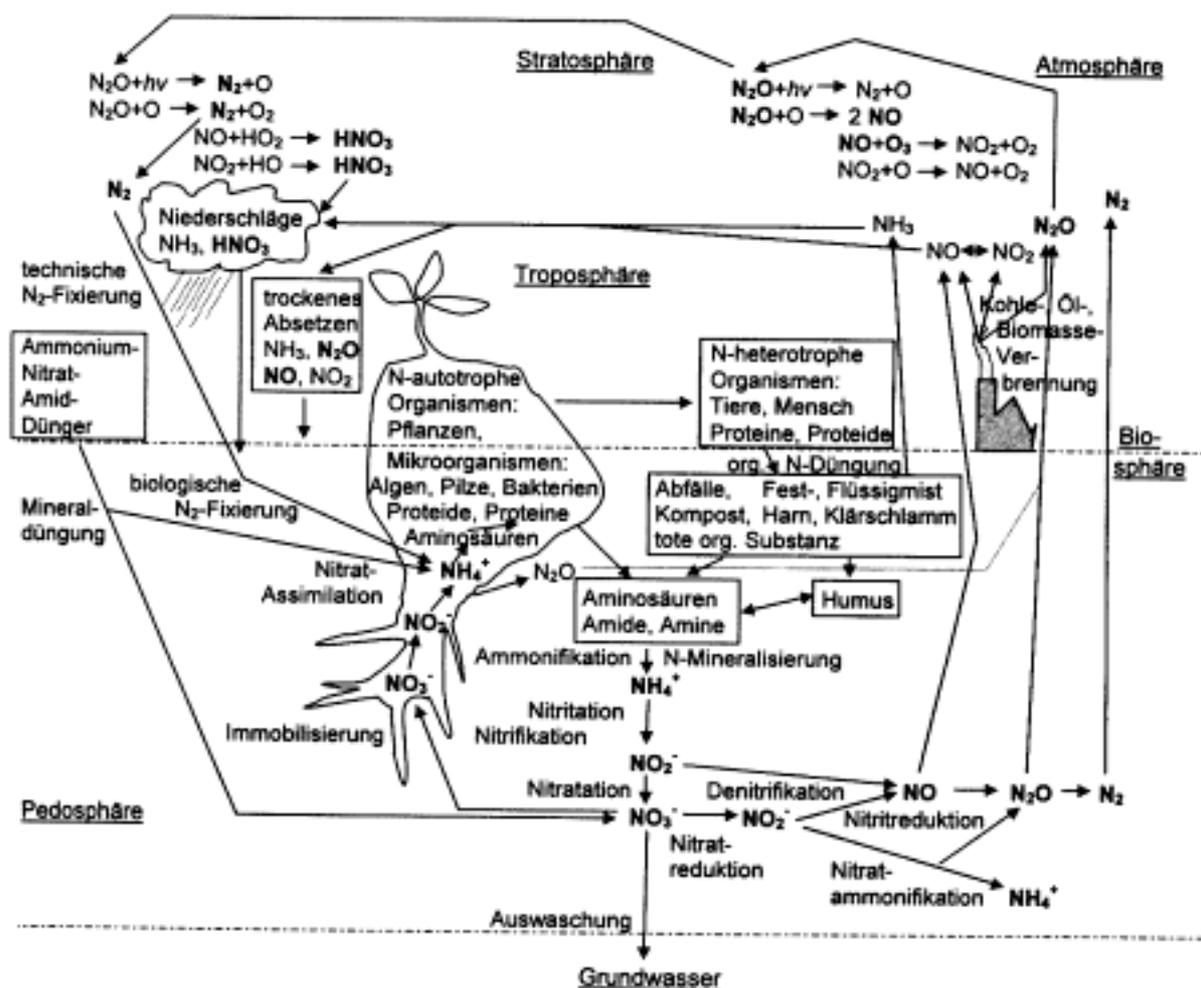


Abb. 1.2: Darstellung des Stickstoffkreislaufs in Biosphäre, Pedosphäre und Atmosphäre mit den dazugehörigen vereinfachten Umsetzungsprozessen (HACK, 1999).

In vielen Untersuchungen wurde gezeigt, unter welchen Bedingungen Lachgas in Böden gebildet werden kann (u. a. DAVIDSON, 1991). Teile dieses Lachgases werden über Diffusions- und Konvektionsprozesse in die Atmosphäre emittiert. Bisherige Versuche zu Emissionspotentialen von Böden haben fast ausschließlich unbewachsene Oberflächen (Wasser- oder Bodenoberflächen) oder mit Pflanzen bestandene Oberflächen (Wasser- oder Bodenoberflächen) zum Gegenstand gehabt. Der zusätzliche Einfluss der Vegetation auf die Lachgasemission wurde fast ausschließlich über Differenzrechnungen - Emission einer mit Pflanzen bewachsenen Oberfläche abzüglich der Emission einer unbewachsenen Referenzfläche – deduktiv bestimmt (z. B. MOSIER et al., 1990). Diese Vorgehensweise lässt allerdings keinen eindeutigen Rückschluss zu, ob Lachgas durch die jeweilige Vegetation abgegeben werden kann, oder ob andere Faktoren für eine eventuell höhere Emission über

pflanzenbestandenen Oberflächen in Frage kommen. Weiterhin lieferten bisherige Untersuchungen keine Informationen über eventuelle Transportwege.

Erstmals haben CHANG et. al (1997) gezeigt, dass Pflanzen Lachgas abgeben können. Rückschlüsse auf die Transportwege innerhalb der Pflanze waren auch hier nicht möglich.

Als Emissionswege kommen prinzipiell der Transport gelöst im Transpirationswasser und/oder der Transport als Gas über eventuell vorhandene Aerenchyme in Betracht.

1.2 Lachgaskonzentrationen und dazugehörige Einheiten

1.2.1 Lachgas als Teil eines Gasgemisches

Prinzipiell lassen sich Gaskonzentrationen in zwei verschiedenen Einheiten angeben:

- Als Anteil der Moleküle des betrachteten Gases in Bezug auf eine Basisanzahl von Molekülen, z. B. ppm – **p**arts **p**er **m**illion – ein Molekül innerhalb einer Million Moleküle. Diese Angabe ist absolut und von keinem weiteren physikalischen Faktor beeinflusst. Bei Angaben von Gaskonzentrationen wird der Bezugsgröße teilweise noch ein „v“ nachgestellt – z.B. ppmv. Dieses „v“ steht für das englische „volume“.
- Als Gewichtsangabe des betrachteten Gases in einem definierten Volumen, z. B. $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Um diese Konzentrationsangaben innerhalb unterschiedlicher Experimente vergleichbar zu halten, muss hierfür stets die zum Messzeitpunkt herrschende Temperatur und der zu dem betreffenden Zeitpunkt herrschende Luftdruck bekannt sein.

Die Konzentrationsangabe $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ist im Gegensatz zur Einheit ppm abhängig von weiteren physikalischen Größen. So muss bei der Umrechnung auf ppm die zum Messzeitpunkt herrschende Temperatur und der Luftdruck bekannt sein. Die Umrechnung erfolgt dann nach der Formel $\text{ppm} = c_{\text{N}_2\text{O}} [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}] / u$ (Molgewicht N_2O , 44,01g) [g] * **Molvolumen** (bei der betrachteten Temperatur) [m^{-3}]

1.2.2 Lachgas in Flüssigkeiten

Werden Gase in Flüssigkeiten eingebracht und verbleibt ein Teil des eingebrachten Gases in der Flüssigkeit, so wird im Allgemeinen von Löslichkeit gesprochen. Bei der Angabe der Löslichkeit von Gasen sind verschiedene Einheiten anzutreffen. Entweder volumenbezogen (z. B. als [$\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$]), gewichtsbezogen (z. B. als [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]) oder als gelöster Gewichtsanteil in einem bestimmten Volumen (z. B. [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]). Für eine chemisch zuverlässige Angabe sollte eine gewichtsbezogene Einheit verwendet werden. In manchen Fällen folgt der Einheit noch die Angabe des Lösungsmittels (z.

B. Wasser (H₂O)).

Auf die Löslichkeit von Lachgas in Wasser haben mehrere Variablen einen Einfluss. Unter anderen:

- Temperatur (je niedriger die Temperatur desto höher die Löslichkeit),
- die Reinheit des Wassers. Je mehr Salze z. B. im Wasser gelöst sind, desto geringer ist die Löslichkeit von N₂O.

Innerhalb eines gasdicht abgeschlossenen Systems bestimmt das Verhältnis von Wasservolumen zu darüber liegendem Luftvolumen in Verbindung mit der darin befindlichen Lachgasmenge und in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur in einem sonst ungestörten System die in Lösung gehende Lachgasmenge.

Die Löslichkeit von Lachgas in reinem Wasser bei einem Verhältnis der Flüssigkeits- und Gasvolumina von 1:1 und einer Temperatur von 25 °C wird mit 0,112 g/100g angegeben (AYLWARD G.H., 1986).

1.3 Ziele der vorliegenden Arbeit

Zwar wurden Untersuchungen zum Einfluss von Pflanzenart und / oder Fruchtfolge auf die Lachgasemission durchgeführt, allerdings wurde der direkte Einfluss der Pflanze auf die Lachgasfreisetzung von im Boden gebildeten oder vorhandenen Lachgas bisher noch nicht ausreichend herausgearbeitet. Von der **F**OOD AND **A**GRICULTURE **O**RGANISATION OF THE UNITED NATIONS & **I**NTERNATIONAL **F**ERTILIZER **I**NDUSTRY **A**SSOCIATION (FAO & IFA 2001a) wurden die folgenden emissionsbeeinflussenden Faktoren aus 139 Versuchen mit insgesamt 896 Messergebnissen für die Abschätzung und Modellierung der globalen gasförmigen N₂O-Emissionen berücksichtigt:

- Bodenbeschaffenheit, Bodendaten,
- Klima,
- Betriebsführung.

Innerhalb der Betriebsführung wurden erfasst:

- Zeitpunkt und Intensität der Bodenbearbeitung,
- Ausbringung von chemischen und organischen Düngemitteln einschließlich der Stickstoffform,
- Bewässerung einschließlich Menge und Zeitpunkt,
- Kulturpflanzenart und Fruchtfolge.

Obwohl die Kulturpflanzenart in der Methodologie erwähnt wird, findet der Einfluss der Pflanzenart nur rein deskriptiv Eingang in die Modellierung. Es werden lediglich die beobachteten Emissionsraten über einer definierten Kulturpflanzenart als Schätzer für die weltweit durch die betrachtete Kulturpflanze bestandene Fläche verwendet. Mit dieser Vereinfachung wird schon seit Beginn der Klimagasforschung gearbeitet.

Die Notwendigkeit der Umsetzung der unten aufgeführten Ziele der vorliegenden Arbeit ergibt sich nicht zuletzt aus dem oben beispielhaft, anhand einer aktuellen

Veröffentlichung (FAO & IFA 2001a), herausgearbeiteten Problemfeld. Die dadurch verursachten Ungenauigkeiten erschweren die verlässliche Ableitung globaler Emissionen.

Die Ziele dieser Arbeit waren im Einzelnen:

- Realisierung eines reproduzierbaren Versuchsaufbaus, der es zulässt, das mögliche Potential zur Lachgasabgabe von verschiedenen Pflanzenarten unabhängig von anderen Einflussfaktoren zu quantifizieren.
- Realisierung eines Versuchsaufbaus, der es zulässt, unterschiedliche Transportmechanismen für die Lachgasabgabe durch Pflanzen zu differenzieren.
- Realisierung eines Versuchsaufbaus, der es zulässt, unterschiedliche Einflussfaktoren für die Lachgasabgabe zu untersuchen.
- Bestimmung des Potentials unterschiedlicher Pflanzenarten Lachgas zu transportieren und zu emittieren.
- Herausarbeitung der möglichen Transportwege von N_2O in den Pflanzen.
- Identifizierung möglicher Einflussfaktoren.

Dafür wurden folgende Hypothesen abgeleitet:

Für den Lachgastransport in der Pflanze kommen zwei Mechanismen in Betracht:

- in wässriger Lösung über den Transpirationsstrom
- über die Gasphase in Aerenchymen aus der Wurzel in die oberirdischen Pflanzenteile.

Beide Mechanismen können auch parallel auftreten.

Kapitel 2.

METHODISCHE VORARBEITEN

2.1 Einleitung

Im Allgemeinen lassen sich für die Gewinnung von Gasproben zur Bestimmung des Einflusses einer Vegetation auf die Dynamik klimarelevanter Gase drei unterschiedliche Versuchsaufbauten verwenden:

- Geschlossene Systeme,
- Systeme mit kontrollierter Gas Zu- und Abfuhr und
- offene Systeme

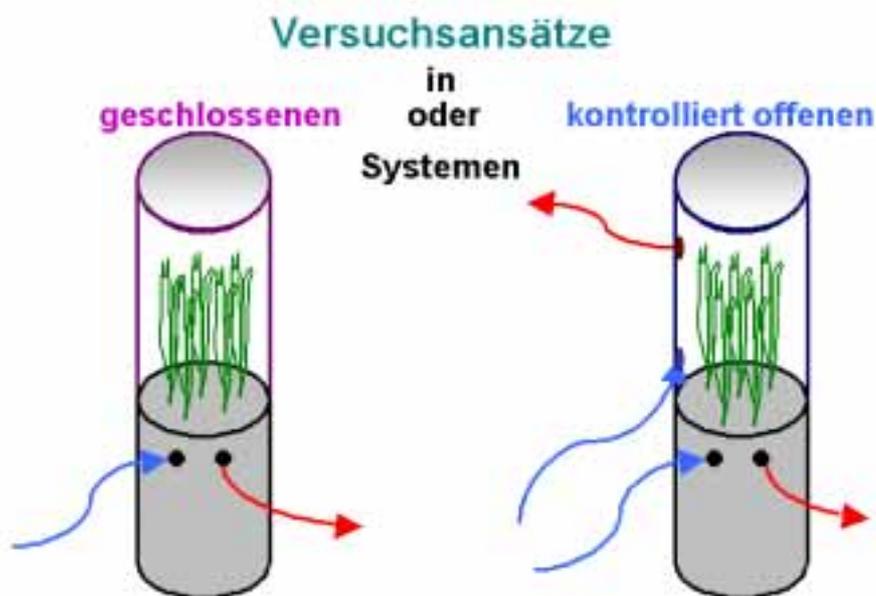


Abb. 2.1.1: Schematischer Aufbau eines geschlossenen Systems und eines Systems mit kontrollierter Luftzufuhr. Die Pfeile zeigen einen Austausch des Mediums und die Richtung des Austausches an.

Abbildung 2.1.1 zeigt den schematischen Aufbau der beiden erstgenannten Systeme. In Abhängigkeit des zu bestimmenden Gases, der Versuchsumgebung (Freiland oder Klimakammern) und der angestrebten Versuchsdauer muss die Eignung eines bestimmten Versuchsaufbaus für das verfolgte Ziel überprüft werden.

Einen Überblick über verschiedene Messtechniken geben unter anderen LAPITAN et al. (1999) und FAO & IFA (2001b)

Um die Ziele der vorliegenden Arbeit realisieren zu können, schien es notwendig, möglichst lange und kontinuierliche Messungen des Gashaushaltes der jeweils untersuchten Pflanzenart durchzuführen. Der Versuchsaufbau sollte trotz seiner artifiziellen Bedingungen die Grundvoraussetzungen für ein möglichst natürliches Wachstum der Versuchspflanzen bieten. Als problematisch haben sich in diesem Zusammenhang in den durchgeführten Vorarbeiten folgende Faktoren erwiesen:

- CO₂-Konzentration,
- Luftfeuchtigkeit,
- Lichtintensität
- Lufttemperatur.

In den Abbildungen 2.1.2 und 2.1.4 sind beispielhaft die gemessenen Verläufe der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Variation der Belüftungsintensität) mit Sonnenblume in einem kontrolliert offenem System dargestellt.

Die Abb. 2.1.2 zeigt deutlich die Unterschiede zwischen der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit der Außenluft („Konzentrationen ambient“) und des Gleichgewichts, das durch den Pflanzenbestand unter einer Acrylglasabdeckung entsteht. Bis zum ersten Pfeil betrug der Belüftungsstrom 1000 ml*min⁻¹, bis zum zweiten 600 ml*min⁻¹, bis zum dritten 700 ml*min⁻¹, bis zum vierten Pfeil 800 ml*min⁻¹ und bis zur erneuten Messung der ambienten Konzentrationen wiederum 1000 ml*min⁻¹. Nachts lässt sich innerhalb der Abdeckung eine im Vergleich zur Außenluft erhöhte CO₂-Konzentration feststellen. Dies ist durch die Atmung der Pflanzen im Dunkeln bedingt. Während der Beleuchtungsperiode hingegen fällt die CO₂-Konzentration sehr schnell nach Einschalten des Lichts ab. In Abhängigkeit von der Licht- und Belüftungsintensität wird CO₂ mehr oder weniger schnell zum limitierenden Faktor für die Pflanze. Die Luftfeuchtigkeit ist im Inneren der Abdeckung sowohl nachts als auch tags im Vergleich zur Außenluft extrem erhöht. Vor allem die Konzentrationen, die unter Licht erreicht werden, können bei Kulturpflanzen Schäden

verursachen.

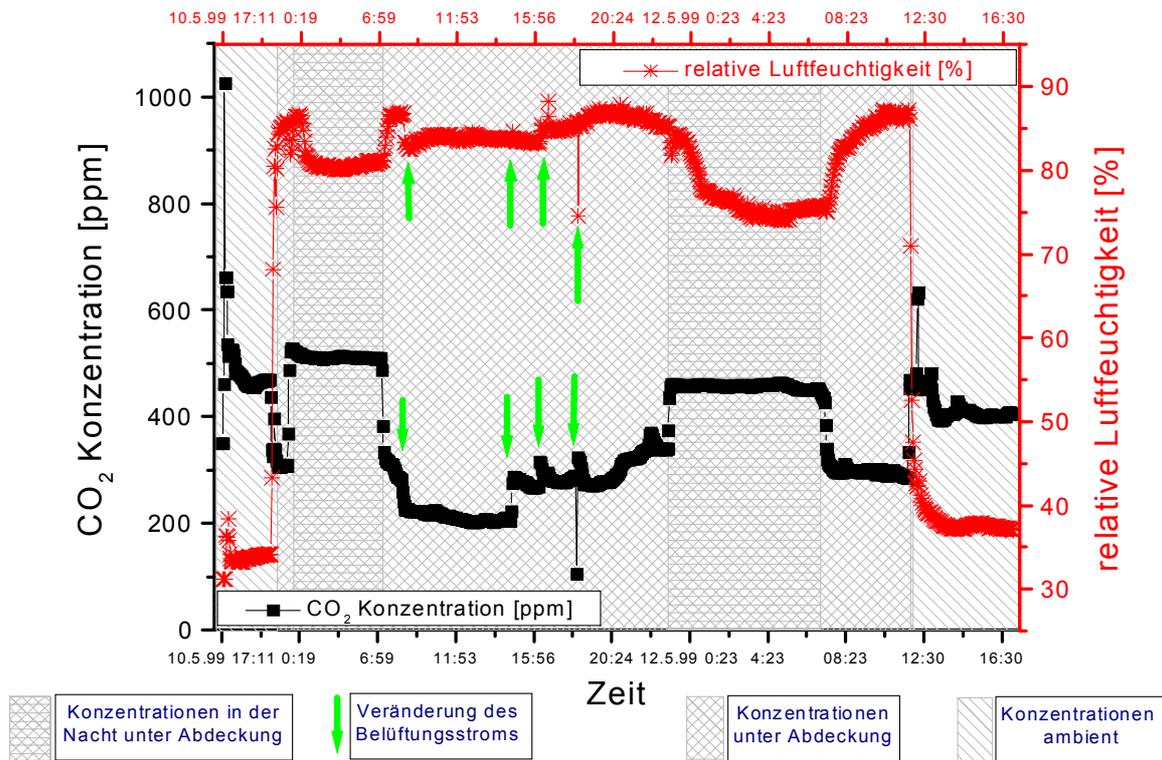


Abb. 2.1.2: Verlauf der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Belüftungsintensität im diurnalen Verlauf. Versuchspflanze war Sonnenblume in einem kontrolliert offenen System. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte, zu denen die Belüftungsintensitäten geändert wurden.



Abb. 2.1.3: Vermutlich durch zu hohe Luftfeuchtigkeit am Hypokotyl von Sonnenblume (Sorte Frankasol) hervorgerufene Schäden.

Abb. 2.1.3 zeigt das vermutlich infolge zu hoher Luftfeuchtigkeit aufgeplatzte und schon verheilte Hypokotyl von Sonnenblumen (Sorte Frankasol). Das Hypokotyl platzte scheinbar wegen andauernder, extrem hoher Luftfeuchtigkeit in einem Pflanzenalter von 2-6 Wochen nach der Keimung auf.

Neben einer offensichtlichen Schädigung hat zu hohe Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der jeweils betrachteten Pflanzenart in unterschiedlichem Umfang auch noch folgende negative Effekte auf den Versuchsablauf und die Versuchsergebnisse:

- Permanente Stomataöffnung,
- verfälschte Emissionsraten wegen zu geringer Transpiration,
- potentielle Unterversorgung mit Nährstoffen, die vorwiegend bzw. ausschließlich im Xylem verlagert werden (z. B. Ca, B) wegen zu geringer Transpiration und fehlendem Wurzeldruck,
- eventuelle Überhitzung des Pflanzengewebes (wegen zu geringer Transpiration) und
- geringe „Abhärtung“ bzw. Adaption des Pflanzengewebes. Infolgedessen zeigen die Pflanzen bei normalen Umgebungsbedingungen sofort Welkeerscheinungen.

Abb. 2.1.4 zeigt bis zum ersten Pfeil den Verlauf von CO₂-Konzentration und Luftfeuchtigkeit in der Außenluft. Danach werden durch die Grafik die Konzentrationen innerhalb eines abgedeckten Reisbestandes wiedergegeben, der kurzzeitig nicht belüftet wurde. Der zweite Pfeil markiert den Zeitpunkt, als die Belüftung eingeschaltet wurde. Die schnelle Abnahme der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit verdeutlicht, wie wichtig eine ausreichende und kontinuierliche Belüftung für die Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse ist.

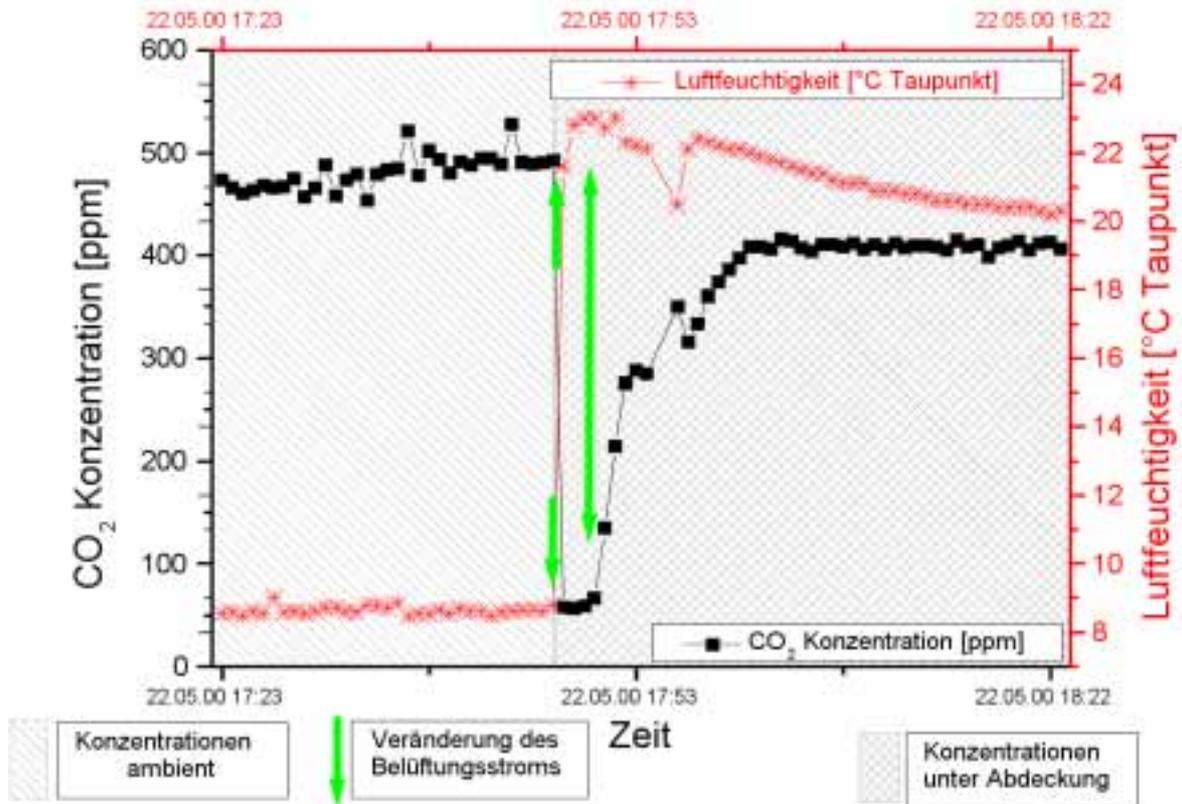


Abb. 2.1.4: Verlauf der CO₂-Konzentration und der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von kurzzeitigem, vollkommenem Kammerschluss und der Belüftungsintensität. Versuchspflanze war Reis.

Unter den in der Klimakammer gegebenen Bedingungen wurden zur Durchführung der Versuche die Sprosse der Versuchspflanzen mit durchsichtigen Acrylglasshauben abgedeckt, um die Versorgung der Versuchspflanzen mit Licht sicherzustellen. Auf Grund dessen konnte Licht unter diesen Versuchsbedingungen für die bearbeitete Versuchsfrage „Lachgasabgabe über Pflanzen“ nicht als limitierender Faktor erkannt werden, zumal ausgeprägte diurnale Rhythmen für die CO₂-Assimilation respektive CO₂-Abgabe und die Transpiration im Rahmen der durchgeführten Vorversuche mit dem vorliegenden Kultursystem gemessen werden konnten.

In der Klimakammer reichte der zur CO₂-Zu- bzw. Abfuhr notwendige Luftstrom in der Regel aus, um die Temperatur innerhalb der Abdeckungen nur 1-2°C über das Niveau der Umgebungstemperatur steigen zu lassen (Abb. 2.1.5). Aus diesem Grunde war es nicht nötig, die zur Belüftung verwendete Luft zu kühlen. Dadurch ließ sich zusätzlicher Stress im Zusammenhang mit Zugluftsymptomen für die Pflanzen vermeiden.

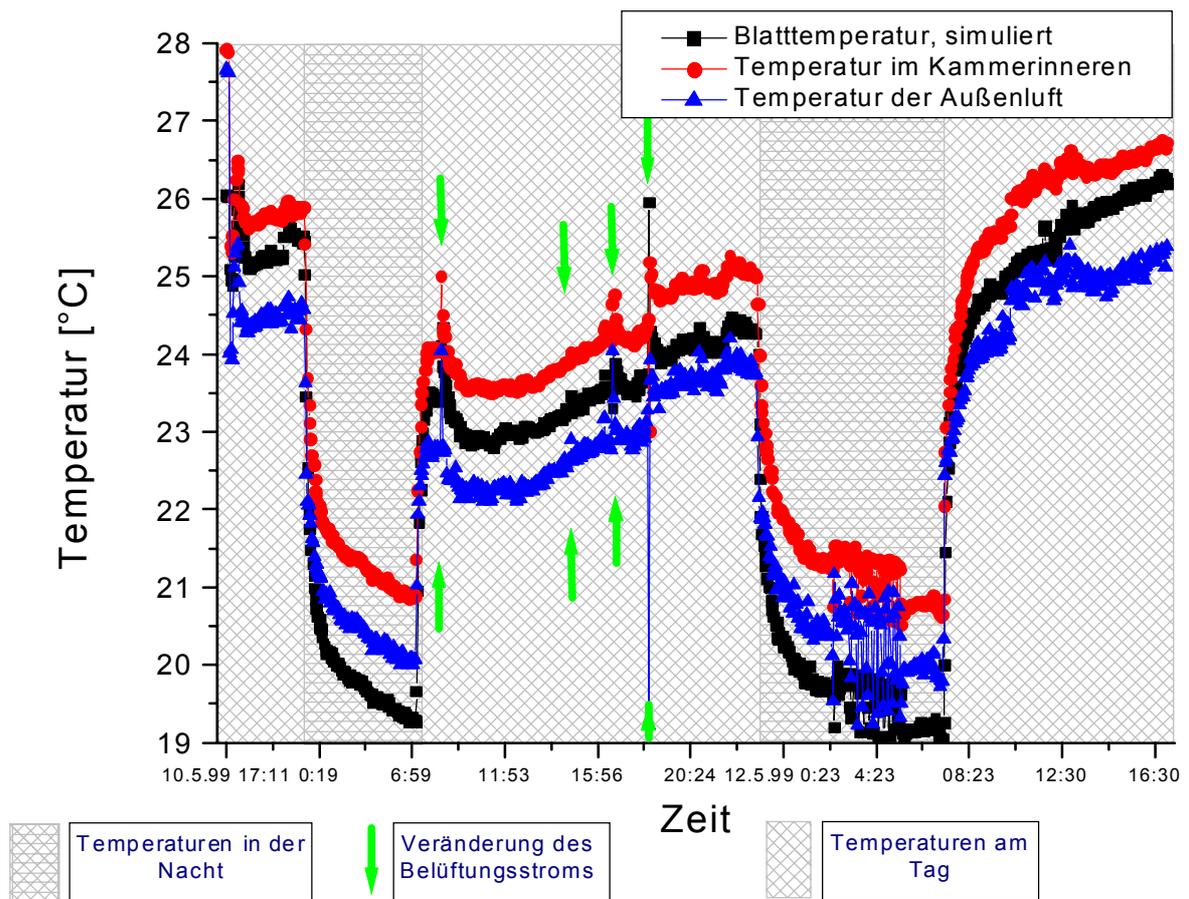


Abb. 2.1.5: Vergleich der Temperaturverläufe unter einer Acrylglasabdeckung, der simulierten Oberflächentemperatur eines darunter befindlichen Blattes und der Temperatur der Außenluft in Abhängigkeit von der Belüftungsintensität. Versuchspflanze war Sonnenblume.

2.2 Methoden zur Lachgasmessung

Für die Messung von N₂O stehen folgende kommerziell angebotenen Lösungen zur Verfügung:

- **Gaschromatograph (GC)** in Verbindung mit einem **ECD (Electron Capture Detector)** (z. B.: *Agilent* vormals *Hewlett-Packard*).
- **Nicht dispersive Infrarot Spektroskopie (NDIR, *Maihak*)** ohne Fourier Transformation über geschlossene Zellen mit Vergleich mit einer Referenzzelle.
- **Infrarot Spektroskopie mit Fourier Transformation (FTIR)** über geschlossene Zellen ohne Vergleich mit einer Referenzzelle (*Brucker Optik*).
- **Infrarot Spektroskopie mittels Fourier Transformation (FTIR)** mit einem offenen Strahlengang (open path FTIR).
- **Photoakustische Messverfahren** im infraroten Bereich (*Innova AirTech Instruments*)
- **Messung mit so genannten TDL (Tunable Diode Laser, *Aerodyne Research, Inc*).**

Tab. 2.2.1: Darstellung der Messgenauigkeit einiger Messverfahren zur Bestimmung von N₂O.

Messverfahren	Erreichbare Messgenauigkeit
GC mit ECD	In der Regel 10-15 ppb. In voll klimatisierten Räumen und Eichung nach jeder Probe kann unter günstigsten Bedingungen 1ppb erreicht werden (CONEN, mündliche Mitteilung 2002)
NDIR Spektroskopie <i>Maihak</i>	50-150 ppb, wobei die Querkompensation von störenden Gasen nur in sehr engen Grenzen möglich ist.
FTIR Spektroskopie <i>Brucker Optik</i>	15 ppb
Photoakustik <i>Innova AirTech Instruments</i>	10-30 ppb
TDL <i>Aerodyne Research, Inc</i>	100 ppt (SKIBA, mündliche Mitteilung 2002)

Die oben genannten Methoden unterscheiden sich nicht nur in ihrer Messgenauigkeit (Tab. 2.2.1), dem erreichbaren Probendurchsatz und dem benötigten Probenvolumen, sondern auch in der Art und Weise, wie die zu messenden Proben gewonnen werden müssen.

Für die Messung mit einem GC müssen Aliquote gewonnen und dem Gerät zur Messung zugeführt werden. Die Aliquote können mit gasdichten Spritzen, mit unter Unterdruck stehenden Glasbehältern (sogenannten Vakutainern) oder mit gasdichten Kunststoffkissen (sogenannten gas bags) gewonnen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Probengewinnung über Molekularsiebe (s. u.). Die Zuführung der Probe erfolgt von Hand oder automatisch über einen Probennehmer.

Außer bei der „open path“ Messung und der Messung mit einem GC werden bei den übrigen Messverfahren die Proben automatisch von den jeweiligen Geräten aus der vorgegebenen Umgebung angesaugt und der Messeinheit automatisch zugeführt.

Ist ein automatisches Ansaugen wegen örtlicher Entfernung oder zu geringer Lachgaskonzentrationen nicht möglich oder nicht sinnvoll, können weitere Methoden für die Probengewinnung eingesetzt werden.

2.2.1 Probengewinnung über Molekularsiebe

Bei zu geringen Konzentrationsunterschieden zwischen verschiedenen Varianten kann es sinnvoll sein, über längere Zeiträume Lachgas zu „sammeln“. Dies kann mit Hilfe sogenannter Molekularsiebe geschehen (RYDEN et al., 1978; BENCKISER et. al., 1986; BRAUN, 1994). Die Molekularsiebe bestehen aus Aluminiumsilikaten, die Poren einer definierten Größe enthalten. In diesen Poren werden die Moleküle reversibel adsorbiert. Für das Sammeln von Lachgas ist eine Porengröße von 0,5 nm am geeignetsten. Bei dieser Porengröße lagern sich allerdings neben Lachgas in größerem Umfang auch Wasser und Kohlenstoffdioxid in die Aluminiumsilikate ein. In einer detaillierten Beschreibung der Probengewinnung mit Molekularsieben und deren Aufbereitung gibt Hack (1999 b) eine fünfmalige Regenerationsfähigkeit der Molekularsiebe an. Danach soll die Adsorptionsleistung nicht mehr ausreichend sein. Um eine vorzeitige Sättigung der Molekularsiebe mit nicht erwünschten Gasen (H₂O und CO₂) zu vermeiden, wird der Probenluftstrom über Natronkalk (Entfernung von

CO₂) und Silikagel (Entfernung von H₂O) gereinigt (Hack, 1999 b). Danach wird der Luftstrom durch Molekularsiebe geleitet. Die Desorption des adsorbierten Lachgases erfolgt mit Wasser (Hack, 1999 b). Dabei verdrängen die Wassermoleküle die Lachgasmoleküle aus den Molekularsieben. Die Bestimmung der Lachgaskonzentration erfolgt gaschromatographisch mittels ECD als Headspaceanalyse (Hack, 1999 b).

Um die oben beschriebene Methode für die hier diskutierte Versuchfrage zu evaluieren, wurde folgender Versuchsaufbau verwendet:

1. Ein Luftstrom aus einem mit einer Acrylglasshaube bedeckten Versuchsgefäß wurde durch eine Gaswaschflasche geleitet. Diese war mit 50g gekörntem Natronkalk (Fa. *Merck*), der mit etwas Wasser aktiviert wurde, gefüllt.
2. Der von CO₂ gereinigte Luftstrom wurde danach durch eine mit 100g Silikagel (Fa. *Merck*) gefüllte Gaswaschflasche geleitet, um die Probenluft zu trocknen.
3. Zur Erfassung der Lachgasemission wurde die Probenluft durch eine dritte Gaswaschflasche geleitet. Diese war mit 100g Molekularsieb (Fa. *Merck*) mit der Porengröße 0,5 nm gefüllt.

Mit Durchflussmessern (*Fischer & Porter*) wurde ein Luftstrom von ca. 80 l·h⁻¹ eingestellt. Es wurde ein Probenzeitraum von 24 Stunden angestrebt. Allerdings war nach dieser Zeit die Wasseraufnahmekapazität des Silikagels in der Regel schon vollkommen erschöpft. Die Messungen und Auswertungen der mit dieser Methode gewonnenen Gasproben erbrachten für den beschriebenen Versuchsaufbau und die zu beantwortenden Versuchsfragen keine auswertbaren Ergebnisse. Eine weitere Anpassung dieser Methode an die zu beantwortenden Versuchsfragen wurde zusätzlich aus folgenden Gründen nicht mehr verfolgt:

- Die Erfassung von Veränderung der Lachgaskonzentration in einer für die Versuchsfragen vernünftigen zeitlichen Auflösung (mindestens ein Messwert pro Stunde, Variante und Wiederholung) ließ sich mit dem verfügbaren Arbeits- und Zeitpotential nicht realisieren.

- Weitere wichtige Parameter, wie Transpiration und Assimilation der Pflanzen konnten nicht befriedigend überwacht werden.
- Eine Bestimmung der Lachgasemissionen über den gesamten für die Versuchspflanzen zur Versorgung benötigten Luftstrom war nicht realisierbar.

2.2.2 Probengewinnung über Vakutainer

Bei der Probengewinnung über Vakutainer werden unter Zuhilfenahme evakuierter Glasfläschchen mit einem Volumen von 21 cm³ Aliquote aus einer Versuchskammer entnommen. Die Lachgaskonzentration in den so gewonnenen Gasproben wird in der Regel über einen automatischen Probennehmer mit einem Gaschromatographen mittels ECD bestimmt (SCHMIDT, 1998).

Die Eignung dieser Methode für die relevanten Versuchsfragen dieser Arbeit wurde an zwei Systemen überprüft. Für die Probennahme wurden vierfach mit hochreinem Stickstoff (Reinheitsstufe 5.0) gespülte Vakutainer mit einem Unterdruck von 950-960 cm WS (LEICK, mündliche Mitteilung 1999) verwendet.

Im ersten Ansatz wurden die Versuchspflanzen gasdicht mit Acrylglashauben abgedeckt. Abbildung 2.2.2.1 zeigt ein unbepflanztes abgedecktes Gefäß und eine Vergrößerung der Haube mit Doppelkanüle zur Entnahme der Gasproben. Die Hauben blieben für unterschiedlich lange Zeitintervalle geschlossen, wobei in regelmäßigen Abständen Proben entnommen wurden.



Abb. 2.2.2.1: Gasdicht verschlossenes Versuchsgefäß mit Acrylglashaube und Doppelkanüle zur Entnahme von Gasproben mit Vakutainern.

Mit dieser Vorgehensweise konnten zwar Veränderungen in der Lachgaskonzentration gut erfasst werden, allerdings konnten Artefakte aus folgenden Gründen nicht ausgeschlossen werden:

- Schnelle und starke Abnahme der CO₂-Konzentration (vgl. Abb. 2.1.4).
- Artefakte infolge extremer Stomataöffnung als Folge hoher Luftfeuchtigkeit und geringer CO₂-Konzentration und Einsetzen der Dissimilation, so dass der Bezug zwischen Experiment und natürlichen Prozessen in Frage gestellt werden muss.
- Schon nach wenigen Minuten trat Niederschlag an der Haubeninnenseite wegen hoher Luftfeuchtigkeit auf. Dies schränkt die normale Transpiration der Pflanzen sehr stark ein. Zusätzlich löst sich in dem Niederschlagswasser Lachgas, das über Konzentrationsmessungen in der Gasphase nicht erfasst werden kann.
- Die Transpiration und Assimilation der Pflanzen konnten nicht befriedigend überwacht werden.

Im zweiten Ansatz wurden die Acrylglashauben durch einen kontinuierlichen Luftstrom belüftet. Der Belüftungsstrom wurde über Durchflussmesser (Fa. Fischer &

Porter) eingestellt. Er wurde in weiten Bereichen ($0,1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} - 11,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) variiert, um die mögliche Nachweisgrenze von N_2O im Luftstrom dieses Versuchsansatzes zu bestimmen. Bei Belüftungsströmen, die ausreichten die überschüssige Feuchtigkeit aus den Hauben zu entfernen und die CO_2 -Versorgung der Versuchspflanzen sicherzustellen, war die Bestimmung von Emissionsraten wegen zu geringer Konzentrationsunterschiede im Vergleich zur Außenluft nicht mehr möglich. In der Regel lag dies nicht an der Nachweisempfindlichkeit des verwendeten Gaschromatographen, sondern am Rauschen in der ambienten N_2O -Konzentration. Dieses Rauschen ist begründet in teilweise sehr schnellen Wechseln der N_2O -Konzentration in bodennahen Luftschichten (vgl. Abb. 1.1). Es konnte bei dieser Versuchsanordnung, vor allem wegen der hohen Volumenströme, nicht sichergestellt werden, dass die für einen Vergleich der Emissionsraten der Pflanzen herangezogene Außenluft die N_2O -Konzentration aufwies wie die Luft, die für die Versorgung der Hauben verwendet wurde. Das Hauptproblem bestand darin, dass es nicht möglich war, zur gleichen Zeit an zwei verschiedenen Orten Proben zu nehmen.

2.2.3 Direkte Messung mit spektroskopischen Verfahren:

NDIR und Photoakustik

Beide Messmethoden basieren auf der Eigenschaft einiger Gase, unter die sich auch die klimarelevanten Gase einreihen, Licht bestimmter Wellenlängen zu absorbieren. In Abhängigkeit des zu messenden Gases, kann es je nach verwendeter bzw. verwendbarer Wellenlänge zu sogenannten Querempfindlichkeiten kommen. Querempfindlichkeiten werden durch Gase verursacht, die nicht gemessen werden sollen, allerdings Licht der zur Messung verwendeten Wellenlänge absorbieren. Diese werden in den meisten Fällen durch Wasserdampf aber auch durch CO_2 verursacht. Querempfindlichkeiten können kompensiert werden, in dem die Konzentration des störenden Gases mit einer anderen Lichtwellenlänge bestimmt wird. Danach wird die Interferenz mit je nach Gerätehersteller unterschiedlichen, mathematischen Verfahren herausgerechnet. Beiden Verfahren ist gemeinsam, dass

sie die zu messende Probe automatisch über eine gasdichte Pumpe in eine Messzelle saugen. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt in der zur Konzentrationsbestimmung herangezogenen Wirkung des zur Messung verwendeten Lichts.

Bei der NDIR wird die durch das zu messende Gas verursachte Extinktion zur Konzentrationsbestimmung herangezogen. Unter Extinktion wird der Intensitätsunterschied eines Lichtstrahls vor Eintritt in eine Messzelle und nach dessen Austritt aus ihr verstanden.

Bei der Photoakustik wird die Energiewirkung des absorbierten Lichts zur Konzentrationsbestimmung genutzt. Durch das Licht wird den Molekülen Energie zugeführt, welche in der Regel in Bewegungsenergie (Kinetische-) umgewandelt wird. Dadurch wird das Gas heißer und erzeugt in einer abgeschlossenen Messkammer einen höheren Druck. Wird nun das zur Anregung der Gasmoleküle verwendete Licht abgeschaltet, so werden die Moleküle wieder langsamer, das Gas kühlt aus. Der Druck verringert sich. In Abhängigkeit von der Frequenz, mit welcher das Licht an- und wieder ausgeschaltet wird, lässt sich Schall einer bestimmten Frequenz erzeugen. Dieser Schall wiederum kann von empfindlichen Mikrofonen erfasst und aufgrund unterschiedlicher Amplituden (Lautstärke) in Konzentrationen umgewandelt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit war es nur möglich, das photoakustische Verfahren zu evaluieren, da nur die Fa. *Innova AirTech Instrumens* in der Lage war, ein Vorführgerät zu diesem Zweck zur Verfügung zu stellen. Zudem lag die Nachweisempfindlichkeit der auf dem Markt erhältlichen NDIR Messgeräte für die hier behandelten Fragen außerhalb des tolerierbaren Grenzbereichs.

Für die Evaluierung dieses Messsystems wurde nur der unter Kap. 2.2.2 beschriebene Ansatz mit kontinuierlichem Luftstrom verwendet. Die absolute Vorteilhaftigkeit dieses Systems im Vergleich zu den oben beschriebenen ergibt sich aus folgenden Vorteilen:

- Hoher täglicher Probendurchsatz mit bis zu 1440 Proben á bis zu sechs verschiedenen Gasen in 24 Stunden.

- Geringer Wartungs- und Betriebsaufwand, da keine Referenzgase für den Betrieb nötig sind.
- Eine Kalibrierung ist je nach Einsatz nur alle drei Monate oder gar nur jährlich nötig.
- Die Messung von bis zu sechs Gasen ermöglicht eine sehr gute Überwachung des Gaswechsels der Pflanzen, zumal CO₂ und H₂O neben N₂O bestimmt werden können.
- Durch die Verwendung eines Messstellenumschalters ist es möglich, vor und nach der Messung eines Versuchsgefäßes die Gaskonzentration des Belüftungsstromes zu messen. Mit diesem zweiseitigen Vergleich gelang es, die in Kap. 2.2.2 beschriebenen und in Abb. 1.1 dargestellten, starken Schwankungen der Lachgaskonzentration in der Außenluft, bezogen auf die Relevanz für die durchzuführenden Versuche, zu glätten.

2.3 Vergleich der photoakustischen Messung mit der Gaschromatographie

Unabhängig vom experimentellen Aufbau wurden die Lachgaskonzentrationen in bisherigen Untersuchungen vorwiegend gaschromatographisch bestimmt. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den verschiedenen Methoden zu gewährleisten und zur Überprüfung der durch den Hersteller (*Innova AirTech Instruments*) am Multigasmonitor vorgenommenen Eichung, wurden Vergleichsmessungen mit Standardgasgemischen bekannter Konzentration und mit Gasgemischen unbekannter Konzentration durchgeführt.

2.3.1 Methodik der Vergleichsmessungen

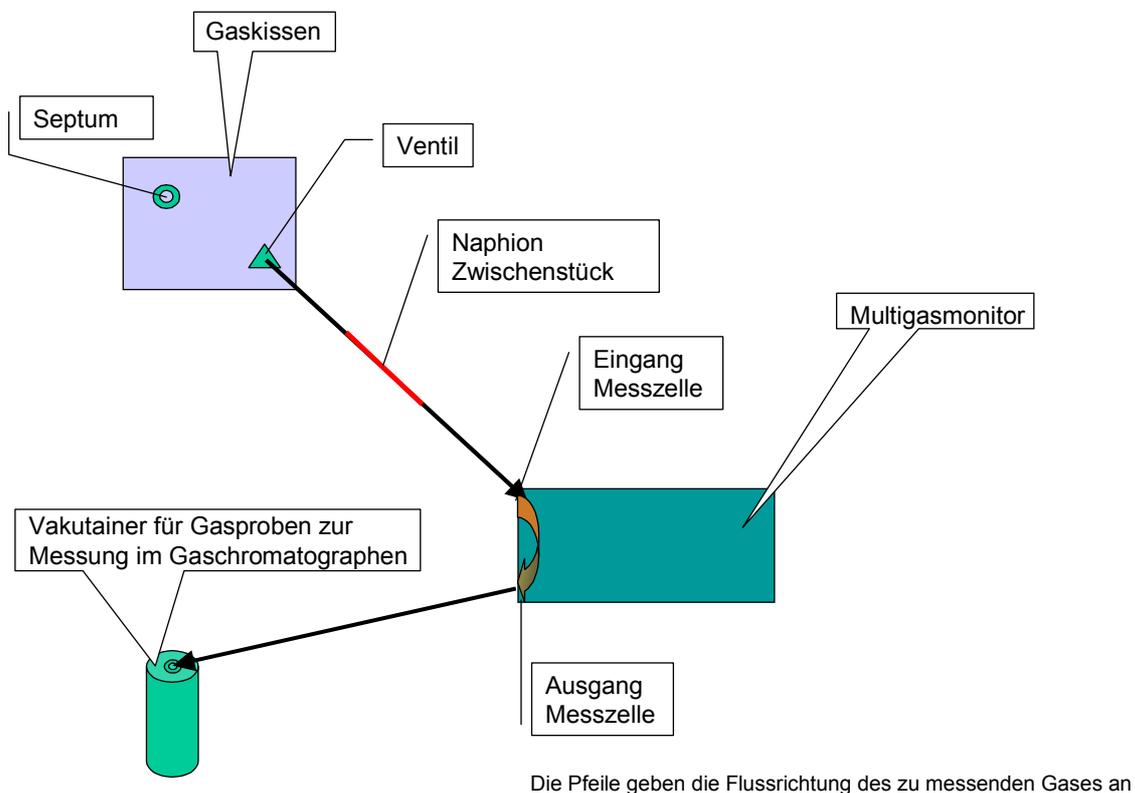


Abb. 2.3.1.1: Versuchsaufbau zur Durchführung der Vergleichsmessungen zwischen Gaschromatographie und Photoakustik.

Abbildung 2.3.1.1 zeigt den Versuchsaufbau, der zur Durchführung der Vergleichsmessungen verwendet wurde. Aus einem Gaskissen (Fa. *Linde*) saugte der Multigasmonitor über einen Naphionschlauch die zu messende Gasprobe an. Der

Naphionschlauch wurde benötigt, um den sehr trockenen Standardgasgemischen Feuchtigkeit zuzuführen, da die Eichung für Lachgas für einen Feuchtigkeitsbereich von 0 - 20 °C Taupunkt durchgeführt worden war. Nach der Messung wurde die gemessene Probe in einen Vakutainer überführt. Diese wurde mit einem Autosampler mit dem GC gemessen. Mit dieser Anordnung wurde das Ziel verfolgt, dieselbe Gasprobe zuerst im Multigasmonitor und danach im Gaschromatographen zu messen, um Fehlerquellen bei der Probennahme zu minimieren.

2.3.2 Ergebnis der Vergleichsmessungen

Die Vergleichsmessungen ergaben sowohl für N₂O (Abb. 2.3.2.1) als auch für CH₄ (Abb. 2.3.2.2) sehr gute lineare Zusammenhänge. Das Bestimmtheitsmaß (r^2) von 0,9948 für die Lachgasmessungen und 0,984 für die Methanmessungen erfüllt die üblichen Erwartungen für Kalibrationsgeraden. Aufgrund des linearen Zusammenhangs war es möglich, Ergebnisse anderer Untersuchungen, die mit einem GC gemessen wurden, mit den Messungen des Multigasmonitors zu vergleichen.

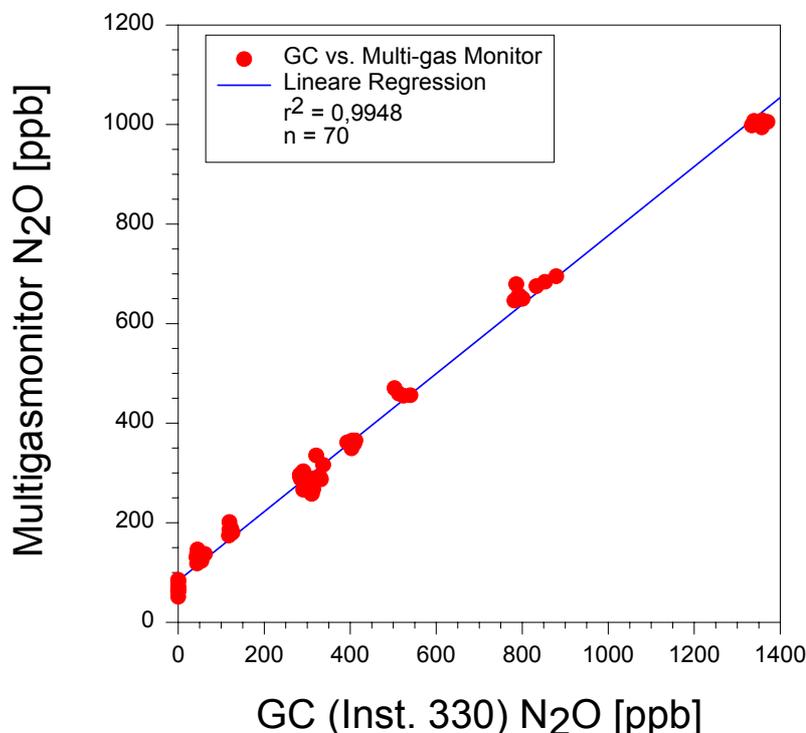


Abb. 2.3.2.1: Ergebnisse der Vergleichsmessungen für N₂O zwischen dem im Institut für Pflanzenernährung (Inst. 330) für Lachgasmessungen verwendeten Gaschromatographen und dem Multigasmonitor 1312 der Firma *Innova AirTech Instruments* (Dänemark).

Allerdings schien die Eichung des Multigasmonitors bei diesen Versuchen nicht befriedigend gewesen zu sein, da vor allem in hohen Konzentrationsbereichen die Messwerte der beiden Geräte voneinander abwichen. Diese Abweichungen waren nach einer erneuten Kalibrierung beseitigt.

Für CO₂ wurden keine Vergleichsmessungen mit dem Gaschromatographen durchgeführt, da die atmosphärische Konzentration vergleichsweise hoch ist und Querempfindlichkeiten anderer Gase eine untergeordnete Rolle spielen.

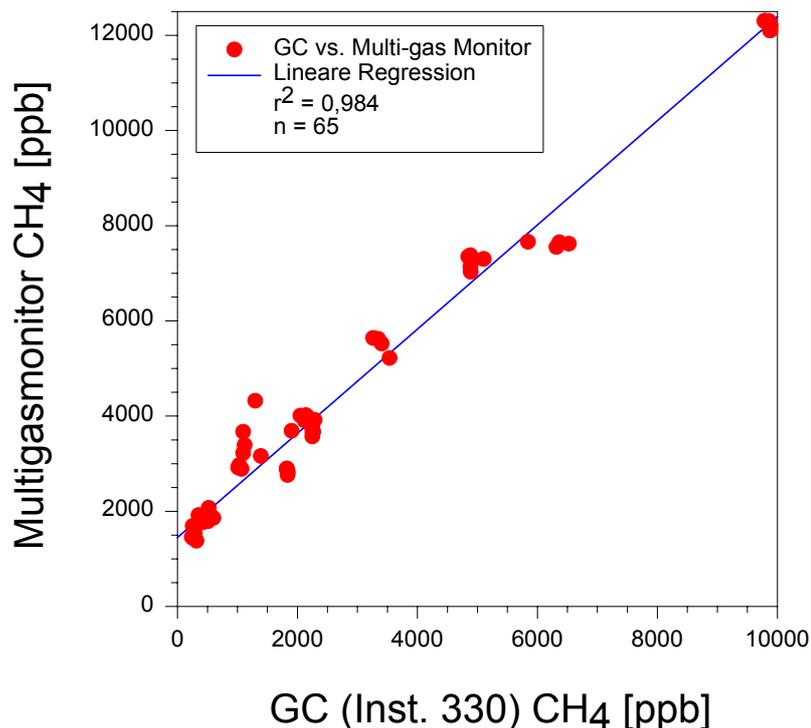


Abb. 2.3.2.2: Ergebnisse der Vergleichsmessungen für CH₄ zwischen dem im Institut für Pflanzenernährung (Inst. 330) für CH₄-Messungen verwendeten Gaschromatographen und dem Multigasmonitor 1312 der Firma *Innova AirTech Instruments* (Dänemark).

2.4 Überprüfung der Kompensation für Wasserdampf

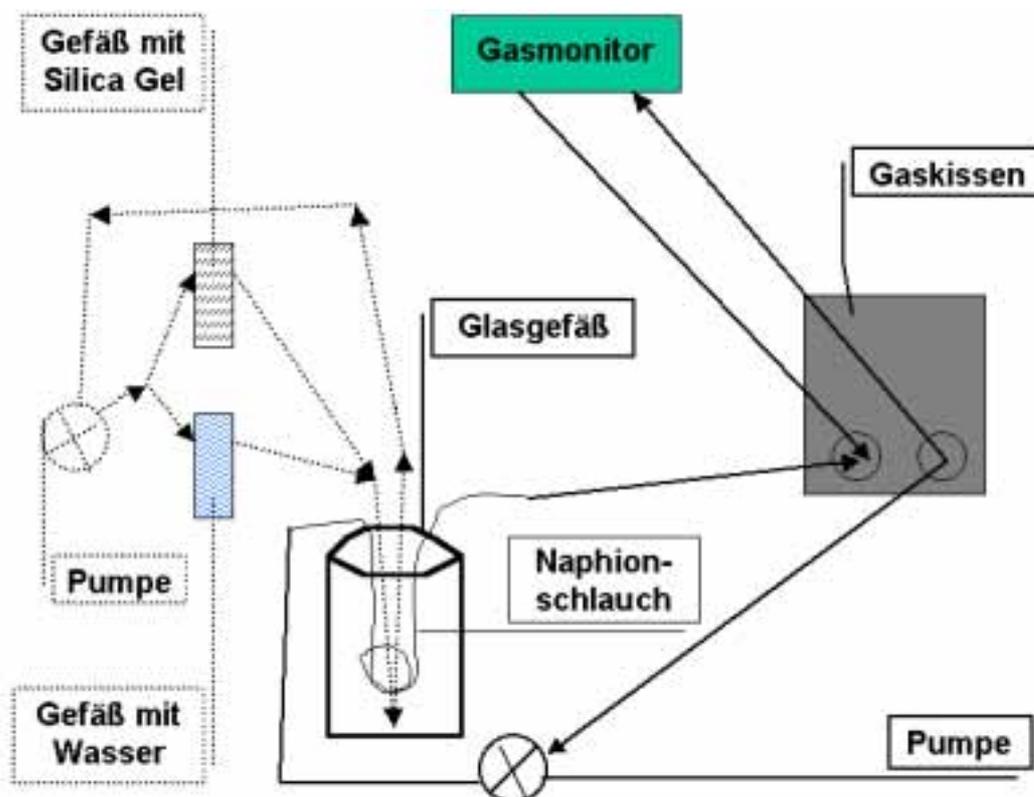


Abb. 2.4.1: Versuchsaufbau zur Durchführung der Messungen zur Prüfung der Feuchtigkeitskompensation.

Wasserdampf ist das wichtigste klimarelevante Gas in der Atmosphäre. Wassermoleküle adsorbieren in sehr vielen Wellenlängen Licht. Somit wirkt Wasserdampf häufig als Störgas bei der Messung klimarelevanter Spurengase. Um bei den davon betroffenen Gasen mögliche Messfehler zu vermeiden, führt der Multigasmonitor eine Querkompensation durch.

Da aus Vorversuchen erkannt wurde, dass bei der Versuchsdurchführung ein hoher Wassergehalt in den Gasproben zu erwarten ist (vgl. Abb. 2.2.1), wurde die Querkompensation überprüft (Abb. 2.4.2 – 2.4.6 und Tab. 2.4.1).

Die Abbildung 2.4.1 (s. o.) zeigt den schematischen Versuchsaufbau zur Überprüfung der Kompensation von Wasserdampf in den Proben. Das zu messende

Gas wurde über einen Naphionschlauch durch einen zusätzlichen Luftstrom im mehrfachen Wechsel befeuchtet und getrocknet. Der Naphionschlauch besteht aus einer organischen Verbindung (Naphion) mit semipermeablen Eigenschaften die für z. B. Wasser und Ammoniak durchlässig und für Gase wie CO_2 und N_2O undurchlässig ist. Aufgrund dieser semipermeablen Eigenschaften ist es möglich Gasproben zu befeuchten oder zu trocknen.

Da die Messung von Lachgas auch von CO_2 gestört werden kann, wurde der Störeinfluss von CO_2 ebenfalls untersucht (Abb. 2.4.5 u. 2.4.6 u. Tab. 2.4.1).

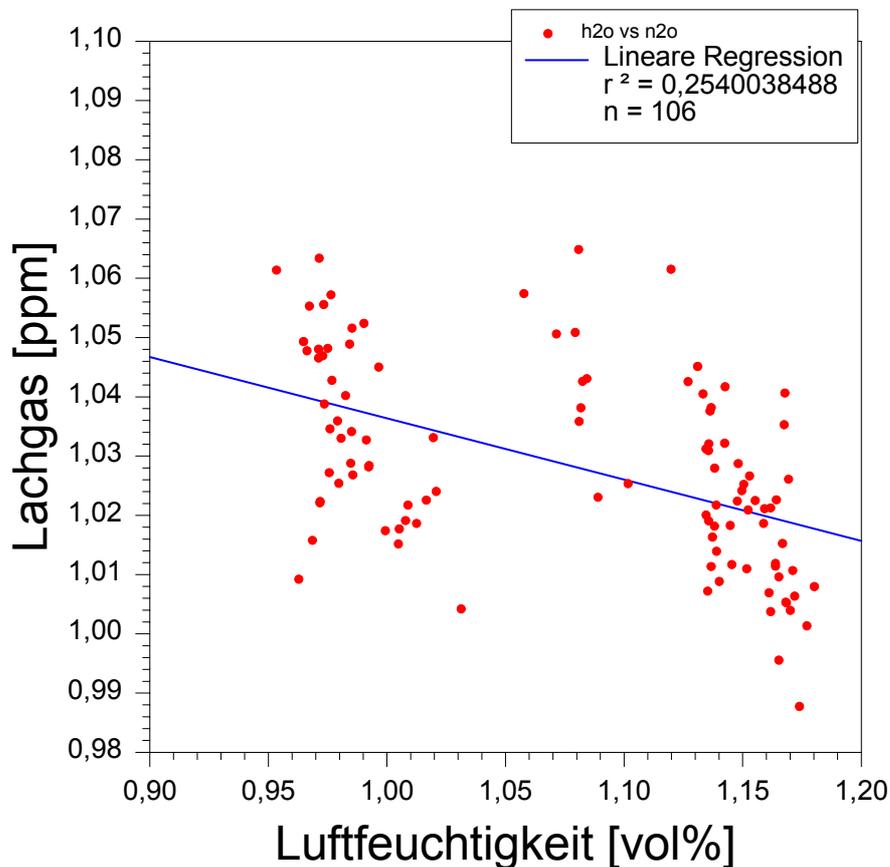


Abb. 2.4.2: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.

Die Abb. 2.4.2 zeigt die einzelnen Messwerte von insgesamt 106 Messungen bei variiertem Luftwassergehalt. Es ist zu erkennen, dass die eingezeichnete Regressionsgerade nicht signifikant ist, also keine Abhängigkeit der N_2O Messung

von der Luftfeuchtigkeit im überprüften Messbereich vorliegt.

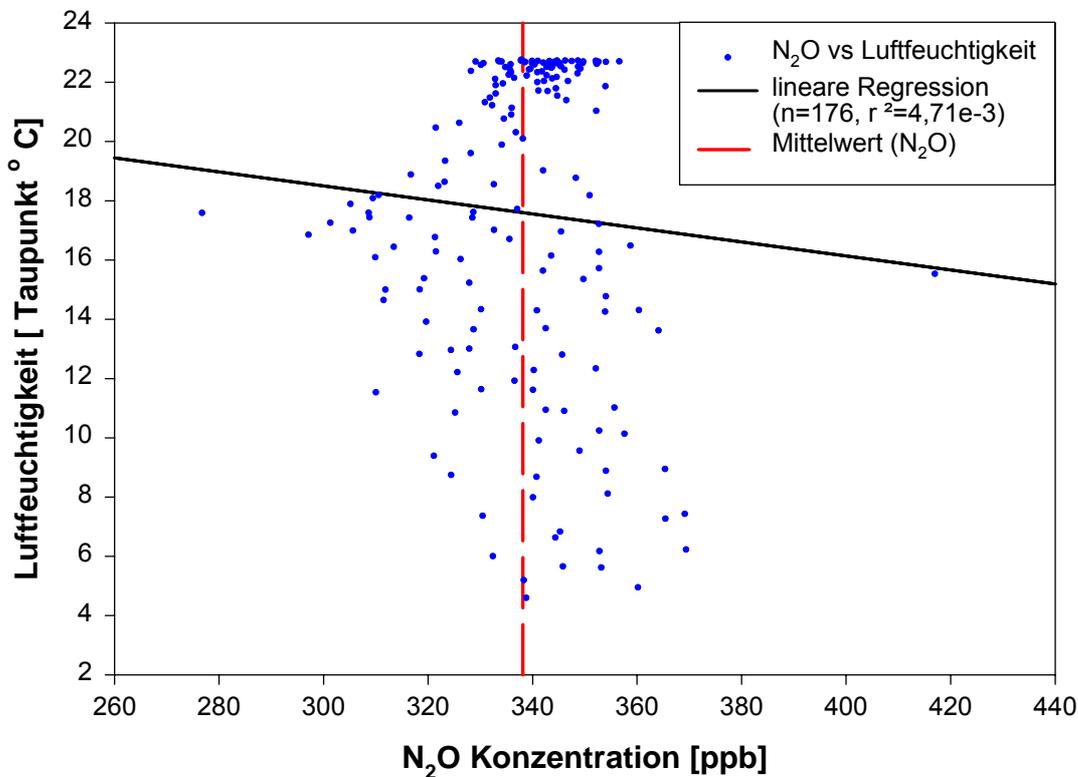


Abb. 2.4.3: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.

Abbildungen 2.4.3 zeigt die Messungen jeweils einer Lachgaskonzentration in einem Gasgemisch für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen vier und 23°C Taupunkt, wobei der Multigasmonitor für den Bereich von null bis zwanzig °C Taupunkt kalibriert war. Die Abbildung enthält den Mittelwert der Lachgaskonzentration aus 176 Einzelwerten. Er ist als unterbrochene Linie eingezeichnet. Als durchgezogene Linie ist das Ergebnis einer linearen Regression dargestellt, die verdeutlicht, dass es keinen ausgeprägten Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt der Messprobe und Lachgaskonzentrationsmessung gibt. Die unterschiedlichen Feuchtigkeiten wurden durch die Integration eines Naphionschlauches in den Versuchsaufbau realisiert.

Die Vergleichsmessungen von Lachgas mit einem Gaschromatographen und dem

Multigasmonitor bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeitsgehalten sind in Abb. 2.4.4 dargestellt. Es sind 24 Messungen mit dem Gaschromatographen und 65 Messungen mit dem Multigasmonitor eingezeichnet. Auch diese Abbildung zeigt, dass für den überprüften Luftfeuchtigkeitsgehalt kein Zusammenhang zwischen den Messwerten für Lachgas und dem Wassergehalt der Proben gefunden wurde.

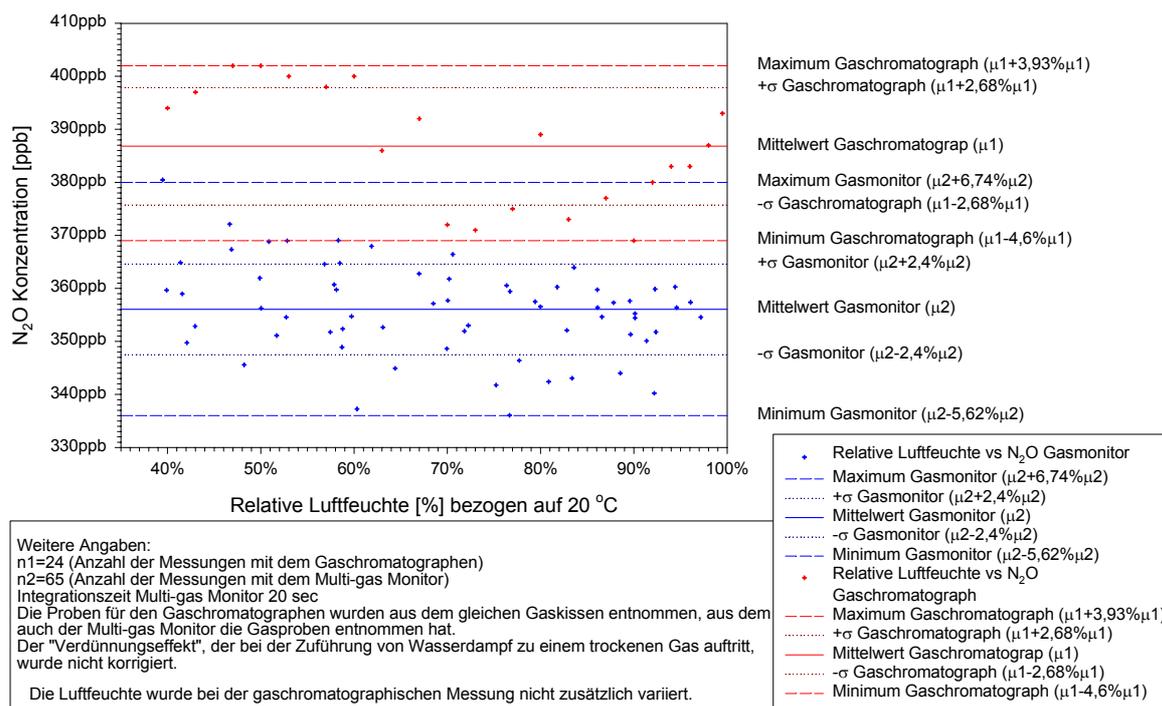


Abb. 2.4.4: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch mit dem Gaschromatographen und einem photoakustischen Messgerät. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.

In den Abbildungen 2.4.5 bis 2.4.6 sind die Ergebnisse der Messungen einer CO_2 -Konzentration in einem Gasgemisch bei unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten dargestellt. Die Abbildung 2.4.5 enthält 176 Messwerte, den errechneten Mittelwert und die daraus ermittelte Regressionsgerade. Der überprüfte Luftfeuchtigkeitsgehalt lag zwischen vier und $23^\circ C$ Taupunkt. Der Multigasmonitor war für den Bereich von null bis zwanzig $^\circ C$ Taupunkt kalibriert. Wie für Lachgas ergab auch die lineare Regression bei den CO_2 -Messungen keinen ausgeprägten Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt der Gasprobe und der gemessenen CO_2 -Konzentration.

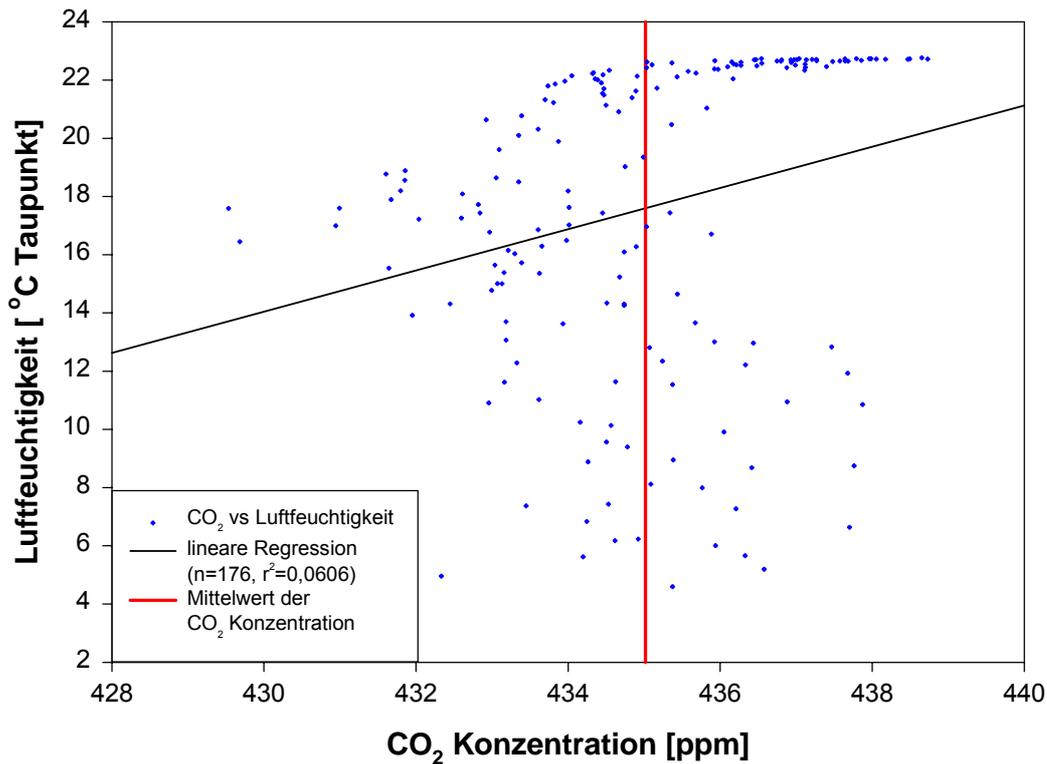


Abb. 2.4.5: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von CO₂ in einem Gasgemisch. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.

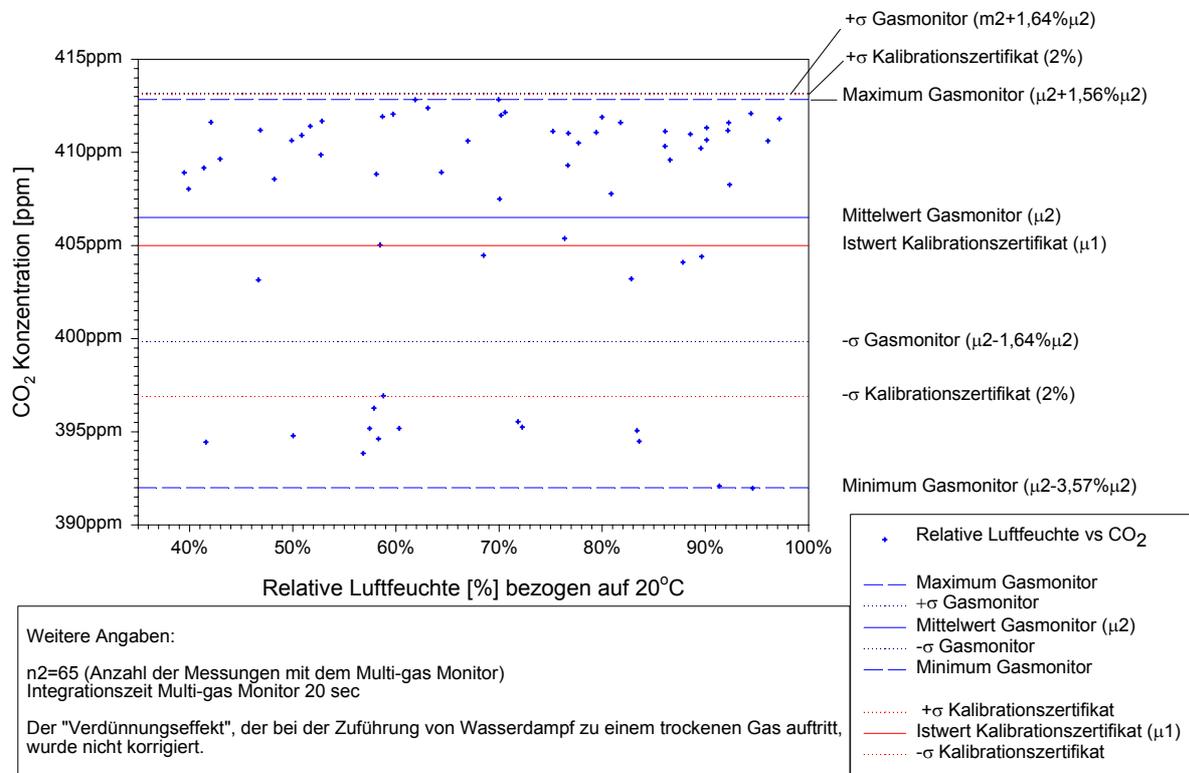


Abb. 2.4.6: Überprüfung der Querkompensation von Wasserdampf bei der Messung von Lachgas in einem Gasgemisch im Vergleich zu den Zertifikatsangaben des verwendeten Kalibrationsgases. Die in dieser Grafik gezeigten Messwerte sind Ergebnisse des gleichen Gemisches bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt.

In der Abbildung 2.4.6 sind 65 Messungen mit dem Multigasmonitor bei unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten im Vergleich mit den Zertifikatsangaben des für die Messungen verwendeten Kalibrationsgases dargestellt. Auch diese Abbildung lässt keinen Einfluss der betrachteten unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalte auf die CO₂-Messung erkennen.

Die Tabelle 2.4.1 gibt die Ergebnisse umfangreicherer Messungen wieder, die größere Spannbreiten bei den betrachteten Gasen abdecken, als dies in der grafischen Darstellung (Abb. 2.4.2, nur eine Lachgaskonzentration) der Fall ist.

Tab. 2.4.1: Überprüfung der Querkompensation von CO₂, CH₄ und H₂O bei der Messung von N₂O bei Vorliegen verschiedener Gasgemische und Variation des Feuchtigkeitsgehaltes der Messproben. Negative Werte für die Konzentrationsminima resultieren einerseits aus den jeweils eingestellten Kalibrationsbereichen und andererseits aus der Querkompensation in Messproben, die das gemessene Gas nicht enthielten.

	Min.	Max.	Lineare Regression Bestimmtheitsmaß r^2	Abhängigkeits- vergleich mit	Wertepaare (Anzahl)	Block
N ₂ O (ppm)	-0,451	1670			2000	1
CO ₂ (ppm)	-7,11	1070	0,00436	N ₂ O	1957	
CH ₄ (ppm)	-0,0951	81,7	0,00273	N ₂ O	1666	
H ₂ O (Vol %)	0,0280	3,25	0	N ₂ O	2000	
N ₂ O (ppb)	0,191	10,2			2000	2
CO ₂ (ppm)	356	983	0,00544	N ₂ O	2000	
CH ₄ (ppm)	3,3	15,1	0	N ₂ O	2000	
H ₂ O (Vol %)	1,31	3,25	0,00126	N ₂ O	2000	
N ₂ O (ppb)	-0,633	10,2			2000	3
CO ₂ (ppm)	-3,777	643	0,339	N ₂ O	2000	
CH ₄ (ppm)	3,06	20,2	0,19	N ₂ O	1804	
H ₂ O (Vol %)	1,4	2,88	0	N ₂ O	2000	
N ₂ O (ppb)	0,15	12,6			2000	5
CO ₂ (ppm)	0,15	636	0,0882	N ₂ O	2000	
CH ₄ (ppm)	2,82	435	0,239	N ₂ O	2000	
H ₂ O (Vol %)	1,34	3,37	0,0929	N ₂ O	2000	
N ₂ O (ppb)	0,124	0,257			2000	5
CO ₂ (ppm)	134	920	0,069	N ₂ O	2000	
CH ₄ (ppm)	2,31	10,3	0,013	N ₂ O	2000	
H ₂ O (Vol %)	1,17	3,14	0,073	N ₂ O	2000	

In der Tabelle 2.4.1 sind darüber hinaus auch die Ergebnisse der Überprüfung der Querkompensation des Multigasmonitors für die Gase CH₄ und CO₂ bei der

Lachgasmessung wiedergegeben. Der Einfluss der Konzentration der jeweiligen Gase auf die Messung der Lachgaskonzentration wurde mit linearen Regressionen untersucht. Das damit errechnete Bestimmtheitsmaß (r^2) gibt Auskunft über die Höhe auftretender Korrelationen. Dabei bedeutet ein Bestimmtheitsmaß von 1 (-1) dass ein strenger positiver (negativer) linearer Zusammenhang gefunden wurde. Ein Wert von null für das Bestimmtheitsmaß bedeutet, dass keine Zusammenhänge vorliegen. Da sowohl in der Abbildung 2.4.2 als auch in der Tabelle 2.4.1 keine Abhängigkeit zwischen der gemessenen Lachgaskonzentration und dem Feuchtigkeitsgehalt, dem CH_4 - und dem CO_2 -Gehalt zu erkennen war, wurde geschlossen, dass die Querkompensation des Multigasmonitors für die angestrebten Versuche hinreichend gut ist. Zwischen den einzelnen Blöcken (1 – 5) von jeweils 2000 Werten in der Tabelle 2.4.1 wurden sowohl die Konzentration der Luftfeuchtigkeit als auch die Konzentration der anderen Gase in jeweils unterschiedlichem Umfang variiert. Die in der Tabelle für die Minima der Gaskonzentrationen enthaltenen negativen Werte resultieren einerseits aus den jeweils eingestellten Kalibrationsbereichen des Messgerätes und andererseits aus der Querkompensation in den Messproben, die das gemessene Gas nicht enthielten.

2.5 Auswahl des Nährmediums

Das Potential von Böden Lachgas zu bilden und zu emittieren, hängt entscheidend von folgenden Eigenschaften der Böden ab:

- Art, Typ, Humus- und Nährstoffgehalt (WEIER et al., 1993; KAISER et al., 1996),
- Gehalt an leicht verfügbaren Kohlenstoffverbindungen (WEIER et al., 1993; AZAM et al., 2002),
- Wasserführung (PENNOCK et al., 1992; WEIER et al., 1993),
- Porenvolumen (DAVIDSON, 1991) und Porenverteilung,
- pH-Wert (KNOWLES, 1981),
- Sauerstoffverfügbarkeit (TIEDJE, 1990) und dem dadurch jeweils bedingten Besatz mit Bodenlebewesen (Regenwürmer, Mikrofauna und –flora etc.).

Außerdem variiert das Potential von Böden Lachgas zu bilden und zu emittieren ebenfalls aufgrund des Pflanzenbestandes und dessen Dichte. Um diesen Einfluss und eventuell damit verbundene Unterschiede zwischen verschiedenen Versuchsvarianten zu vermeiden, wurden die Versuche ausschließlich in hydroponischen Kulturen durchgeführt. Die Zusammensetzung der Nährlösung entsprach der am Institut für Pflanzenernährung (330) der Universität Hohenheim üblichen Standardnährlösung. Diese war für Dikotyle (Tab. 2.5.1) und Monokotyle (Tab 2.5.2) jeweils unterschiedlich (ERENOGLU, mündliche Mitteilung 1999).

Tab. 2.5.1: Standardnährlösung für monokotyle Pflanzen, wie sie am Institut für Pflanzenernährung (330) der Universität Hohenheim eingesetzt wird.

Nährsalz	Konzentration	Nährsalz	Konzentration
K ₂ SO ₄	0,7*10 ⁻³ M	H ₃ BO ₃	1*10 ⁻⁶ M
KCl	0,1*10 ⁻³ M	MnSO ₄	5*10 ⁻⁷ M
Ca(NO ₃) ₂	2,0*10 ⁻³ M	ZnSO ₄	5*10 ⁻⁷ M
MgSO ₄	0,5*10 ⁻³ M	CuSO ₄	2*10 ⁻⁷ M
KH ₂ PO ₄	0,1*10 ⁻³ M	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	1*10 ⁻⁸ M

Tab. 2.5.2: Standardnährlösung für dikotyle Pflanzen, wie sie am Institut für Pflanzenernährung (330) der Universität Hohenheim eingesetzt wird.

Nährsalz	Konzentration	Nährsalz	Konzentration
K ₂ SO ₄	0,7*10 ⁻³ M	H ₃ BO ₃	1*10 ⁻⁵ M
KCl	0,1*10 ⁻³ M	MnSO ₄	5*10 ⁻⁷ M
Ca(NO ₃) ₂	2,0*10 ⁻³ M	ZnSO ₄	5*10 ⁻⁷ M
MgSO ₄	0,5*10 ⁻³ M	CuSO ₄	2*10 ⁻⁷ M
KH ₂ PO ₄	0,1*10 ⁻³ M	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	1*10 ⁻⁸ M

Zum Ansetzen der Nährlösung wurde deionisiertes Wasser verwendet. Dadurch konnte die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche langfristig sichergestellt werden. Um den pH-Wert der Nährlösung zu puffern, wurde in die jeweiligen Versuchsgefäße ca. 5g Marmorgranulat (CaCO₃, Merck) zugegeben.

Die Durchführung der Versuche in Nährlösung brachte zusätzlich noch weitere Vorteile mit sich. So konnte die Lachgaskonzentration, die im Wurzelraum angeboten wurde, genauer eingestellt und gemessen werden. Eine homogene Durchmischung und somit ein homogenes Lachgasangebot war leichter zu verwirklichen. Darüber hinaus ließ sich ein künstliches und zusammenhängendes Gasvolumen in Form eines Luftkissens zum Angebot lachgasangereicherter Luft zu den basalen Wurzelzonen etablieren (vgl. Abb. 3.2.4).

2.6 Aus den Vorversuchen resultierende Anforderungen an die Methodik

Abbildung 2.6.1 zeigt den Verlauf der Lachgaskonzentration bei Reis unter einer Acrylglasabdeckung bei Lichteinstrahlung mit und ohne Belüftung mit Außenluft und die Lachgaskonzentrationen der Außenluft bei Kultur in Standardnährlösung. Es fand keine Anreicherung des Nährmediums mit N_2O statt. Mit beginnender Belüftung der Haube ist ein sofortiger Abfall der Lachgaskonzentration (innerhalb weniger Minuten) festzustellen. Zwar unterschieden sich die Mittelwerte der Konzentrationen in der Außenluft (0,236 ppm) und innerhalb der belüfteten Abdeckung (0,239 ppm), allerdings ließ sich dieser Unterschied wegen der starken Schwankungen der Messwerte statistisch nicht untermauern. Als weiterer Störfaktor kommt noch die unter Kap. 2.2.2 beschriebene Variabilität der N_2O -Konzentrationen in der Außenluft hinzu.

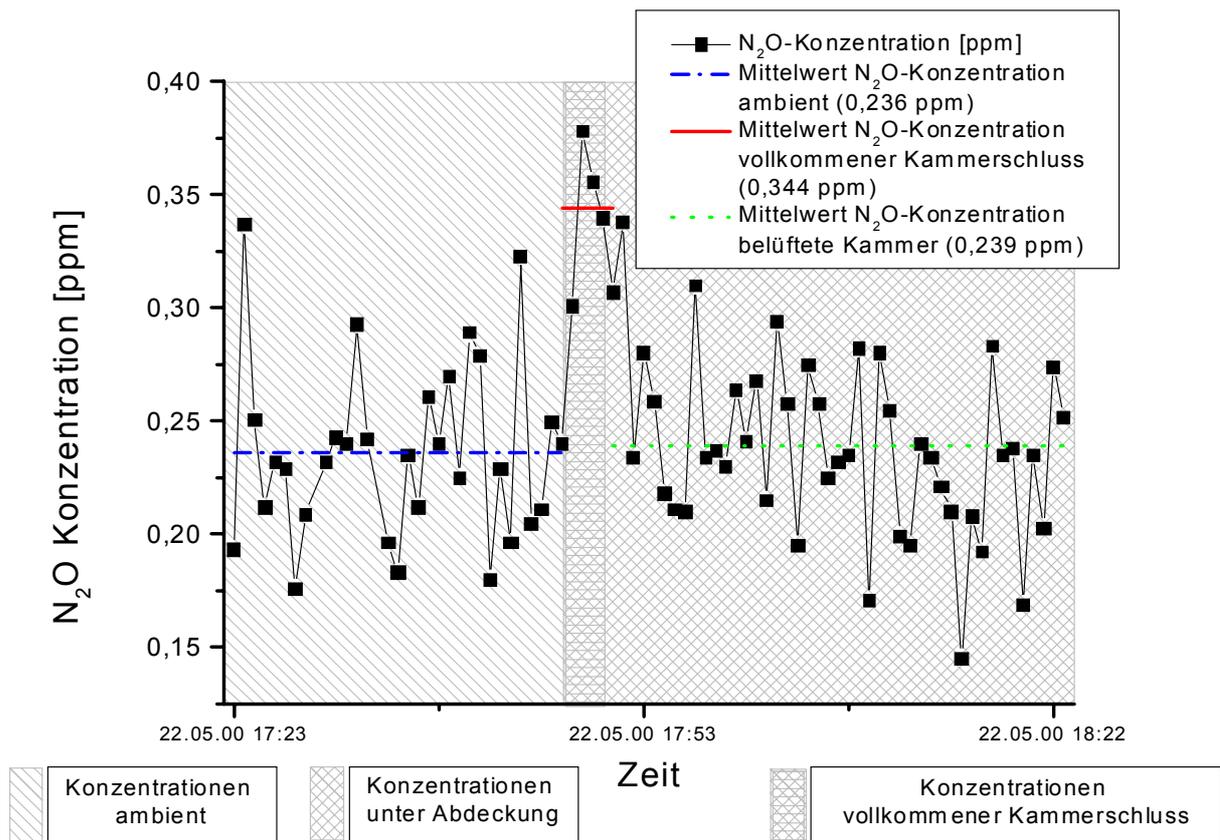


Abb. 2.6.1: Vergleich der Lachgaskonzentrationen in der Außenluft und unter einer pflanzenbewachsenen Acrylglasabdeckung bei vollkommenem Kammerschluss und mit kontinuierlicher Belüftung. Versuchspflanze Reis (*Oryza sativa* L. cv. 94D-22)

Aufgrund dieses Ergebnisses und der weiter oben dargestellten Vorversuche wurden zusammenfassend folgende Anforderungen an den Versuchsaufbau für die Messung von Lachgasemissionen über Pflanzen abgeleitet:

- Eine ausreichende Belüftung der Versuchsgefäße muss zur CO₂-Versorgung der Pflanzen und zur Entfernung überflüssiger Luftfeuchtigkeit sichergestellt werden.
- Der zur Belüftung verwendete Luftstrom muss der Entwicklung der Pflanzen kontinuierlich angepasst werden können.
- Sowohl die Luftfeuchtigkeit als auch CO₂-Konzentrationen müssen neben N₂O kontinuierlich mitgemessen werden. Einerseits um eine Bezugsbasis für eventuelle Emissionen zu haben, andererseits um eine ungestörte Pflanzenentwicklung sicherstellen zu können.
- Um eventuelle Lachgasemission durch Pflanzen nachweisen zu können, muss eine hohe N₂O-Anreicherung im Nährmedium des Wurzelraums vorliegen, damit die Nachweisgrenze überschritten wird (Abb. 2.6.1).
- Zur sicheren Trennung von Wurzel- und Sprosskompartimenten, um Emissionen zweifelsfrei detektieren zu können, muss gasdichte Dichtungsmasse verwendet werden
- Um bodenbedingte Einflüsse zu eliminieren, sollte Nährlösung statt Boden als Kulturmedium im Wurzelraum verwendet werden.
- Durchführung eines zweiseitigen Vergleichs der gemessenen Gaskonzentrationen unter einer Abdeckung mit gemessenen Gaskonzentrationen in der Außenluft um Emissionsunterschiede möglichst genau zu erfassen.
- Es sind kontinuierliche Messungen mit Licht und in Dunkelheit durchzuführen, um eventuelle diurnale Unterschiede zu erfassen.

- Eine ausreichende Wiederholungsanzahl innerhalb verschiedener Versuchsvarianten ist zu realisieren. Einerseits zur Überprüfung der Gasdichtigkeit, andererseits zur Ableitung statistisch aussagekräftiger Ergebnisse.

Kapitel 3.

ALLGEMEINE METHODIK

3.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Abbildung 3.1.1 gibt den schematischen Versuchsaufbau mit einem offenen Kulturgefäß wieder. Die Kulturgefäße (Abb. 3.1.2) waren durch eine Mittelplatte (Abb. 3.1.3) in zwei Kompartimente unterteilt. In ein Wurzelkompartiment und ein Sprosskompartiment (Abb. 3.1.4). Die Mittelplatte bestand aus PVC-Vollkunststoff und war auf der Ober- und Unterseite mit O-Ringen bestückt (Abb. 3.1.3). Diese dienten zum gasdichten Verschließen der beiden Kompartimente. Die Mittelplatte verfügte über fünf symmetrisch angeordnete Bohrungen, in die die Versuchspflanzen eingebracht wurden. Das Wurzelkompartiment bestand aus einer undurchsichtigen Abwasserröhre aus PVC (Abb. 3.1.4 a. und b.), die auf der Unterseite mit einer Bodenplatte aus PVC verschlossen war. Das Volumen betrug 3100 ml \pm 5 %. Am oberen Ende war die Röhre mit zwei Bohrungen ausgestattet. Diese Bohrungen waren sowohl innen als auch außen mit Schlauchmuffen bestückt. Sie dienten zur Umwälzung und Gasanreicherung (mit N_2O) des Nährmediums.

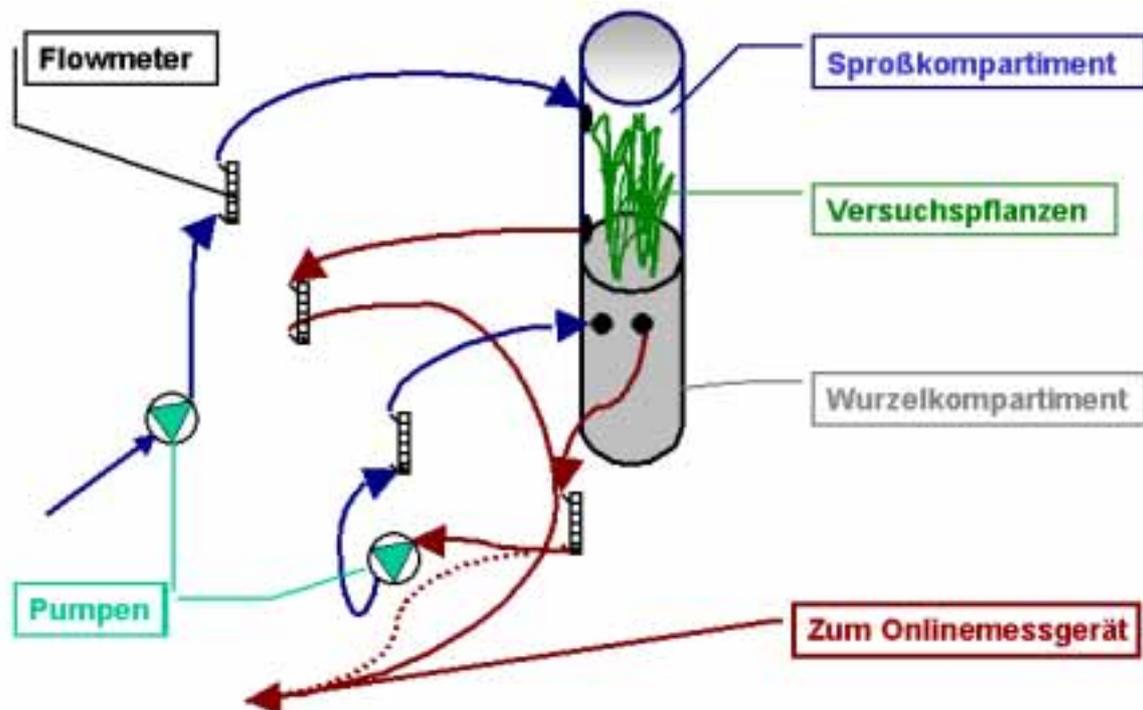


Abb. 3.1.1: Schematische Darstellung des kontrolliert offenen Systems. Die Pfeile zeigen die Richtung der Luft- bzw. Flüssigkeitsströme an.

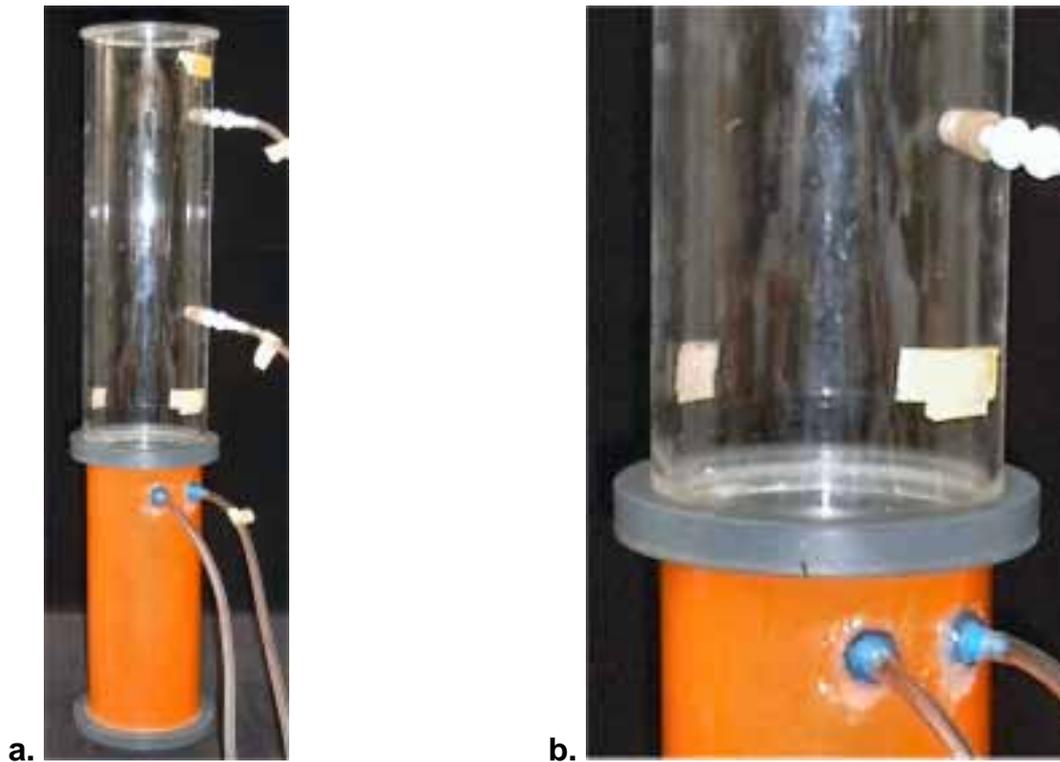


Abb. 3.1.2: Ansicht eines aufgebauten Kultursystems (a.) und daraus vergrößerte Ansicht des durch die Mittelplatte vermittelten Übergangs von Wurzel- zu Sprosskompartiment (b.).

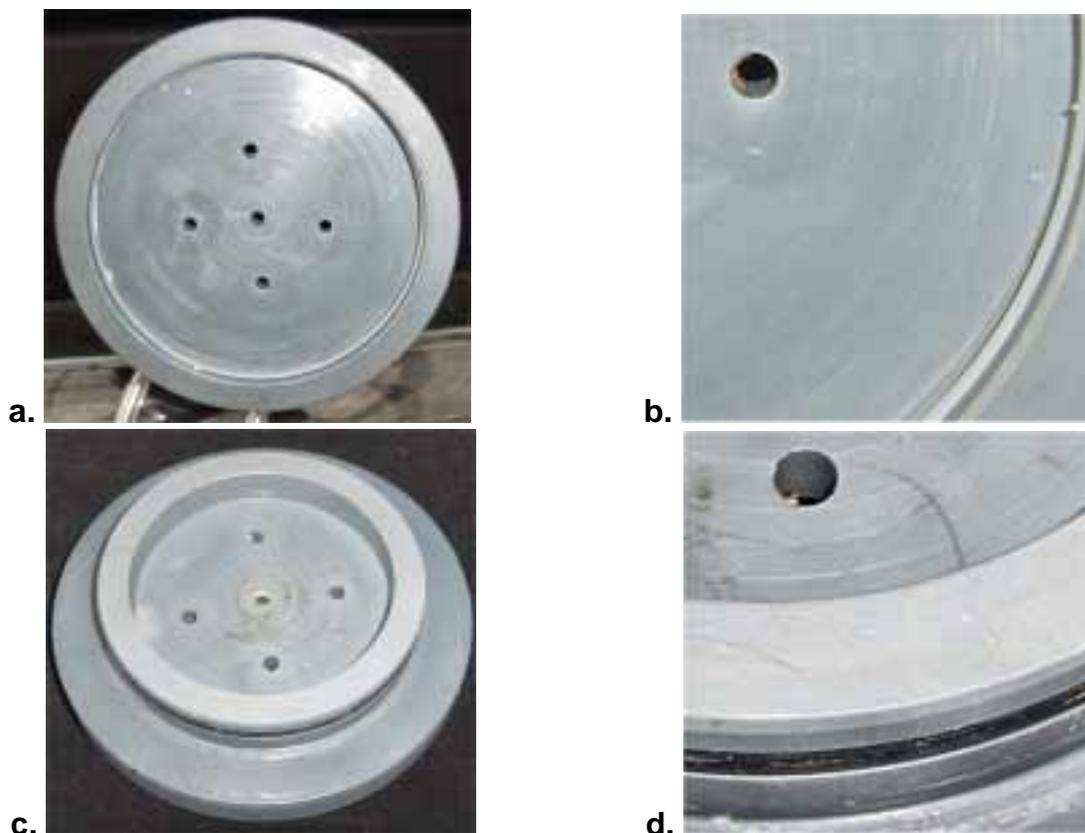


Abb. 3.1.3: Ansicht der Oberseite der Mittelplatte (a.) und daraus vergrößert der innen liegende O-Ring (b.) zur Abdichtung des Sprosskompartiments. Ansicht der Unterseite der Mittelplatte (c.) und daraus vergrößert der außen liegende O-Ring (d.) zur Abdichtung des Wurzelkompartiments.

Im Inneren des Wurzelkompartiments waren zwei unterschiedlich lange Schläuche angebracht (Abb. 3.1.4 b.): der längere diente als Einlass, der kürzere als Auslass für das im jeweiligen Versuch umgewälzte Medium (lachgasangereicherte Nährlösung und / oder lachgasangereicherte Luft im Wurzelkompartiment).

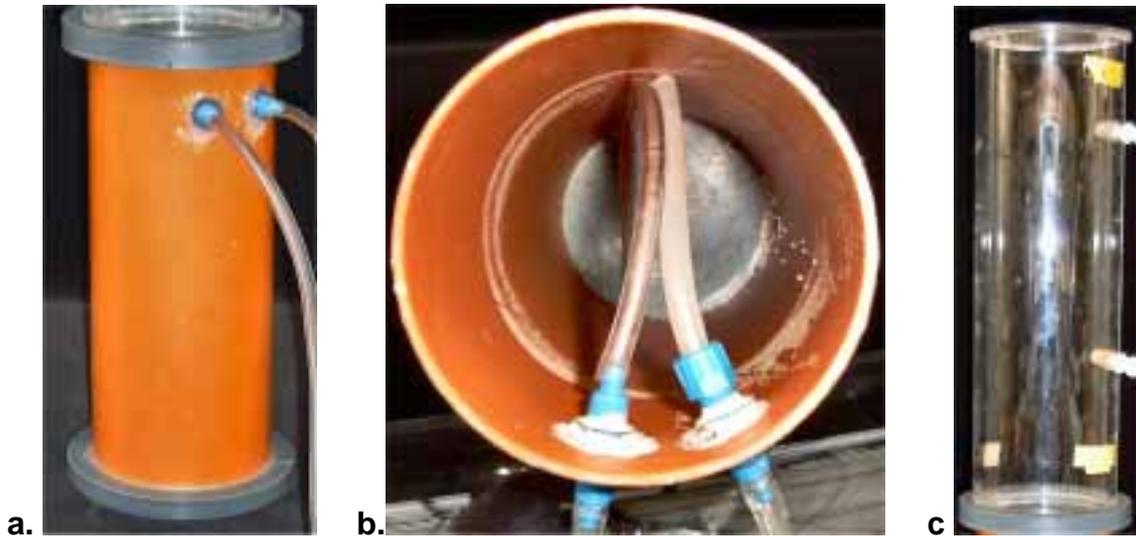


Abb. 3.1.4: Außenansicht des Wurzelkompartiments (a.), Innenansicht des Wurzelkompartiments (b.) und Ansicht des Sprosskompartiments (c.)

Als Sprosskompartiment wurde eine Acrylglasröhre verwendet, die an ihrem oberen Ende mit einer Acrylglasplatte gasdicht verschlossen war. Sie hatte ein Volumen von 5400 ml +/- 1 %. Diese so konstruierte Haube war mit zwei Bohrungen versehen. Jeweils eine im oberen und eine im unteren Drittel. An diese Bohrungen wurden mit Hilfe von Butylgummistopfen mit Innenbohrung und sogenannten Oliven klare PVC-Schläuche mit 5 mm Innendurchmesser angeschlossen. Um auf Grund der Temperaturunterschiede - Außenluft zu Luft innerhalb der Abdeckung – entstehende Turbulenzen zur besseren Durchmischung ausnutzen zu können, wurde die obere Bohrung als Einlass und die untere Bohrung als Auslass für den zur Belüftung eingesetzten Gasstrom verwendet (Abb. 3.1.1).

Die Belüftung der Sprosskompartimente wurde hinsichtlich der CO₂-Nachlieferung und der Entfernung überschüssiger Luftfeuchtigkeit kontinuierlich den Bedürfnissen der Pflanzen angepasst. Der Luftstrom konnte für jedes Kulturgefäß getrennt eingestellt werden. Die Regulation wurde mit mechanischen Durchflussmessern (*Fischer & Porter*) mit Schwebkörpern, so genannten Flowmetern, vorgenommen (Abb. 3.1.5).



Abb. 3.1.5: Mechanische Durchflussmesser (Flowmeter) mit Schwebkörper (Fischer & Porter). Oben die Verstellerschraube. Der eingestellte Fluss wird von den Schwebkörpern (Kugel) angezeigt und an der Skala abgelesen.

Die Belüftungsintensität wurde vor Einleitung der Luft in die Hauben eingestellt. Dies geschah, um zu verhindern, dass sich in den Hauben ein zu großer Staudruck aufbaut. Da nicht für alle Durchflussmesser Kalibrationsdatenblätter vorhanden waren, wurden die Belüftungsraten aller Versuchsgefäße regelmäßig mit dem gleichen, geeichten Durchflussmesser bestimmt. Dazu wurde die Regelschraube vollkommen geöffnet und der durch den Schwebkörper angezeigte Wert aufgezeichnet. Die Messung erfolgte am Abluftstrom. Die so abgelesenen Werte wurden auf die während des Versuchszeitraums herrschende Tagestemperatur (in der Regel 25°C) mit einer durch lineare Interpolation zwischen den Kalibrationsdaten erzeugten Durchflusstabelle in Volumenströme umgerechnet. Die so ermittelten Durchflussraten wurden zur Errechnung der Flussraten im Versuchssystem verwendet. Durch diese Vorgehensweise wurden Fehler, die durch unterschiedliche Eichung entstehen, schon im Vorfeld eliminiert. Zusätzlich konnten hiermit auch schnell undichte Systeme entdeckt werden.

Der obere Teil des Wurzelkompartimentes wurde je nach bearbeiteter Versuchsfrage entweder mit einem kontinuierlichen Luft- oder Nährlösungsstrom versorgt. Diese Versorgung wurde über ein dickwandiges Ausgleichsgefäß aus PE vorgenommen, welches mit einer Lunge, die aus zwei Sekretbeuteln bestand, versehen war. Die Versorgung der Wurzelkompartimente wurde in der Regel als Kreislaufsystem betrieben. Der Durchfluss wurde grob über die verwendete

Pumpenkapazität gesteuert. Die individuelle Versorgungsintensität der einzelnen Versuchsgefäße wurde ebenfalls nur grob über Schlauchklemmen geregelt. Aus folgenden Gründen wurde keine Notwendigkeit gesehen, die Durchflussgeschwindigkeiten im Wurzelraum genau zu bestimmen:

- Betrieb der Versorgung als Kreislauf.
- Einstellung eines Gleichgewichts aufgrund des kontinuierlichen Betriebs.
- Umwälzungskapazität wurde immer weit über dem Bedarf gewählt, um eine Verarmung an dem zu messenden Gas (N_2O in Luft bzw. Nährlösung) im jeweiligen Wurzelmedium auch unter ungünstigsten Bedingungen ausschließen zu können.

In den Versuchen, in denen flüssiges Medium umgewälzt wurde, wurde im Saugverfahren gearbeitet. D. h. das Medium wurde aus den Versuchsgefäßen mit einer Pumpe abgesaugt und in das Ausgleichsgefäß abgegeben. Durch den entstandenen Unterdruck wurde aus dem Ausgleichsgefäß Nährlösung in die Wurzelkompartimente nachgefördert. Durch den so erzeugten Unterdruck in den Versuchsgefäßen wurde aus dem Ausgleichsgefäß die abgesaugte Menge wieder nachgefördert. Dieses Verfahren wurde entwickelt, da in Vorversuchen festgestellt wurde, dass die zur Befestigung der Versuchspflanzen eingesetzten Dichtungsmassen einem hydrostatischen Überdruck nur sehr kurze Zeit standhielten.

In den Versuchen, in denen gasförmiges Medium umgewälzt wurde, wurde im Pumpverfahren (bzw. Druckverfahren) gearbeitet. D. h. das Medium wurde aus dem Ausgleichsgefäß mit einer Pumpe angesaugt und in die Versuchsgefäße gepumpt. Überschüssiges Gas strömte selbständig in das Ausgleichsgefäß zurück.

Die beiden oben dargestellten Anreicherungskreisläufe wurden mit unterschiedlichen Pumpen realisiert und durch ein gemeinsames Ausgleichsgefäß (bzw. Anreicherungsgefäß) geführt.

Die Versorgungsschläuche der Spross- und Wurzelkompartimente wurden jeweils immer gleich lang gewählt, um möglichst immer die gleichen Strömungsverluste und -verhältnisse in allen Versuchsgefäßen und zwischen einzelnen Versuchsreihen zu gewährleisten.

3.2 Versuchsdurchführung

Die jeweils für den Versuch verwendete Pflanzenart wurde in Kristall- und Quarzsand der Körnung 1,6 – 2,5 mm (dorsilit, Fa. *Interseroh Recycling*) ausgesät und bei 25°C zur Keimung gebracht (Abb. 3.2.1). Je nach Pflanzenart wurden die Keimlinge mit einem Alter von einer (Sonnenblume) bis drei (Reis) Wochen nach der Keimung in die Mittelplatten der Versuchsgefäße eingebracht und auf Standardnährlösung gesetzt. Die Pflanzen wurden vom Umsetzungszeitpunkt an unter Acrylglashauben mit kontrollierter Belüftung kultiviert. Dadurch wurde das Auftreten von zusätzlichen Schocks vermieden. Solche Schocks wurden in Vorversuchen anhand von Ethylenemissionen festgestellt, wenn schon ältere Pflanzen unter die Hauben „gequetscht“ wurden. Die noch jungen Pflanzen konnten sich auf Grund des oben beschriebenen Kulturverfahrens von Anfang an an die unter Umständen suboptimalen Wachstumsbedingungen „im Bestand“ anpassen.

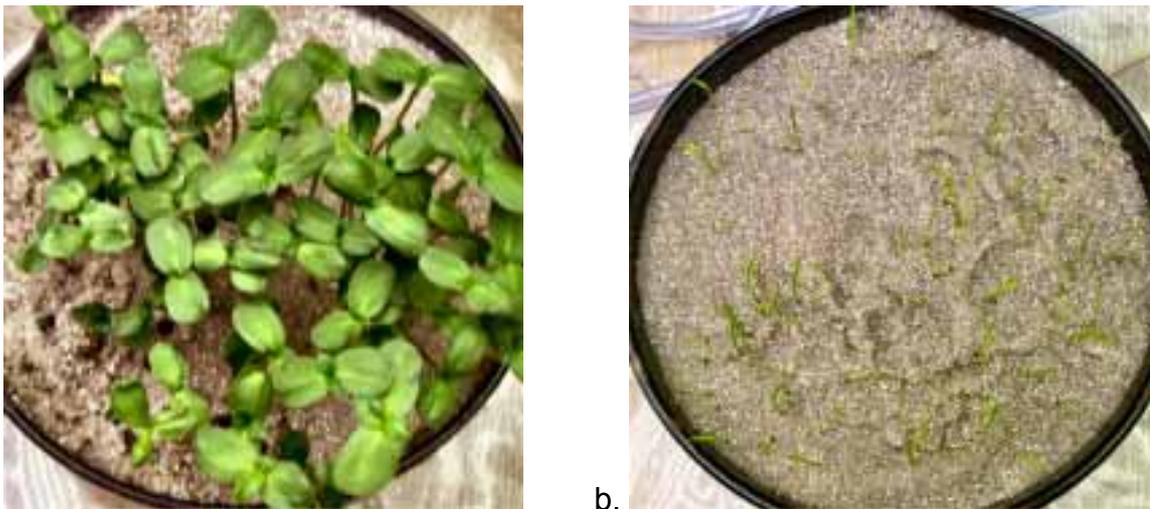


Abb. 3.2.1: In Quarzsand zur Keimung gebrachte Sonnenblumen (a.) und Reis (b.).

In der Regel wurden zu Beginn eines jeden Versuchs zehn Versuchsgefäße, die jeweils fünf Pflanzen enthielten, etabliert (Abb. 3.2.2). Die Überwachung des Gaswechsels der Pflanzen wurde mit einem photoakustischen Messgerät (Multigas Monitor 1312, Fa. *Innova AirTech Instruments*, Dänemark; Abb. 3.2.3) durchgeführt. Dem Messgerät war ein zwölffacher Messstellenumschalter vorgeschaltet (Fa. *Innova AirTech Instruments*, Dänemark; Abb. 3.2.3). Zehn der zur Verfügung stehenden Kanäle wurden für die Beprobung der Versuchsgefäße (Hauben) verwendet. Ein Kanal diente zur Messung der Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Außenluft. Mit dem letzten Kanal wurde die Gaskonzentration

im Luftpolster des Ausgleichs- und Anreicherungsgefäßes erfasst und somit die Lachgaskonzentration im Wurzelkompartiment überwacht.

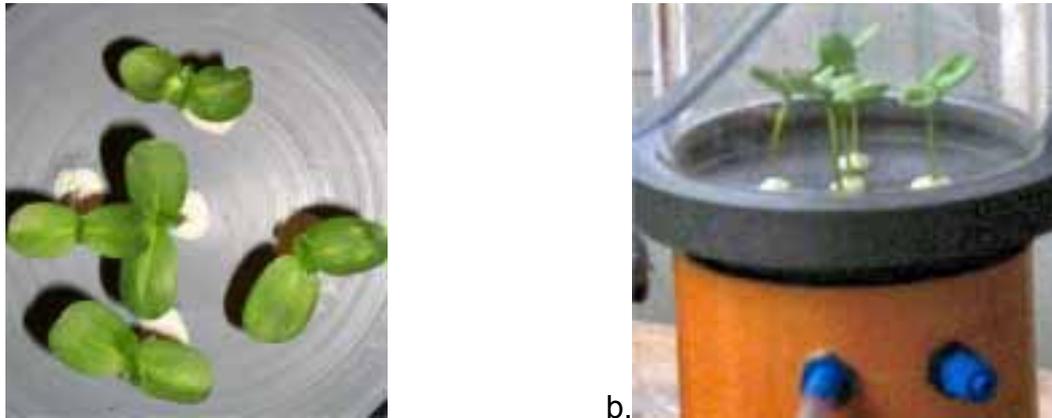


Abb. 3.2.2: In die Mittelplatte eingebrachte Sonnenblumenkeimlinge (a.), die sofort abgedeckt wurden (b.).



Abb. 3.2.3: Messgerät mit Messstellenumschalter.

Da ein zweiseitiger Vergleich der Messwerte angestrebt wurde (vgl. Kap.2.3 und 2.6), wurden die Messungen entsprechend der nachfolgenden Sequenz immer wiederkehrend durchgeführt:

Außenluft – Haube1 – Haube2 - Außenluft – Haube3 – Haube4 - Außenluft – Haube5 – Haube6 - Außenluft – Haube7 – Haube8 - Außenluft – Haube9 – Haube10 –Außenluft – Wurzelkompartiment -

Der einmalige Durchlauf einer solchen Sequenz benötigte ca. 30 Minuten. Somit ließen sich pro Versuchsgefäß zwei Messungen innerhalb einer Stunde durchführen.

Zur Abdichtung der Pflanzen innerhalb der Mittelplatte wurden verschiedene Materialien ausprobiert. Essigsäure, vernetzendes Silicon und Acryldichtmasse verursachten in Vorversuchen innerhalb weniger Stunden irreversible Schäden, die größtenteils zum Tod der Keimlinge führten. Als sehr pflanzenverträglich erwiesen sich Optosil P (Fa. *Heraeus*) und Prestik AE hellgrau (Fa. *Bostik GmbH*). Optosil P ist eine zwei Komponenten Masse auf Siliconbasis, die in der Zahntechnik zum Anfertigen von Abdrücken verwendet wird. Selbst der Härter (die zweite Komponente) wurde von den Pflanzen gut vertragen. Allerdings wurde das Optosil unter Härterzugabe zu spröde, so dass es in der Regel ungehärtet eingesetzt wurde. Die Abdichtung von Sonnenblume und Mais ließ sich damit befriedigend bewerkstelligen. Bei Reis und Gerste jedoch wurden die Pflanzen anfänglich vor Anreicherungsversuchen zusätzlich mit Paraffin (Schmelzpunkt 44-46°C, Fa. *Fluka*) abgedichtet. Da das Paraffin schnell brüchig wurde, wurden die Versuche schnell wieder undicht. Aus diesem Grunde wurden die letzten Versuche, die mit Reis durchgeführt wurden mit Tacosil 145 (Fa. *Thauer*), einem Silikonkautschuk aus zwei Komponenten, gemäß mündlicher Mitteilungen von AUGUSTIN (1999) und KUZJAKOV (2001) zusätzlich abgedichtet.

In den Versuchen wurde eine vierfache Wiederholung der angelegten Varianten angestrebt, um einerseits eine statistisch überprüfbare Aussagen zu erhalten und andererseits bei auftretenden Defekten wenigstens ein intaktes Gefäß identifizieren zu können. Damit ließen sich dann Tendenzen ermitteln, die bei darauffolgenden Versuchsplanungen zur Verbesserung des Versuchsaufbaus Verwendung fanden. Wenn es der Versuchsaufbau zugelassen hat, wurden neben den behandelten Gefäßen vier Versuchsgefäße ohne jegliche Behandlung als Kontrolle angelegt.

Die mit dieser Arbeit zu prüfenden Hypothesen wurden mit folgenden Variationen innerhalb des Versuchsaufbaus untersucht:

- Verwendung botanisch und physiologisch unterschiedlicher Arten. Sonnenblume – dikotyl, C3 - Pflanze; Mais – monokotyl, C4, fakultativ Aerenchyme, die auch durch Ethylen induzierbar sind; Reis – monokotyl, C3, Aerenchyme; Gerste – monokotyl, C3, keine Aerenchymbildung, extrem

staunässeempfindlich. Leider standen während des Versuchszeitraums keine für den verwendeten Versuchsaufbau geeigneten CAM-Pflanzen zur Verfügung (z. B. Sedum – Arten (Genus Crassulaceae)). Die Messung deren Verhaltens in der Dunkelphase hätte unter Umständen aufgrund unterschiedlicher Strategien bei der CO₂ Fixierung / Aneignung zusätzliche Rückschlüsse erlaubt.

- Gasmessungen an Pflanzen mit und ohne N₂O-Anreicherung in dem jeweils verwendeten Wurzelraummedium (Gaspolster, Nährlösung).
- Simulation unterschiedlicher, gasgefüllter Porenvolumina (Bodenluft) durch Variation des im Wurzelkompartiment der Versuchsgefäße etablierten Luftpolsters (Abb. 3.2.4).

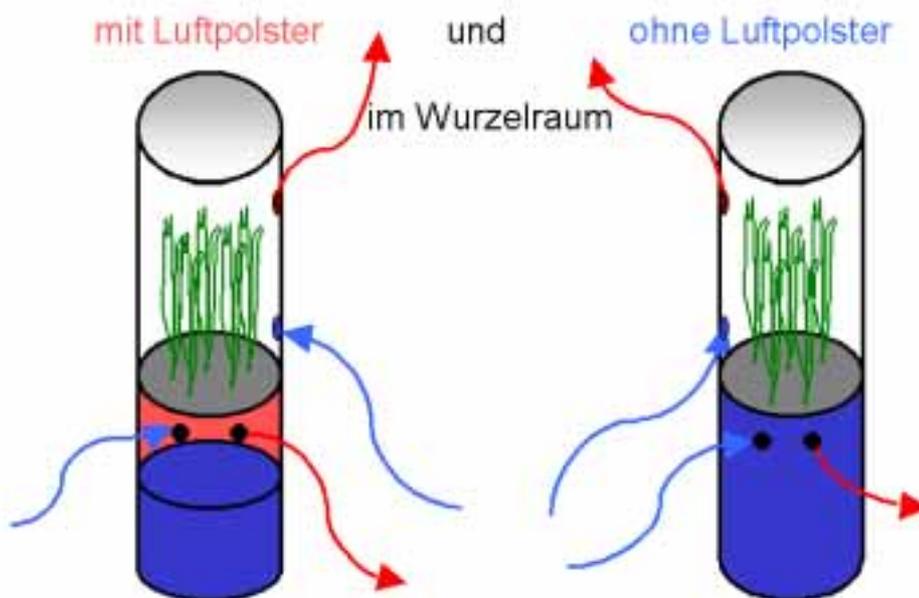


Abb. 3.2.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Simulation von luftgefülltem Porenraum im Gegensatz zu luftfreiem Wurzelraum. Die Pfeile zeigen die Richtung der Luft- bzw. Flüssigkeitsströme an.

Die N₂O-Anreicherung im Wurzelraummedium wurde durch Einspritzen von reinem Lachgas (minican, Fa. Linde AG) in das unter Kap.3.1 beschriebene Ausgleichsgefäß vorgenommen. Die eingespritzte Menge wurde mit einer Spritze abgemessen. In Abhängigkeit der Temperatur im Versuchsraum wurde immer darauf geachtet ganzzahlige Bruchteile des Molvolumens einzuspritzen. Die eingestellte Konzentration wurde regelmäßig durch die Beprobung des Luftpolsters im Ausgleichsgefäß gemessen.

Nach einer Vorkulturphase, die je nach Pflanzenart unterschiedlich lang war, wurden die jeweiligen Versuchsgefäße zufällig den angestrebten Varianten zugeordnet. Schon während der Vorkultur wurden Messungen unter „normalen Bedingungen“ durchgeführt. Unter anderem, um während der Vorkultur eine ausreichende CO₂-Versorgung sicherzustellen.

Die Messwerte wurden schon durch das Messgerät auf Normumgebung (25°C, 1013mbar) normalisiert.

3.3 Statistik

Da in den angereicherten Varianten wegen der Lachgasanreicherung keine normalverteilten Messwerte zu erwarten waren, weil die Proben in dieser Hinsicht nicht zufällig waren und auch für den erwarteten „biologische Einfluss“ auf die Emissionen keine Normalverteilung erwartet wurde, wurde auf eine Normalisierung der Daten verzichtet. Die Messwerte wurden je nach Versuchsaufbau mit einfachen Varianzanalysen, paarweisen Vergleichen oder mit Mittelwertvergleichen statistisch ausgewertet. Trotz der Schiefe der Daten wurde auf Rangsummentests oder Mediantests verzichtet. Zu Anfang wurden vor Versuchsbeginn Paare aus Varianten und Kontrollen zufällig bestimmt, um später eine genau zugeordnete statistische Auswertung vornehmen zu können. Diese Vorgehensweise erwies sich jedoch als nicht praktikabel, da es sehr schwierig war, alle Versuchsgefäße über den gesamten Versuchszeitraum gasdicht zu halten. Zusätzlich kam es vor, dass bei intensiven Abdichtungsmaßnahmen Pflanzen zerstört wurden.

Kapitel 4.

EXPERIMENTE MIT SONNENBLUME OHNE DEFINIERTES

LUFTKISSEN IM WURZELRAUM

4.1 Zusammenfassung

In vielen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass sowohl bei der Denitrifikation als auch bei der Nitrifikation Lachgas (N_2O) im Boden entstehen kann (u. a. WILLIAMS et al., 1992; HACK, 1999). Dieses N_2O kann durch den Boden diffundieren und gelangt so in die Atmosphäre. Es gibt Hinweise darauf, dass Pflanzen in der Lage sind, in Wasser gelöstes N_2O abzugeben (Chang et al., 1997). Aus diesem Grunde wurde der N_2O -Transport mit dem Transpirationsstrom in Sonnenblume untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Pflanzen in Nährlösung kultiviert, die mit N_2O angereicherter Luft belüftet wurde. Das getrennte Sprosskompartiment wurde mit einer konstanten Menge Außenluft versorgt, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit CO_2 zu gewährleisten und um überschüssige Luftfeuchtigkeit zu entfernen. Veränderungen der N_2O -Konzentrationen zwischen Ein- und Ausgang des Sprosskompartiments wurden kontinuierlich gemessen. Bei eingeschaltetem Licht (Tag) wurde eine sehr enge Beziehung zwischen dem in der Nährlösung gelösten N_2O und der durch die Sonnenblume abgegebenen N_2O -Menge gefunden. Bei ausgeschalteter Beleuchtung (Nacht) waren die N_2O -Emissionen durch die Pflanzen deutlich geringer als im Licht während des Tages. Sie zeigten auch nicht mehr die enge Beziehung zu der jeweils angebotenen N_2O -Konzentration in der Nährlösung. Aus diesen Ergebnissen wurde geschlossen, dass Sonnenblumenpflanzen in der Lage sind, in Wasser gelöstes N_2O über die Wurzel aufzunehmen, mit dem Transpirationsstrom in die Blätter zu transportieren und über die geöffneten Stomata während der Lichtphase abzugeben. Die N_2O -Emissionsraten bei Tag unterschieden sich deutlich von denen in der Nacht. Dieses Muster stimmte sehr gut mit der gemessenen Transpirationsrate überein.

4.2 Einleitung

Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Nitrifikation und Denitrifikation vor allem unter anaeroben Bedingungen Lachgas im Boden gebildet werden kann (u. a. DAVIDSON, 1991). Dieses bodenbürtige Lachgas kann über Diffusions- und Konvektionsprozesse aus dem Boden in die Atmosphäre gelangen. Erstmals haben CHANG et al. (1997) gezeigt, dass Raps und Gerste in der Bodenlösung gelöstes Lachgas in die umgebende Atmosphäre abgeben können. Jedoch ist der Mechanismus des Lachgastransports bis zum heutigen Tage umstritten. Neben dem im Wasser gelösten Übergang des Lachgases in die Wurzel wäre auch ein gasförmiger Eintritt möglich. In diesem Kapitel wurde nur der durch in wässriger Lösung vermittelte Lachgastransport über den Transpirationsstrom unter Tag- und Nachtbedingungen betrachtet.

4.3 Material und Methoden

Sonnenblumenpflanzen (*Helianthus annuus* L. cv. Frankasol) wurden in einem kontrolliert offenen System (Abb. 3.1.1) in einer vollständigen Nährlösung kultiviert (Tab. 2.5.2). Die Vorkultur dauerte 40 Tage. Der Tag- / Nachtrhythmus wurde auf eine sechzehnständige Licht- und eine achtstündige Dunkelperiode eingestellt. In jedes Kulturgefäß waren fünf Pflanzen eingebracht (Abb.4.3.1 - 4.3.3). Die Versuchspflanzen wurden mit einem Gemisch aus Optosil R (Fa. Heraeus) und Prestik (Fa. Bostik) fixiert und abgedichtet (Abb.4.3.1). Der Versuch wurde in vier Wiederholungen durchgeführt. Für jede Wiederholung wurde eine Kontrolle angelegt. Dadurch ergab sich eine Gesamtzahl von acht Kulturgefäßen (Abb.4.3.2). Die jeweiligen Versuchs- und Kontrollgefäße wurden für eine spätere statistische Auswertung vor Versuchsbeginn paarweise einander zugewiesen. Die Spross- und Wurzelkompartimente waren gasdicht voneinander getrennt. Sie wurden kontinuierlich und getrennt belüftet. Während der Vorkultur wurden sowohl die Spross- als auch die Wurzelbereiche mit Außenluft versorgt. Innerhalb des Versuchszeitraums wurde die Nährlösung der Versuchspflanzen mit lachgasangereicherter Luft in einem Kreislaufsystem ebenfalls kontinuierlich versorgt. Die Lachgasanreicherung wurde in einem kombinierten (für alle Gefäße mit Lachgasanreicherung gemeinsamen) Ausgleichs- und Anreicherungsgefäß vorgenommen, durch das der Nährlösungskreislauf (gasförmig bzw. wässrig) der Gefäße mit Lachgasanreicherung im Wurzelkompartiment umgewälzt wurde. Die

Kontrollpflanzen wurden wie in der Vorbehandlung auch während des Versuchszeitraums im Wurzelkompartiment weiterhin mit Außenluft belüftet. Der hier dargestellte Versuch wurde am 41. Tag nach der Aussaat begonnen, da sich die Pflanzen zu diesem Zeitpunkt durch sekundäres Dickenwachstum größtenteils selbst abgedichtet hatten. Dazu wurde die Nährlösung in den Versuchsgefäßen maximal aufgefüllt. Die Lachgaskonzentration in der Nährlösung der Versuchspflanzen wurde bis zu einer Konzentration von 6170 ppm ($11,298 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) im Luftpolster des verwendeten Ausgleichs- und Anreicherungsgefäßes angereichert. Diese Luft wurde kontinuierlich in einem Kreislauf durch die Wurzelkompartimente der vier Versuchsgefäße gepumpt. Die Anreicherung wurde mit zweimaligem Einspritzen von reinem N_2O in das Ausgleichsgefäß durchgeführt. Bei jedem Einspritzen wurde eine Lachgasmenge von $244 \text{ ml} \pm 1\%$ (bei 25°C) zugegeben. Dies entspricht einer N_2O -Menge von insgesamt $0,88 \text{ g} \pm 1\%$.



Abb. 4.3.1: Mittelplatte mit fünf abgedichteten Sonnenblumenpflanzen zum Versuchszeitpunkt. Auf Grund des sekundären Dickenwachstums hatten sich die Pflanzen größtenteils schon selbst abgedichtet.

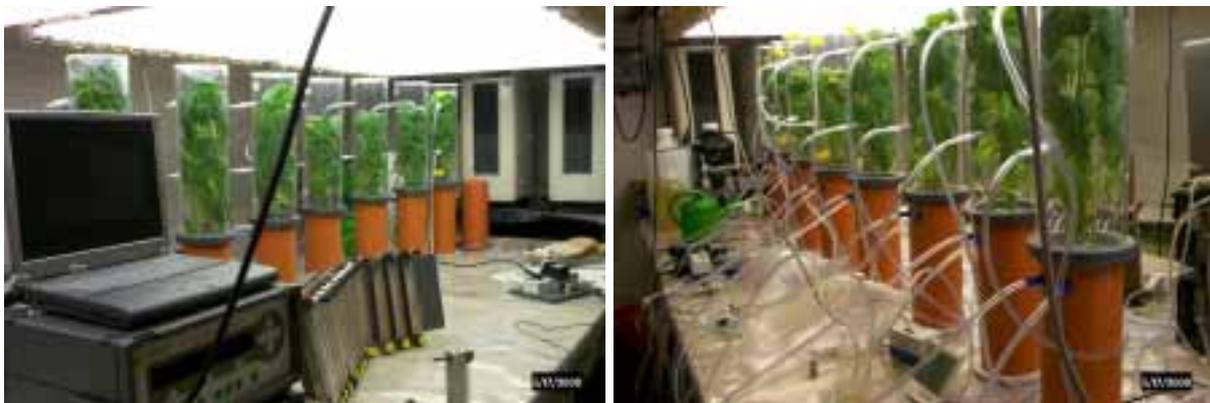


Abb. 4.3.2: Vorder- und Hinteransicht des Versuchsaufbaus in der Klimakammer während des Versuchs mit Sonnenblumen.

Die Belüftungsvolumina wurden über Flowmeter (Fa. *Fischer & Porter*) geregelt (Abb. 3.1.6). In den Sprosskompartimenten fand ein Luftaustausch von ca. $5,9 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ statt. Der Luftwechsel entsprach etwa einem einfachen Austausch des Volumens einer Haube pro Minute. Dies reichte aus, um in diesem Entwicklungsstadium die CO_2 -Versorgung der Versuchspflanzen und die Entfernung überschüssiger Luftfeuchtigkeit sicherzustellen.



Abb. 4.3.3: Pflanzen (Sonnenblume) zum Versuchszeitpunkt.

Die Konzentrationen von N_2O , CO_2 und H_2O wurden während eines Zeitraums von 24 Stunden an den Ausgängen der Sprosskompartimente mit Hilfe eines automatisierten Probenahme- und Gasmesssystems gemessen. Das Messsystem bestand aus einem Messstellenumschalter und einem photoakustischen Messgerät (Fa. *Innova AirTech Instruments*, Dänemark; vgl. Kap. 3 u. Abb. 3.1.1). Vor und nach der Messung der Konzentrationen innerhalb eines Sprosskompartiments wurden die Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Außenluft gemessen, um eventuelle Konzentrationsunterschiede mit größt möglicher Sicherheit erfassen zu können. Die Konzentrationen von N_2O , CO_2 und H_2O in der zur Belüftung der Anreicherungsvariante verwendeten Luft, wurden in regelmäßigen Abständen, jedoch diskontinuierlich, ebenfalls beprobt.

4.4 Ergebnisse

Die Abb. 4.4.1 zeigt die gemessenen Transpirationsraten der lachgasbehandelten Pflanzen und der Kontrollpflanzen ohne Bezug auf eine Referenzgröße. In Abb. 4.4.2 ist die Transpirationsrate, bezogen auf die am Ende des Versuchs ermittelte Trockensubstanz, dargestellt. Der erwartete diurnale Rhythmus ist in beiden Darstellungen offensichtlich. Im Dunkeln betrug die Transpirationsrate etwa 30 % der Transpiration die bei eingeschaltetem Licht gemessen wurde. Dieser Wert entspricht in etwa der erwarteten cuticulären Transpiration. Bei den nächtlichen Transpirationsraten muss auch in Betracht gezogen werden, dass durch den intensiven Luftaustausch unter den Abdeckungen der Effekt starken Windes hervorgerufen wurde.

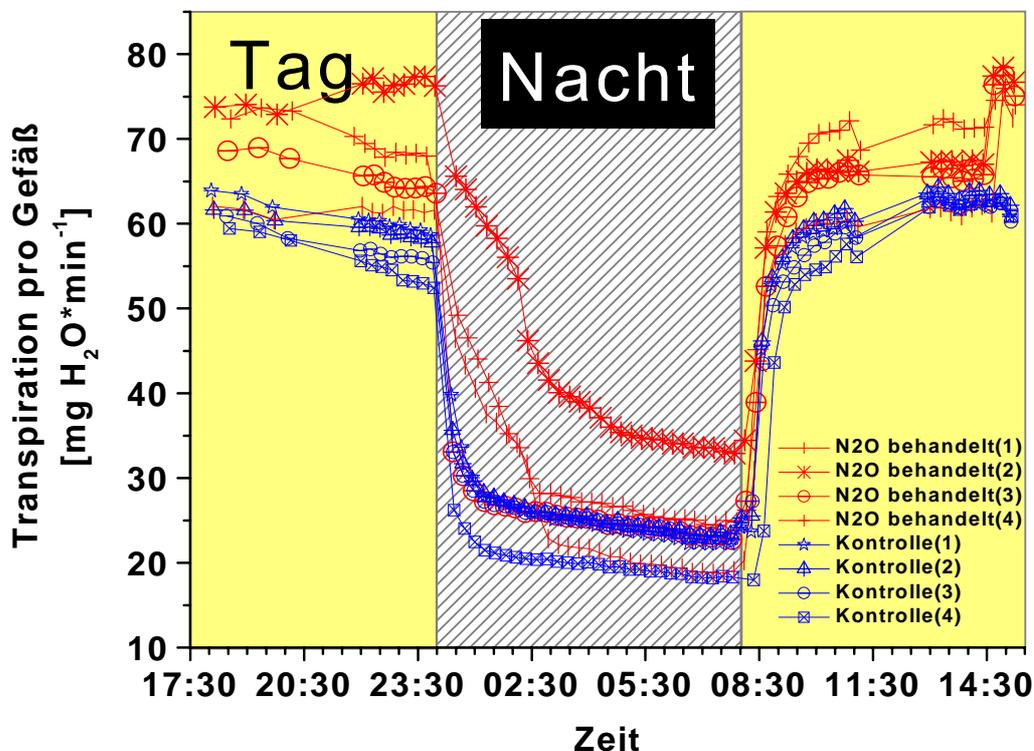


Abb. 4.4.1: Gemessene Transpirationsraten Tag/Nacht ohne Bezug zu einer anderen Größe; es sind die Messungen jedes einzelnen Gefäßes dargestellt (Versuchspflanze Sonnenblume).

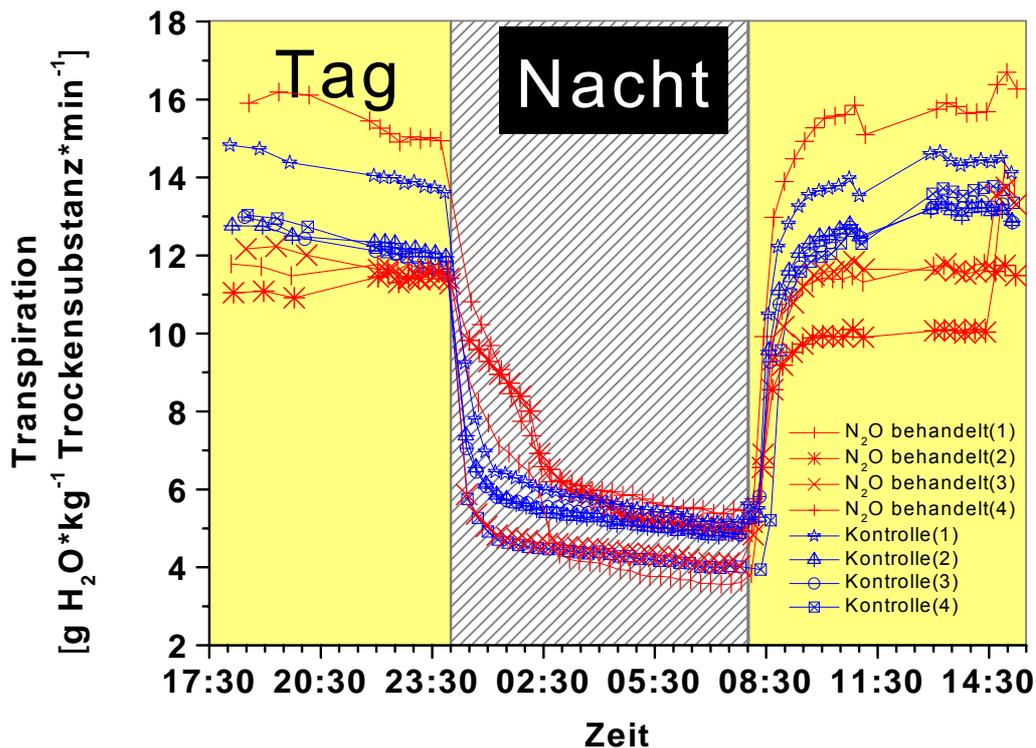


Abb. 4.4.2.: Transpirationsraten Tag/Nacht. Bezugsgröße Trockengewicht; es sind die Messungen jedes einzelnen Gefäßes dargestellt (Versuchspflanze Sonnenblume).

Interessant an den beiden Darstellungen der Transpirationsrate ist, dass die Kurvenverläufe in beiden Abbildungen trotz unterschiedlicher Trockengewichte (Tab 4.4.1) in den einzelnen Gefäßen einen sehr ähnlichen Verlauf zeigen. Daraus wurde Folgendes geschlossen:

- Die beiden Kompartimente (Wurzel~ und Spross~) waren während des Versuchs gasdicht voneinander getrennt. Es traten keine Lecks auf.
- Die Pflanzen hatten trotz unterschiedlicher Gesamtfrisch- bzw. Gesamttrockengewichte aller Pflanzen in den einzelnen Gefäßen ausreichend ähnliche Umweltbedingungen.
- Die Pflanzen hatten unter physiologischen Gesichtspunkten alle ein ähnliches Entwicklungsstadium.
- Die Luftaustauschrate war in allen Gefäßen ausreichend, um eine hinsichtlich Transpiration und N₂O-Abgabe „natürliche“ Umgebung zu gewährleisten.

Tab. 4.4.1: Frisch- und Trockengewichte von Blättern, Stängel und Wurzeln der mit N₂O behandelten (var 1 – 4) und unbehandelten (k 1 - 4) Sonnenblumenpflanzen in g * Gefäß⁻¹(5 Pflanzen pro Gefäß).

	Frischgewicht Blatt [g]	Frischgewicht Stängel [g]	Frischgewicht Stängel u. Blatt	Frischgewicht Wurzel [g]	Frischgewicht Gesamt [g]	Trockengewicht Stängel u. Blatt [g]	Trockengewicht Wurzel [g]	Trockengewicht Gesamt [g]	Frisch / Trocken Gesamt	Anzahl Pflanzen
var 1	35,92	34,49	70,41	17,28	87,69	4,31	0,82	5,13	17,09	5
var 2	33,29	27,25	60,54	17,73	78,27	4,83	0,97	5,8	13,49	5
var 3	32,74	19,15	51,89	19,99	71,88	4,69	1,2	5,89	12,23	5
var 4	33,41	26,7	60,11	17,3	77,41	4,56	0,99	5,55	13,95	5
k1	40,08	31,27	71,35	21,8	93,15	5,27	1,4	6,67	13,97	5
k2	47,95	43,07	91,02	22,72	113,74	6,68	1,38	8,06	14,11	5
k3	44,19	37,34	81,53	22,73	104,26	5,64	1,18	6,82	15,29	5
k4	34,93	29,76	64,69	17,95	82,64	4,55	1,04	5,59	14,78	5

Die Abbildung 4.4.3 enthält die Lachgasabgaben aller Versuchsgefäße als Kurven mit Symbolen. Zusätzlich ist in dieser Abbildung auch die Lachgaskonzentration der zur Belüftung der Hauben verwendeten Raumluft als Kurve ohne Symbole eingezeichnet.

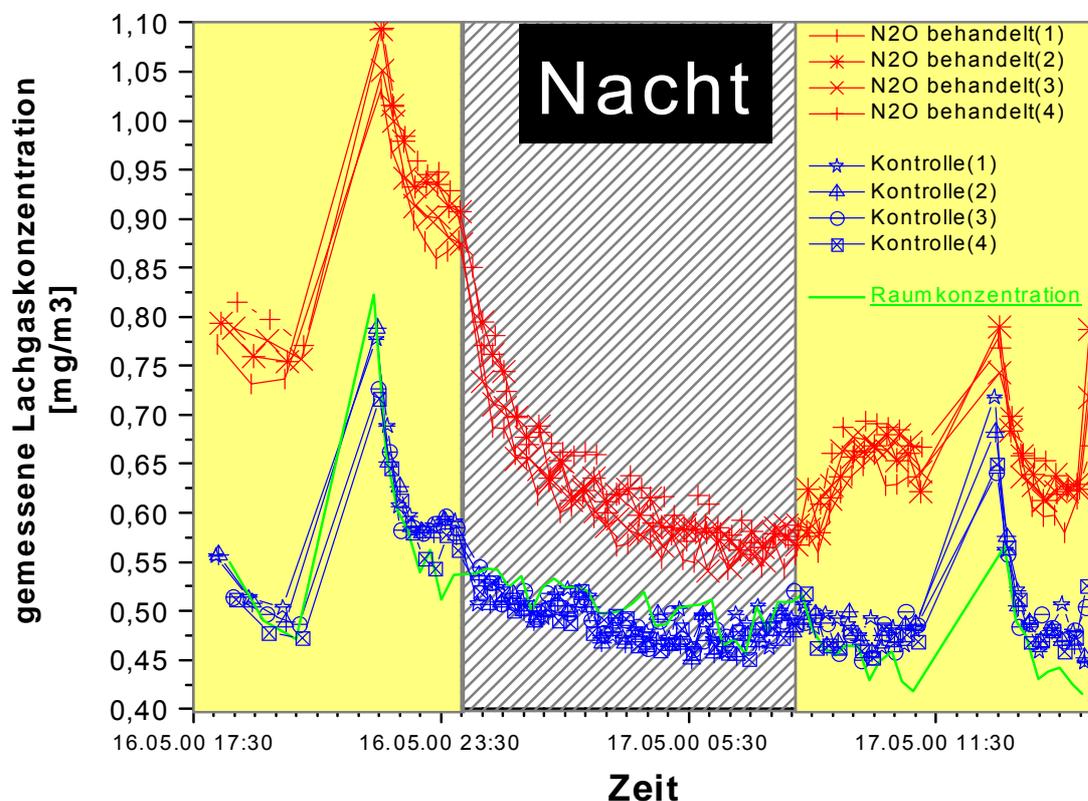


Abb. 4.4.3: Darstellung der unbereinigten gemessenen Lachgasemissionen und der ambienten Lachgaskonzentration (Versuchspflanze Sonnenblume).

Die in allen Versuchsgefäßen gemessene Lachgasabgabe (Abb. 4.4.3) zeigte wie die Transpiration ebenfalls einen diurnalen Rhythmus. Die Unterschiede zwischen Kontrollgefäßen und Gefäßen mit Lachgasanreicherung sind deutlich erkennbar.

Aus den Abbildungen 4.4.4 und 4.4.5 wird deutlich ersichtlich, dass die Emissionsunterschiede auf die Lachgasanreicherung im Nährmedium zurückzuführen sind. Zu keinem Zeitpunkt während des Versuchs sanken die Emissionen der Anreicherungsvarianten auf das Niveau der jeweiligen Kontrollen (Abb. 4.4.5). Diese Unterschiede waren zu jedem Zeitpunkt statistisch signifikant ($\alpha \leq 0,001$). Bei den Kontrollpflanzen (ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung) ist der Tagesgang der Lachgasemissionen gleichfalls zu erkennen. Allerdings ist die Ausprägung deutlich geringer, als bei den angereicherten Varianten. Beiden Varianten war jedoch gemeinsam, dass bei eingeschaltetem Licht Lachgasemissionen gemessen wurden.

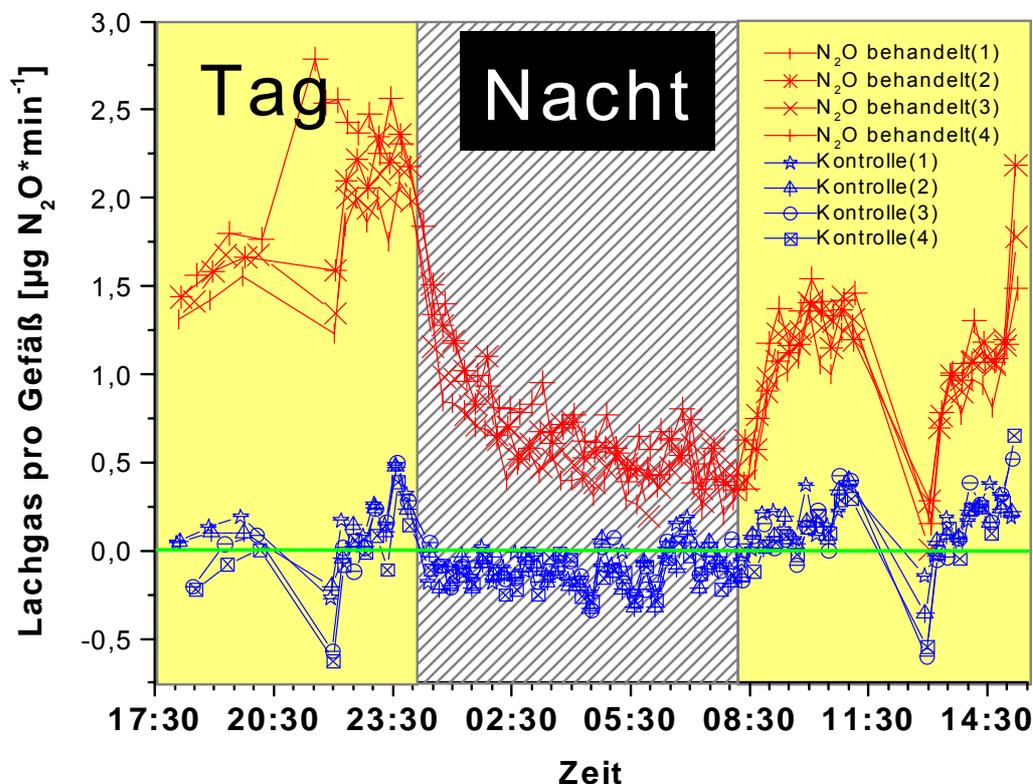


Abb. 4.4.4: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten absoluten Lachgasemissionen (Versuchspflanze Sonnenblume).

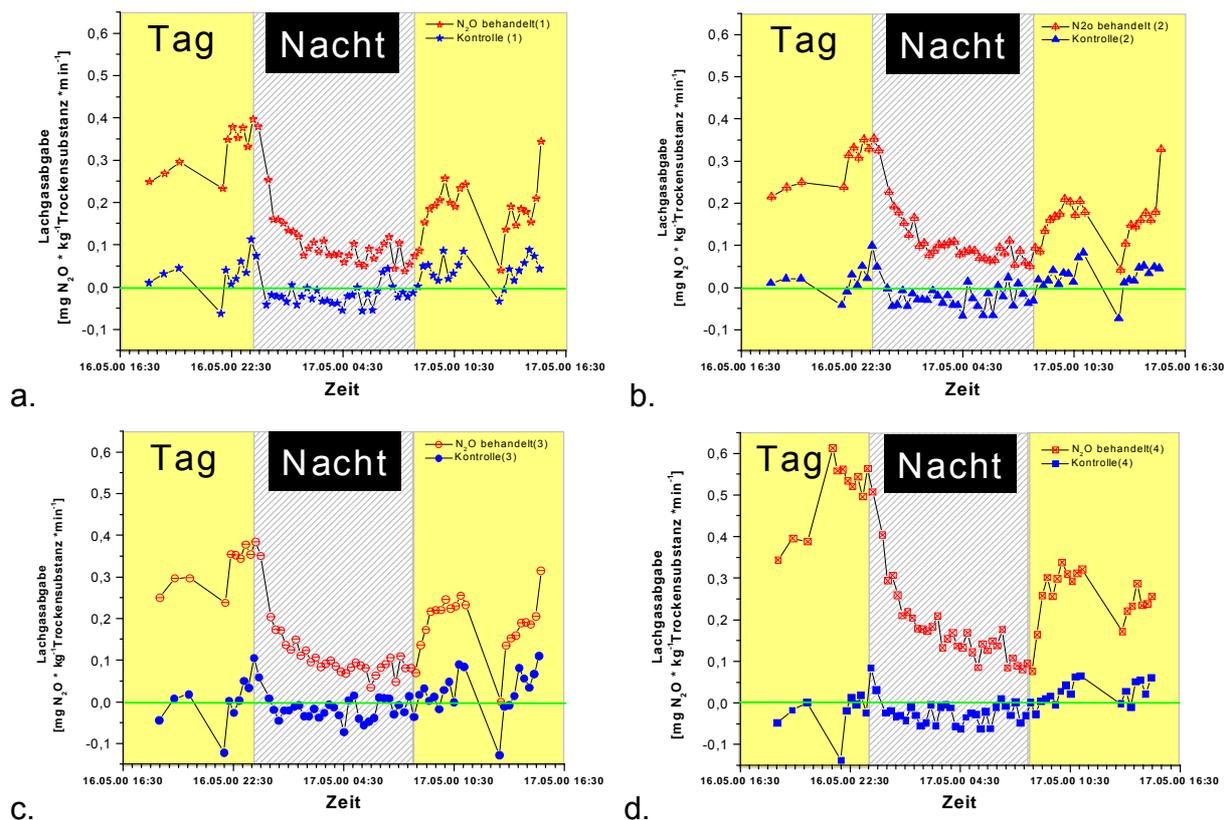


Abb. 4.4.5: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten und auf die jeweiligen Trockengewichte bezogenen absoluten Lachgasemissionen. Zur besseren Übersicht zeigt jede Grafik ein einander zugeordnetes Gefäßpaar (Versuchspflanze Sonnenblume).

Auffallend sind die im Vergleich zur Außenluft niedrigen N_2O -Gehalte die während der Nacht in den Kontrollgefäßen gemessen wurden (Abb. 4.4.3 u. 4.4.4). Dies spricht für eine Netto-Lachgasaufnahme durch die Sprosse der Sonnenblumenpflanzen während der Nacht. Mit der wieder ansteigenden Transpiration am Anfang der zweiten Tagperiode stiegen die Emissionsraten erneut auf mit dem Vortag vergleichbare Werte an.

Beim Vergleich der Emissionsraten in der ersten und der zweiten Tagperiode muss berücksichtigt werden, dass die N_2O -Konzentration im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes von anfänglich $11,29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (6170 ppm) auf $8,07 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (4410 ppm) abgefallen war (Abb. 4.4.6).

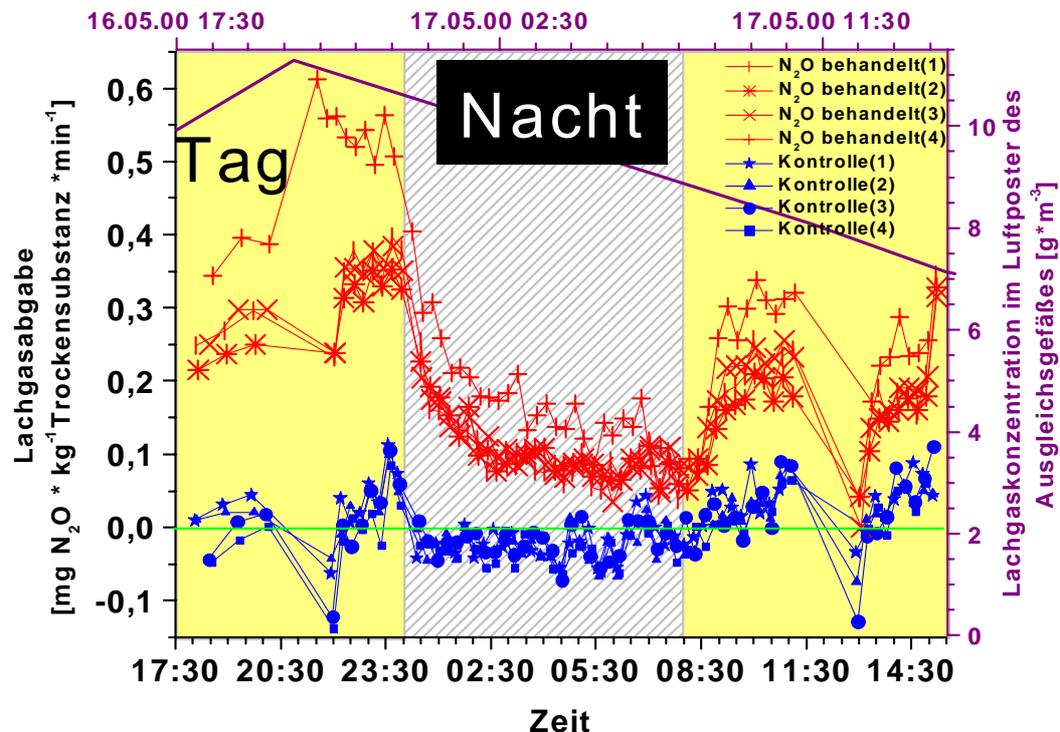


Abb. 4.4.6: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten und auf die jeweiligen Trockengewichte bezogenen absoluten Lachgasemissionen. Die Grafik zeigt alle einander zugeordneten Gefäßpaare und den Verlauf der Lachgaskonzentration im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (Versuchspflanze Sonnenblume).

Aufgrund der obigen Darstellungen schien der Einfluss der Transpirationsrate der einzige emissionsbeeinflussende Faktor zu sein. Allerdings wurde wegen der Nettolachgasaufnahme der Kontrollpflanzen während der Nacht die Transpirationsrate als eine weitere Bezugsgröße für die Lachgasemissionen herangezogen. Die Abbildung 4.4.7 zeigt die abgegebene Lachgasmenge bezogen auf die transpierte Wassermenge. Wider Erwarten war der Quotient bei Dunkelheit nicht nur bei den Kontrollgefäßen, sondern auch in drei der angereicherten Varianten kleiner als bei eingeschalteter Beleuchtung. Dieser Unterschied ließ sich nicht auf die stetig sinkende N₂O-Konzentration im Nährmedium zurückführen (vgl. Abb. 4.4.6), da der Quotient in der nächsten Tagperiode wieder anstieg.

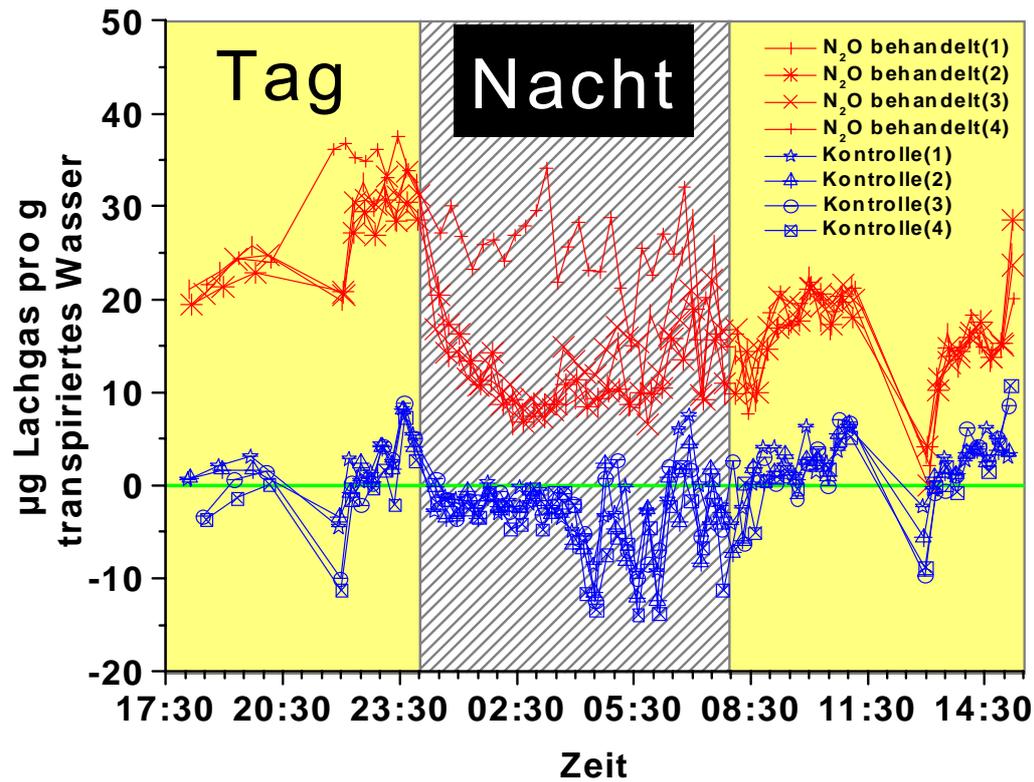


Abb. 4.4.7: Darstellung der mit der Durchflussrate bereinigten absoluten Lachgasemissionen bezogen auf ein Gramm transpiriertes Wasser (Versuchspflanze Sonnenblume).

Bei allen Darstellungen ist zu beachten, dass die starken Ausschläge innerhalb der beiden Tagesperioden durch die Messung der Konzentration des Nährmediums bedingte Artefakte darstellen. Sie wurden aus den Abbildungen nicht vollkommen eliminiert, um die Ausfallzeiten der auswertbaren kontinuierlichen Messungen deutlich zu kennzeichnen.

4.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass in Wasser gelöstes Lachgas von Sonnenblumenpflanzen durch die Wurzeln aufgenommen, mit dem Transpirationsstrom in den Spross transportiert und durch die Stomata an die umgebende Atmosphäre abgegeben werden kann. Die Beziehung zwischen der Transpirationsrate und der Lachgasemission zeigt Analogien zu den mit Raps und Gerste von CHANG et al. (1997) durchgeführten Experimenten, die ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Lachgasemission und Transpirationsrate vermuten ließen. In der Nachtperiode, mit eventuell größtenteils geschlossenen Stomata, scheint die Cuticula die Lachgasabgabe wie auch die Transpiration in ähnlichem Ausmaß zu behindern. Es wäre vorstellbar, dass die Cuticula die Lachgasdiffusion unterbindet und eine Lachgasabgabe nur über vereinzelt geöffnete Stomata erfolgt. Allerdings war in Dunkelheit die Lachgasemission pro transpiriertem Gramm Wasser (Abb. 4.4.7) deutlich geringer als bei eingeschalteter Beleuchtung. Dies deutet auf andere physiologische Vorgänge bei Dunkelheit im Vergleich zu den Verhältnissen bei eingeschalteter Beleuchtung hin. Da in den Kontrollen nachts eine Nettolachgasaufnahme aus der Umgebungsluft gemessen wurde, ist anzunehmen, dass die Pflanzen mit Lachgasanreicherung im Nährmedium ebenfalls Lachgas aufgenommen haben. Eine solche Lachgasaufnahme und Assimilation durch Pflanzen haben LENSİ & CHALAMET (1981) und GRUNDMANN et al. (1993) für Mais gezeigt.

Tab. 4.5.1: Durchschnittliche Lachgasabgabe bzw. -aufnahme auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. Mit „var“ sind die Gefäße bezeichnet, die mit Lachgas angereichert wurden; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Sonnenblume).

	var1 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	var2 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	var3 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	var4 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	k1 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	k2 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	k3 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]	k4 [mgN ₂ O * l ⁻¹ H ₂ O]
Tag1	28,953	26,525	29,019	32,760	3,105	2,430	1,818	0,604
Nacht	13,162	11,669	13,293	23,733	-2,342	-3,699	-2,694	-4,330
Tag2	16,613	16,910	17,575	17,384	3,113	2,596	2,840	2,256

Die Tabelle 4.5.1 zeigt die durchschnittlichen Emissions- bzw. Aufnahme­raten der einzelnen Gefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge. Die Lachgaskonzentration in der Nährlösung der angereicherten Variante wurde, da sie nicht direkt gemessen werden konnte, unter folgenden Annahmen rein mathematisch, ohne Zuhilfenahme der Gasgesetze bestimmt:

- Gesamte zugegebene Lachgasmenge war 0,88g.
- Gesamtvolumen des Versuchsaufbaus war 24l.
- Das Verhältnis von Luft (im Ausgleichsgefäß und den Versorgungsschläuchen) zu Nährlösung (in den Wurzelkompartimenten) betrug 11l zu 13l.

Für die zu Versuchsbeginn in der angereicherten Luft befindliche Lachgasmenge ergab sich

$$(1) 11l \cdot 11,3 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot l^{-1} \text{ (gemessene Konzentration im Luftpolster)} = 124,3 \text{ mg N}_2\text{O}$$

Für die zu Versuchsbeginn in der Nährlösung gelöste gesamte Lachgasmenge ergab sich aus (1):

$$(2) 880 \text{ mg N}_2\text{O} \text{ (insgesamt zugegebene Menge)} - 124,3 \text{ mg N}_2\text{O} \text{ (im Luftpolster enthaltene N}_2\text{O-Menge)} = 755,7 \text{ mg N}_2\text{O}$$

Schließlich wurde die gelöste Lachgasmenge pro Liter Nährlösung aus (2) wie folgt bestimmt:

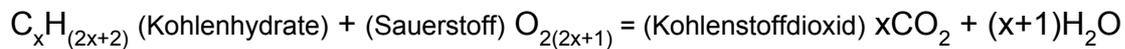
$$(3) 755,7 \text{ mg N}_2\text{O} \text{ (Restmenge)} / 13l \text{ (gesamtes Nährlösungsvolumen)} = 58,13 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot l^{-1} \text{ (Nährlösung)}$$

Analog zu den oben durchgeführten Rechnungen ergab sich die theoretisch in der Nährlösung enthaltene Lachgasmenge am Ende des Versuches auf Grund der Konzentration im Luftpolster von $8,07 \text{ mg} \cdot l^{-1}$ zu $41,51 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot l^{-1}$ Nährlösung.

Die mittlere Lachgaskonzentration in der Nacht wurde unter der Annahme einer linearen Konzentrationsabnahme in der Nährlösung als ungewichtetes arithmetisches Mittel der Anfangs- und der Endkonzentration bestimmt. Es ergab sich zu $49,82 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot l^{-1}$ Nährlösung für die Nährlösung aller Versuchsgefäße mit

Lachgasanreicherung.

Für die angereicherte Variante ließ sich feststellen, dass nur ein Teil des in der Nährlösung befindlichen Lachgases von den Pflanzen emittiert wurde. Der emittierte Anteil unterschied sich sowohl zwischen den einzelnen Tagperioden, als auch zwischen Tag und Nacht (Tab 4.5.2). Da die nächtlichen Lachgasemissionen pro transpiriertes Wasser in den angereicherten Gefäßen nur etwa halb so hoch sind wie die Emissionen am Tage, ist eine Assimilation durch die Pflanze wie bei den Kontrollpflanzen auch für die Pflanzen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung als sicher anzunehmen. Ein zusätzlicher Einflussfaktor für die in Dunkelheit geringeren Emissionen könnte die wasserproduzierende Atmung der Pflanzen sein, die sich nach folgender Formel ergibt:



Das so gebildete Wasser wird ebenfalls transpiriert. Deshalb wird weniger Wasser aus dem Wurzelraum für die Transpiration benötigt. Somit gelangt auch weniger N₂O mit Wasser aus den Wurzeln in den Spross.

Aufgrund der in den Tabellen 4.5.1 und 4.5.2 und der Abbildung 4.4.7 dargestellten vergleichsweise hohen N₂O-Werte während der Nachtphase können für das angereicherte Gefäß „var4“ zumindest für den ersten Tag und die erste Nacht sporadisch auftretende Undichtigkeiten nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Tab. 4.5.2: Zu dimensionslosen Emissionskoeffizienten zusammengefasste Verhältnisse der durchschnittlichen Lachgasabgabe zur errechneten Lachgaskonzentration in der Nährlösung auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. Mit „var“ sind die Gefäße bezeichnet, die mit Lachgas angereichert wurden; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Sonnenblume).

	var1	var2	var3	var4	k1	k2	k3	k4
Tag1	0,498	0,456	0,499	0,564	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Nacht	0,264	0,234	0,267	0,476	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Tag2	0,400	0,407	0,423	0,419	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

Bei den in der Tabelle 4.5.2 wiedergegebenen Emissionskoeffizienten handelt es sich um dimensionslose Zahlen. Diese erhält man, indem man die durch die Transpiration abgegebene Lachgasmenge pro definierter Transpirationsmenge (Wasser) ins Verhältnis zur angenommenen Lachgaskonzentration in der Nährlösung

setzt. Dabei würde ein Wert von eins unter der idealisierten Annahme, dass die Pflanze bei der Photosynthese kein Wasser verbraucht, bedeuten, dass das gesamte über die Wurzel mit dem für die Transpiration benötigten Wasser aufgenommene Lachgas über die Stomata abgegeben wird. Somit erlaubt der Emissionskoeffizient den Vergleich von unterschiedlichen Pflanzenarten bzw. Pflanzen unterschiedlichen Alters bezüglich ihres Lachgasemissionspotentials über den Transpirationsstrom.

Wie aus Tabelle 4.5.2 hervorgeht, wurden die Emissionskoeffizienten für die Kontrollgefäße nicht bestimmt. Dies war leider nicht möglich, da keinerlei Messungen zur Bestimmung der Lachgaskonzentration in der Nährlösung der Kontrollpflanzen durchgeführt wurden.

Bei den in diesem Versuch verwendeten Sonnenblumenpflanzen konnte das Vorhandensein von Aerenchymen durch mikroskopische Untersuchungen an Wurzelquerschnitten vollkommen ausgeschlossen werden (Abb.4.5.1). Aus dieser Feststellung heraus wurde ein gasförmiger Transport von der Wurzel in den Spross ausgeschlossen.

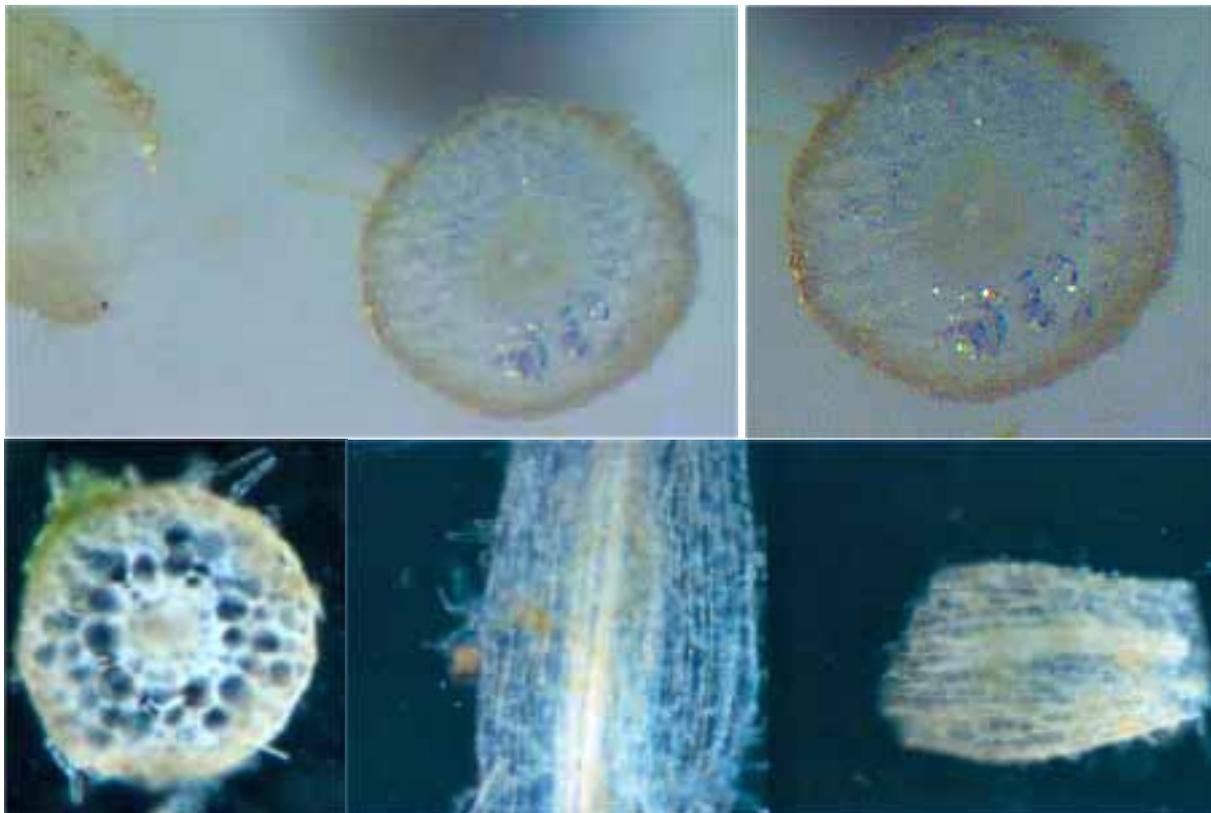


Abb. 4.5.1: Repräsentative Quer- und Längsschnitte durch Sonnenblumenwurzeln.

Der in den Kontrollgefäßen deutlich geringer ausgeprägte Rhythmus der Lachgasemissionen ist darauf zurückzuführen, dass die N_2O Konzentration in der Nährlösung der Kontrollen mit Sicherheit deutlich geringer war als die Konzentration in der Nährlösung der angereicherten Gefäße. Ausgehend von einer minimalen Lachgaskonzentration um $7,3 \cdot 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, die wegen der ambienten Lachgaskonzentration mindestens vorgelegen haben muss, ist von einer geringen Lachgaskonzentration in der Nährlösung der Kontrollgefäße auszugehen. Daraus ergibt sich auf Grund der im Vergleich zu dieser hypothetischen Lachgaskonzentration unter Lichteinstrahlung viel zu hohen Lachgasemissionen bei den Kontrollgefäßen, dass wegen der hohen Nitratverfügbarkeit (vgl. u. a. WEIER et al., 1993; KAISER et al., 1996) und der hohen Verfügbarkeit von leicht verfügbaren Kohlenstoffen (u. a. WEIER et al., 1993; AZAM et al., 2002) (z. B. Wurzelexsudate) in der Nährlösung eine sehr intensive Denitrifikation stattgefunden haben könnte. Diese Annahme erklärt keinesfalls die angenommene und gemessene Lachgasassimilation in der Nacht, da die Denitrifikation selbst nicht lichtgesteuert ist. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass in der Nacht wegen fehlender Assimilation und nächtlicher Atmung deutlich weniger Wurzelexsudate in die Nährlösung abgegeben werden können.

Ein zusätzlicher überlegenswerter Aspekt für die Lachgasabgabe unter Lichteinwirkung könnten mit der Photorespiration und / oder der Seneszenz verbundene Prozesse sein, in die Stickstoffverbindungen verwickelt sind (ähnlich der dissimilationsgetriebenen NH_3 -Emission durch Pflanzen; u. a. SUTTON et al. (2001), SCHJOERRING & MATTSSON (2001), SCHJOERRING et al. (2000), MATTSON et al. (1998), SHARPE & HARPER (1997), MANNHEIM et al. (1997), BUSSINK et al. (1996), HARPER et al. (1996), GRAVENHORST & BREIDING (1990), HOVE VAN et al. (1987, 1988, 1989, 1990), PARTON et al. (1988), FARQUHAR et al. (1980), FARQUHAR et al. (1979), MEYER (1973)).

Aus den vorstehenden Ergebnissen lässt sich ableiten, dass sich der Anteil einer Pflanzenart ohne Aerenchyme an der Emission bodenbürtigen Lachgases aus zwei leicht bestimmbar Faktoren ableiten lässt:

- Transpirationsrate der betreffenden Pflanzenart
- Lachgaskonzentration in der Bodenlösung.

Um diese Annahme zu überprüfen, wurden noch weitere Pflanzenarten untersucht.

Die Gründe für die hohen Lachgasverluste während des betrachteten Versuchszeitraums könnten folgende sein:

- N_2O -Abbau durch Mikroorganismen in der Nährlösung.
- N_2O -Aufnahme und Metabolisierung durch die Versuchspflanzen analog zu den Untersuchungen von Lensi & Chalamet (1981) und Grundmann et al. (1993).
- N_2O -Diffusion durch die verwendeten Kunststoffe.

Denkbar wäre auch eine Kombination aus den oben genannten Möglichkeiten. Zur näheren Verifizierung bzw. Bewertung der oben genannten drei Verlustmöglichkeiten wären weitere Versuche notwendig u. a. mit ^{15}N markiertem Lachgas.

Aufgrund der in diesem Versuch erhaltenen Ergebnisse hatte sich auch gezeigt, dass für die Auswertung der weiteren Versuche die Bezugsbasis „transpirierte Wassermenge“ am besten geeignet ist.

Kapitel 5.

EXPERIMENTE MIT SONNENBLUME: VERGLEICH MIT UND OHNE LUFTKISSEN

5.1 Zusammenfassung

Bei der Nitrifikation und Denitrifikation vor allem unter anaeroben Bedingungen kann Lachgas im Boden entstehen (u. a. DAVIDSON, 1991). Besonders das im Boden teilweise gasförmig im luftgefüllten Wurzelraum befindliche Lachgas gelangt über Diffusions- und Konvektionsprozesse aus dem Boden in die Atmosphäre. CHANG et al. (1997) haben nachgewiesen, dass Raps und Gerste in der Bodenlösung gelöstes Lachgas in die umgebende Atmosphäre abgeben können. RUSCH & RENNENBERG (1998) haben für Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertner) gezeigt, dass bei gasförmigem Lachgasangebot im Wurzelraum der gasförmige Übertritt von Lachgas in die Wurzeln junger Schwarz-Erlenpflanzen sehr gut möglich ist. Aus diesem Grunde wurde der N_2O -Übertritt bei der Sonnenblume vertiefend bei unterschiedlichem Angebot im Wurzelraum (gasförmig in einem Luftkissen und / oder in Wasser gelöst) untersucht. Zu diesem Zweck wurden Sonnenblumenpflanzen in Nährlösung kultiviert. Mit Versuchsbeginn wurden zwei unterschiedliche Behandlungen etabliert. Eine Behandlung hatte ein definiertes Luftvolumen im Wurzelraum (zu Beginn des Versuches waren jeweils ca. 5% des gesamten Wurzelraumes mit Gas gefüllt). Der Wurzelraum der anderen Behandlung war vollständig mit Nährlösung gefüllt. Die Nährlösung der Gefäße beider Behandlungen wurde über ein gemeinsames Ausgleichsgefäß mit N_2O angereichert. Die getrennten Sprosskompartimente wurden mit einer konstanten Menge Außenluft versorgt, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit CO_2 zu gewährleisten und um überschüssige Luftfeuchtigkeit zu entfernen. Veränderungen der N_2O -Konzentrationen zwischen Ein- und Ausgang des Sprosskompartiments wurden kontinuierlich gemessen. Sowohl bei eingeschaltetem Licht (Tag), als auch bei ausgeschalteter Beleuchtung wurde jeweils eine unterschiedliche Beziehung zwischen dem in der Nährlösung gelösten N_2O und der durch die Sonnenblume

abgegebenen N_2O -Menge gefunden. Bei ausgeschalteter Beleuchtung (Nacht) waren die N_2O -Emissionen durch die Pflanzen wie auch die Transpiration deutlich geringer als am Tage. Bei den Versuchsgefäßen der beiden Varianten waren deutlich höhere Lachgasemissionen nachweisbar als bei den Kontrollen. Die Behandlung mit Luftkissen im Wurzelraum zeigte sowohl nachts, als auch tags deutlich höhere Lachgasemissionen als die Variante ohne Luftkissen im Wurzelraum. Aus diesen Ergebnissen wurde geschlossen, dass Sonnenblumenpflanzen grundsätzlich in der Lage sind, in Wasser gelöstes und in der Bodenluft enthaltenes N_2O über die Wurzel aufzunehmen, mit dem Transpirationsstrom in die Blätter zu transportieren und nach und nach über die geöffneten Stomata abzugeben. Gasförmig vorhandenes Lachgas im Wurzelraum führte zu einer höheren Emissionsrate als in Wasser gelöstes Lachgas. Daraus wurde geschlossen, dass Sonnenblumenwurzeln gasförmiges Lachgas deutlich besser aufnehmen und emittieren können als in Wasser gelöstes Lachgas.

5.2 Einleitung

Bei der Nitrifikation und Denitrifikation, vornehmlich unter anaeroben Bedingungen, kann Lachgas im Boden entstehen (u. a. DAVIDSON, 1991). Vor allem das im Boden teilweise gasförmig in den Poren befindliche Lachgas gelangt über Diffusions- und Konvektionsprozesse aus dem Boden in die Atmosphäre. CHANG et al. (1997) zogen aus Experimenten mit Raps und Gerste den Schluss, dass diese beiden Pflanzenarten in der Bodenlösung gelöstes Lachgas in die umgebende Atmosphäre abgeben können. RUSCH & RENNENBERG (1998) haben für Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertner) gezeigt, dass der gasförmige Übertritt von Lachgas in die Aerenchyme der Wurzeln junger Schwarz-Erlenpflanzen sehr gut möglich ist. Es wurde geschlossen, dass das aufgenommene Lachgas gasförmig durch die Aerenchyme in den Spross gelangt. RUSCH & RENNENBERG (1998) haben ebenfalls gezeigt, dass das so beförderte Lachgas über den Stamm der Schwarz-Erle wieder abgegeben wurde. Bis zum heutigen Tag ist jedoch noch nicht bekannt, in welcher Form Lachgas besser von der Pflanze aufgenommen werden kann. Wie oben dargestellt, wurde sowohl der im Wasser gelöste Übergang des Lachgases in die Wurzel als auch ein gasförmiger Eintritt in die Wurzel schon beschrieben. Aus den im Kapitel 4 dargestellten Ergebnissen eröffnete sich eine erweiterte Fragestellung: wie erfolgt der Übertritt von Lachgas in die Wurzel besser, gasförmig oder in Wasser gelöst.

In der nachfolgenden Untersuchung wurden deshalb beide Aneignungswege, gasförmig oder in Wasser gelöst, vergleichend unter Tag- und Nachtbedingungen betrachtet.

5.3 Material und Methoden

Sonnenblumenpflanzen (*Helianthus annuus* L. cv. Frankasol) wurden ab dem 22. Tag nach der Aussaat in einem kontrolliert offenen System (Abb. 3.1.1) mit einer vollständigen Nährlösung kultiviert (Tab. 2.5.2). Nach weiteren 33 Tagen Vorkultur wurde mit dem Versuch begonnen. Die Pflanzen wurden einem Tag- / Nachtrhythmus mit einer sechzehnständigen Licht- und einer achtestündigen Dunkelperiode unterworfen. In jedem Kulturgefäß befanden sich fünf Pflanzen (vgl. Abb. 4.3.1 - 4.3.3). Die Versuchspflanzen wurden mit einem Gemisch aus Optosil R (Fa. Heraeus) und Prestik (Fa. Bostik) fixiert und abgedichtet (vgl. Abb. 4.3.1), um Wurzel- und Sprossraum gasdicht zu trennen. Es wurden zwei unterschiedliche Behandlungen angelegt. Bei der ersten Behandlung wurde darauf geachtet, dass im Wurzelkompartiment kein luftgefüllter Raum vorhanden war (ohne Luftkissen - **OLK**). Bei der zweiten Behandlung wurde zu Beginn ein Luftkissen mit definiertem Volumen (150 ml) etabliert (mit Luftkissen – **MLK**). Die Anreicherung bei der Behandlung OLK wurde mit lachgasangereicherter Nährlösung durchgeführt, die kontinuierlich während der gesamten Versuchsdauer in einem Kreislaufsystem durch die Wurzelkompartimente der Versuchsgefäße gepumpt wurde. Bei der Behandlung MLK wurde die Anreicherung mit Hilfe einer kontinuierlichen Belüftung der Wurzelkompartimente mit lachgasangereicherter Luft, die ebenfalls in einem Kreislauf gepumpt wurde, durchgeführt. In Abb. 3.2.4 sind die beiden Behandlungen schematisch dargestellt.

Beide Anreicherungskreisläufe mündeten in ein gemeinsames Ausgleichsgefäß. Die unterschiedlichen Behandlungen wurden jeweils in vier Wiederholungen durchgeführt. Zur Überprüfung der „natürlichen“ Lachgasemissionen wurden zwei Kontrollgefäße angelegt, deren Wurzelkompartimente mit nicht angereicherter Außenluft versorgt wurden. Dadurch ergab sich eine Gesamtzahl von zehn Kulturgefäßen. Die jeweiligen Gefäße mit unterschiedlichen Behandlungen im Wurzelraum wurden für eine spätere statistische Auswertung vor Versuchsbeginn paarweise einander zugewiesen. Die Spross- und Wurzelkompartimente waren gasdicht voneinander getrennt. Die Sprosskompartimente wurden kontinuierlich und getrennt belüftet. Während der Vorkultur wurden in der Regel sowohl die Spross- als auch die Wurzelbereiche mit Außenluft versorgt.

Zu Versuchbeginn wurde den Anreicherungskreisläufen insgesamt 500ml Lachgas bei 25°C zugegeben. Dies entspricht einer Masse von 0,9 g N₂O pro acht Versuchsgefäße. Die ersten Messungen der Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ergaben im Durchschnitt eine Konzentration von 12,387 g*m⁻³ (Tab. 5.3.1). In der Tabelle 5.3.1 sind alle im Luftpolster des für die Anreicherung der jeweiligen Wurzelkompartimente verwendeten Ausgleichsgefäßes gemessenen Lachgaskonzentrationen und deren Mittelwerte angegeben. Als **wahre Konzentration** ist in der Regel jeweils **der höchste Messwert** am **wahrscheinlichsten**, da bei der Messung der Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes die Volumina der Messproben klein gewählt waren. Somit waren die Probenschläuche erst nach mehreren Messungen vollkommen mit Probenluft gefüllt bzw. gespült. Der größere Abfall der gemessenen Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes zwischen dem 1. und dem 2. Tag in der Tabelle 5.3.1 deutet darauf hin, dass bei der Messung am ersten Versuchstag das Lösungsgleichgewicht zwischen Lachgas im Luftpolster und Lachgas in der Nährlösung höchstwahrscheinlich noch nicht vollständig erreicht war.

Tab. 5.3.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen und deren Mittelwerte im Luftpolster des für die Anreicherung der jeweiligen Wurzelkompartimente verwendeten Ausgleichsgefäßes. Die höchsten Messwerte sind jeweils fett dargestellt (Versuchspflanze Sonnenblume).

	11.06.2001	12.06.2001	13.06.2001	14.06.2001
Messung 1 [mg*m ⁻³]	12417	9091,7	8449,4	8053,7
Messung 2 [mg*m ⁻³]	12322	9339,3	8813,9	8624,3
Messung 3 [mg*m ⁻³]	12421	9592,9	9058,6	8527,4
Mittelwert [mg*m ⁻³]	12386,7	9341,3	8773,97	8401,8

Die Belüftungsvolumina wurden über Durchflussmesser (sog. Flowmeter der Fa. *Fischer & Porter*) geregelt (vgl. Abb. 3.1.6). In den Sprosskompartimenten fand ein Luftaustausch zwischen ca. 6 und 7 l*min⁻¹ statt. Dies reichte aus, um in diesem Entwicklungsstadium die CO₂-Versorgung der Versuchspflanzen und die Entfernung überschüssiger Luftfeuchtigkeit sicherzustellen. Die Entfernung störender Luftfeuchtigkeit (über 21°C Taupunkt) bei der Lachgasmessung konnte mit dieser Belüftungsintensität während den Tagesperioden nicht durchgehend gewährleistet

werden, da die zur Belüftung verwendete Außenluft nicht trocken genug war. Die Konzentrationen von N_2O , CO_2 und H_2O wurden während eines Zeitraums von 79 Stunden an den Ausgängen der Sprosskompartimente mit Hilfe eines automatisierten Probenahme und Gasmesssystems gemessen. Das Messsystem bestand aus einem Messstellenumschalter und einem photoakustischen Messgerät (Fa. *Innova AirTech Instruments*, Dänemark; vgl. Kap. 3 u. Abb. 3.1.1). Vor und nach der Messung der Konzentrationen innerhalb mehrerer Sprosskompartimente wurden die Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Außenluft nach einer unten dargestellten Sequenz gemessen, um eventuelle Konzentrationsunterschiede mit größtmöglicher Sicherheit erfassen zu können.

Sequenz: ohne Luftkissen im Wurzelraum (**OLK**) 1 - Kontrolle (**k**) 2 - Kanal8 – mit Luftkissen im Wurzelraum (**MLK**) 1 - **k**2 - Belüftungsluft (**B**) – **OLK**2 - **MLK**2 - Kanal8 -**MLK**3 - **MLK**4 – **B** – **OLK**3 - **OLK**4 - Kanal8 – **B**

Mit Kanal 8 wurden Vergleichsmessungen durchgeführt, um den Einfluss außerhalb des Kalibrationsbereiches liegender Luftfeuchtigkeit erfassen und später korrigieren zu können.

Aufgrund der Gestaltung der Messsequenz, kam es zu verhältnismäßig langen Intervallen bei der Erfassung der Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Luft. Dies hat eine geringere Genauigkeit für die „innenliegenden“ Vergleichspunkte zur Folge.

Die Messproben wurden während der ersten 37 Stunden des Versuchs auf ambiente Luftfeuchtigkeit getrocknet. Dies geschah mit einem zwischen Multigasmonitor und Messstellenumschalter eingebauten Naphionschlauch von 1m Länge. Im Verlauf der darauffolgenden 24 Stunden wurden die Messwerte ohne Trocknung erfasst, um die Transpirationsrate der Versuchspflanzen erfassen zu können. Während der letzten 18 Stunden des Versuchs wurde die Feuchtigkeit der zur Belüftung verwendeten Luft nicht mehr gemessen.

Die Konzentrationen von N_2O , CO_2 und H_2O in der zur Belüftung der Anreicherungsvariante verwendeten Luft wurden in regelmäßigen Abständen, jedoch diskontinuierlich, ebenfalls beprobt.

5.4 Ergebnisse

In der Abbildung 5.4.1 sind die gemessenen Lachgaskonzentrationen aller Gefäße und die in der Belüftungsluft gemessenen Lachgaskonzentration dargestellt. In der ersten Tagperiode fand bis ca. 19:00 Uhr noch keine Lachgasanreicherung statt. Für diesen Zeitraum waren bei den gemessenen Lachgaskonzentrationen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsgefäßen zu erkennen. Die Messwerte der Versuchsgefäße unterschieden sich nur manchmal in verhältnismäßig geringem Umfang von den gemessenen Lachgaskonzentrationen in der zur Belüftung der Sprosshauben verwendeten Luft.

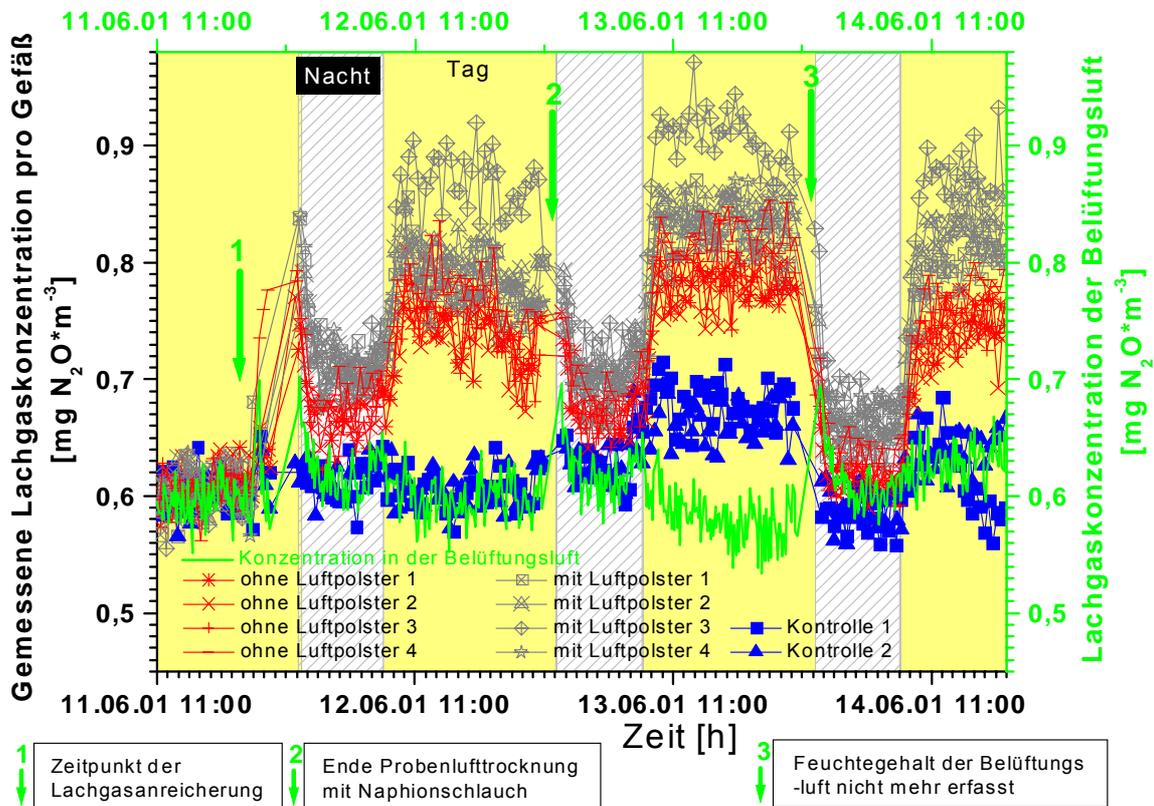


Abb. 5.4.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen aller Einzelgefäße während des gesamten Versuchszeitraums und Verlauf der Lachgaskonzentration in den Proben zur Erfassung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft. Die Pfeile geben die Zeitpunkte an, zu denen Veränderungen bei der Gasmessung vorgenommen wurden (Versuchspflanze Sonnenblume).

Zu dem mit dem ersten Pfeil markierten Zeitpunkt wurde die Lachgasanreicherung vorgenommen, worauf ein deutlicher Anstieg der N_2O -Konzentration bis zum Beginn der Dunkelperiode zu beobachten ist. In Tabelle 5.4.1 sind die für jeden Tag jeweils drei gemessenen und die daraus errechneten Durchschnittswerte für die

Lachgaskonzentration im Wurzelraum der angereicherten Versuchsgefäße und die daraus errechnete Lachgaskonzentration in der Nährlösung für den gesamten Versuchszeitraum angegeben.

Nur kurze Zeit nach der Lachgasanreicherung ließen sich schon in der ersten Nachtperiode deutliche Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Behandlungen und der Kontrolle erkennen. Die Gefäße, die ein Luftkissen im Wurzelraum hatten, zeigten während der gesamten Versuchsdauer die höchsten gemessenen Lachgaskonzentrationen. Die angereicherte Behandlung ohne Luftpolster im Wurzelraum zeigte geringere gemessene Lachgaskonzentrationen als die Behandlung mit Luftpolster und deutlich höhere Messwerte als die anreicherungsfreien Kontrollgefäße.

In der dritten Tagperiode (13.06.01 00:00 - 24:00) wurden große Unterschiede zwischen der Lachgaskonzentration in der Belüftungsluft und der Lachgaskonzentration in den Hauben der Kontrollgefäße erfasst (der Beginn wurde mit dem zweiten Pfeil markiert). Diese Unterschiede waren messtechnisch bedingte Artefakte. Sie wurden durch Wassergehalte der Messproben verursacht, die deutlich über dem für eine Feuchtekompensation eingestellten Kalibrationsbereich lagen. Innerhalb des vorherigen Versuchszeitraums wurden die Gasproben mit einem zwischengeschalteten Naphionschlauch für die Messung getrocknet, weshalb die oben beschriebenen Artefakte in diesem Zeitraum nicht auftraten. Die Trocknung hatte allerdings zur Folge, dass für den ersten Versuchszeitraum keine Informationen über die Transpirationsrate der Versuchspflanzen vorlagen.

Die im Vergleich zu den Messungen der Versuchsgefäße recht hohen Lachgaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Luft während der dritten Nacht- und der vierten Tagperiode (der Beginn wurde mit dem dritten Pfeil markiert) sind ebenfalls messtechnisch bedingte Artefakte. In dem eben beschriebenen Zeitraum wurden die Proben zur Bestimmung der Gaskonzentrationen in der zur Belüftung der Hauben verwendeten Luft unter Zuhilfenahme eines Naphionschlauches jeweils bis zur Sättigung mit Wasserdampf angereichert. Die so gewonnenen Informationen flossen später teilweise bei der Ermittlung eines Korrekturfaktors zur Messwertkorrektur der Lachgaskonzentrationen bei überhöhter Luftfeuchtigkeit mit ein. Durch diese Vorgehensweise gingen allerdings die Informationen über den ursprünglichen Wassergehalt der zur Belüftung der Hauben

verwendeten Luft verloren. Dies hatte zur Folge, dass die absolute Transpiration der Versuchspflanzen für diesen Zeitraum nicht errechnet werden konnte.

Tab. 5.4.1: Im Luftpolster des Anreicherungsgefäßes gemessene und daraus errechnete Lachgaskonzentrationen im Luftkissen bzw. in der Nährlösung der Versuchsgefäße mit Lachgasanreicherung. Die jeweils höchsten Messwerte sind fett wiedergegeben (Versuchspflanze Sonnenblume).

	11.06.2001	12.06.2001	13.06.2001	14.06.2001
Messung 1 der Konzentration im Luftpolster [mg*m ⁻³]	12417	9091,7	8449,4	8053,7
Messung 2 der Konzentration im Luftpolster [mg*m ⁻³]	12322	9339,3	8813,9	8624,3
Messung 3 der Konzentration im Luftpolster [mg*m ⁻³]	12421	9592,9	9058,6	8527,4
Mittelwert der Konzentration im Luftpolster [mg*m ⁻³]	12386,7	9341,3	8773,97	8401,8
Nährlösungskonzentration errechnet aus Höchstwert Luftpolster [mg*m ⁻³]	25585,9	19760,3	18659,7	17765,1
Nährlösungskonzentration errechnet aus Mittelwert Luftpolster [mg*m ⁻³]	25515,1	19242	18073,4	17306,8
Interpolierte Gleichgewichtskonzentration im Luftpolster [mg*m ⁻³]	10125,65	n. b.	n. b.	n. b.
Nährlösungskonzentration ausgehend vom interpolierten Wert des Luftpolsters bezogen auf den höchsten Messwert [mg*m ⁻³]	27974,9	<u>26503</u>	<u>25026,9</u>	23827
Nährlösungskonzentration ausgehend vom interpolierten Wert des Luftpolsters bezogen auf den durchschnittlichen Messwert [mg*m ⁻³]	27974,9	25807,9	24240,5	23212,3

Um die absoluten Lachgasabgaben der jeweiligen Versuchsgefäße frei von unterschiedlichen Belüftungsintensitäten in den einzelnen Hauben und frei von Schwankungen in der Lachgaskonzentration der Belüftungsluft vergleichen zu können, wurden die Messwerte der jeweiligen Versuchsgefäße mit den zugehörigen Faktoren auf absolute Lachgasemissionen pro Gefäß umgerechnet. Die Ergebnisse der Normalisierung der Messwerte sind in Abbildung 5.4.2 dargestellt. Zusätzlich ist in dieser Grafik noch die gemessene Lachgaskonzentration im Luftpolster des zur Lachgasanreicherung verwendeten Ausgleichsgefäßes mit der Skalierung auf der rechten Seite aufgetragen. Die eingezeichnete Nulllinie stellt die herausgerechnete Lachgaskonzentration der zur Belüftung der Hauben verwendeten Luft dar. Mit Hilfe

dieser Linie lassen sich die absoluten Emissionen bzw. zum Teil gemessenen Lachgasaufnahmen besser erkennen.

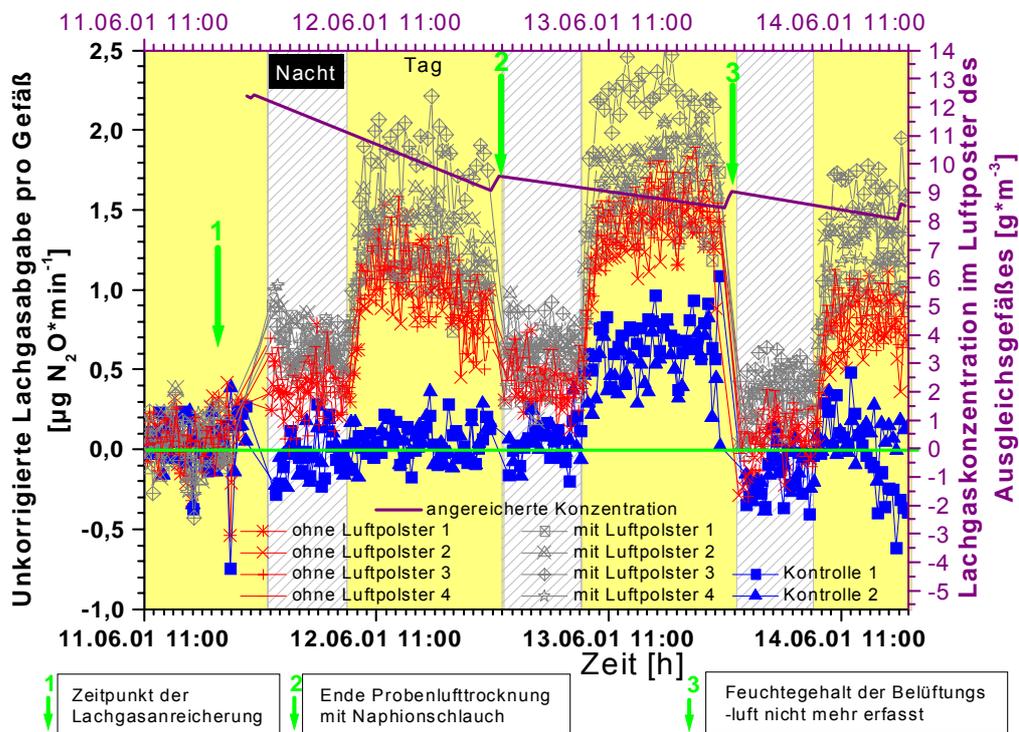


Abb. 5.4.2: Absolute Lachgasemissionen aller Einzelgefäße während des gesamten Versuchszeitraums. Die Pfeile geben die Zeitpunkte an, zu denen Veränderungen bei der Gasmessung vorgenommen wurden. Als Gerade und auf der rechten Seite skaliert ist der Verlauf der gemessenen Lachgaskonzentration im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes aufgetragen (Versuchspflanze Sonnenblume).

Die in Abbildung 5.4.1 festgestellten Unterschiede zwischen Gefäßen mit unterschiedlichen Formen des Lachgasangebotes und den Kontrollen blieb auch nach der Normalisierung der Messwerte auf gleiche Belüftungsintensität und der Ermittlung der absoluten Lachgasemission erhalten (Abb. 5.4.2)

Die bisher vorgenommene Umrechnung der Messwerte reichte allerdings nicht vollkommen aus, um mit Sicherheit auf Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungen und der Kontrolle schließen zu können. Der Grund dafür lag darin, dass die Versuchspflanzen in den jeweiligen Gefäßen zwar ähnlich alt, groß und entwickelt waren, aber keinesfalls gleich. Sie unterschieden sich, trotz bedarfsangepasster Luftzufuhr in den Hauben, zum Teil recht deutlich in den Transpirationsraten pro Gefäß. Die Abbildung 5.4.3 gibt die gemessenen Transpirationsraten für die erfassten Versuchszeiträume wieder. Der Wassergehalt in der zur Belüftung verwendeten Luft ist in Abbildung 5.4.3 ebenfalls eingezeichnet

und auf der rechten Seite skaliert. Zu beachten ist, dass, ab dem durch den dritten Pfeil markierten Zeitpunkt, die Messproben zur Bestimmung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft zu Kontrollzwecken mit Wasserdampf angereichert wurden.

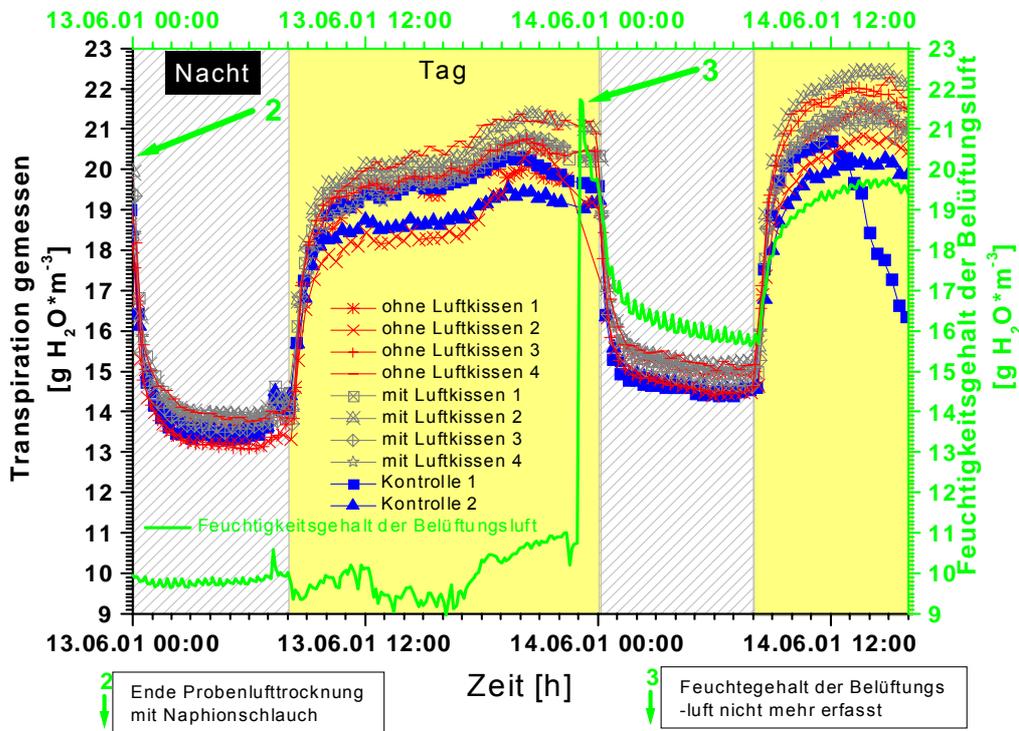


Abb. 5.4.3: Gemessene Transpirationsraten aller Gefäße für die aufgrund vorliegender Messungen darstellbaren Versuchszeiträume und Verlauf der Luftfeuchtigkeit in den Proben zur Erfassung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft. Zum Zeitpunkt 2 wurde der zur Probenlufttrocknung zwischen Messgerät und Messstellenumschalter eingebaute Naphionschlauch entfernt. Zum Zeitpunkt 3 wurde begonnen, die Proben zur Erfassung der Gaskonzentrationen in der Belüftungsluft über einen Naphionschlauch zu befeuchten (Versuchspflanze Sonnenblume).

Zwischen dem Gefäß mit der geringsten gemessenen Transpiration und dem mit der höchsten gemessenen Transpiration (Abb. 5.4.3) war ein Unterschied von über 10%. In der Darstellung der gemessenen Transpirationsraten konnte kein Muster erkannt werden, welches auf die unterschiedliche Behandlung der Pflanzen im Wurzelraum (mit Luftkissen, ohne Luftkissen, mit oder ohne Lachgasanreicherung) hätte zurückgeführt werden können.

In Abbildung 5.4.4 sind die auf gleiche Belüftungsintensität normalisierten und um die in der Belüftungsluft enthaltene Luftfeuchtigkeit korrigierten absoluten Transpirationsraten für alle Versuchsgefäße dargestellt. Für diese Umformung war wegen der oben dargestellten Gründe nur der Versuchszeitraum vom 13.06.01 00:00 Uhr bis 13.06.01 24:00 Uhr geeignet. Wie auch schon in Abbildung 5.4.3 ist kein auf

die Behandlung der Versuchspflanzen zurückzuführendes Muster zu erkennen. Allerdings erhöhte sich der Unterschied zwischen dem Gefäß mit der geringsten Transpiration und dem Gefäß mit der höchsten Transpiration auf über 20 %.

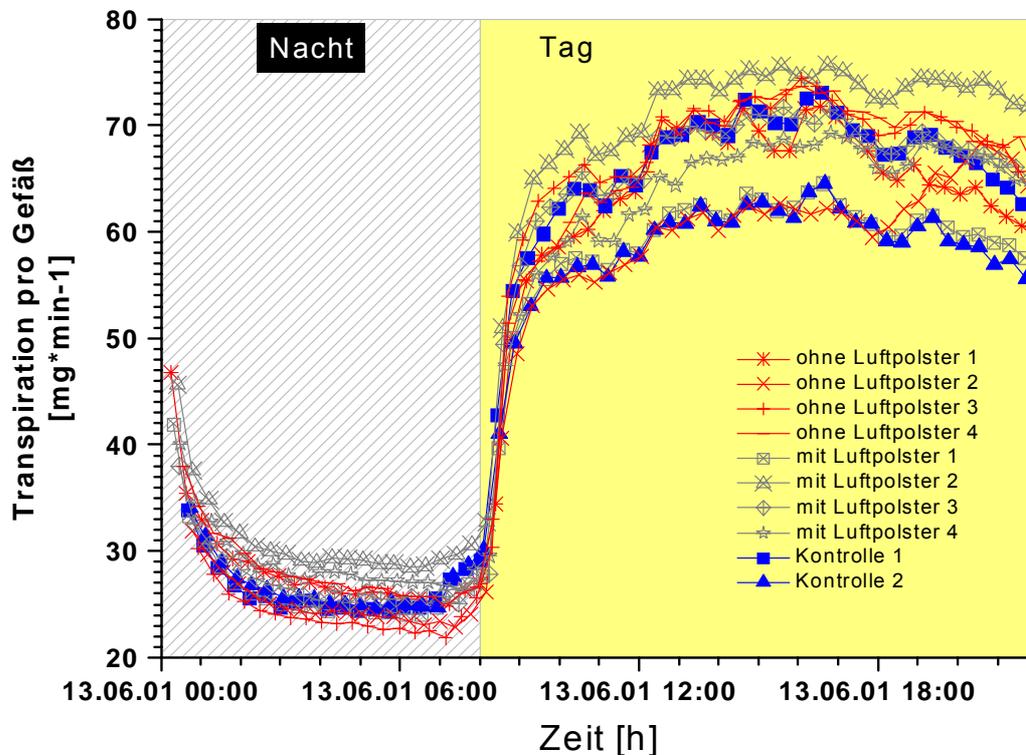


Abb. 5.4.4: Absolute Transpirationsraten aller Gefäße für den erfassten Versuchszeitraum (Versuchspflanze Sonnenblume).

Wie im Zusammenhang mit Abbildung 5.4.1 beschrieben, kam es teilweise zu Überschätzungen der Lachgaskonzentrationen durch die den Kalibrationsbereich des Gasmessgerätes überschreitende Luftfeuchtigkeit in den Messproben. Davon waren die Messungen für den Zeitraum vom 13.06.01 08:00 Uhr bis 13.06.01 24:00 Uhr aufgrund der tagsüber hohen Transpirationsrate und des tagsüber hohen Wassergehaltes in der zur Haubenbelüftung verwendeten Luft betroffen. Zur Ermittlung eines Korrekturfaktors für die Überschreitung des Kalibrationsbereiches wurden während des Versuchs und danach zusätzliche Messungen durchgeführt. Aus diesen Messungen wurden zwei Korrekturfaktoren entwickelt, die eine iterative Eingrenzung der wahren Lachgaskonzentrationen ermöglichten. Der Korrekturfaktor gab wieder, um wie viel $\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$ sich der N_2O Messwert pro $\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$ erhöhtem Wassergehalt in der Probenluft veränderte. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Wassergehalte in den Proben lag die obere Grenze des Intervalls für den Korrekturfaktor bei $1,16769\text{E}^{-05} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ und die untere Grenze bei $6,38446\text{E}^{-06} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$.

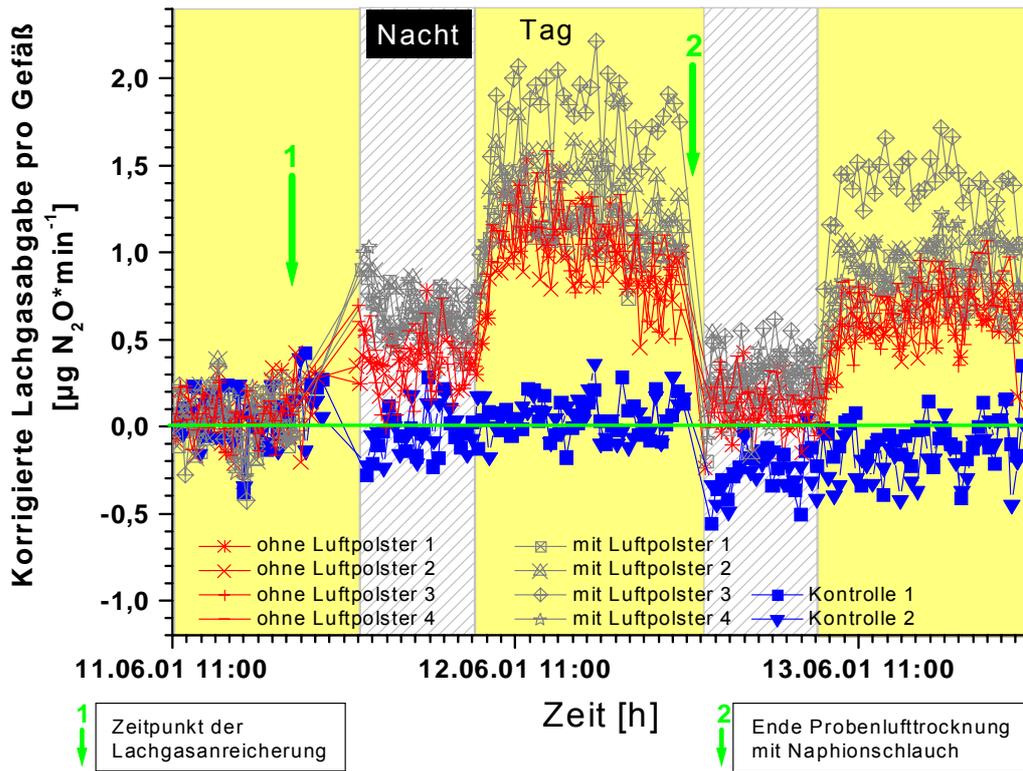


Abb. 5.4.5: Korrigierte Lachgasabgabe aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00 aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte. Korrekturfaktor 1,16769E-05 (Versuchspflanze Sonnenblume).

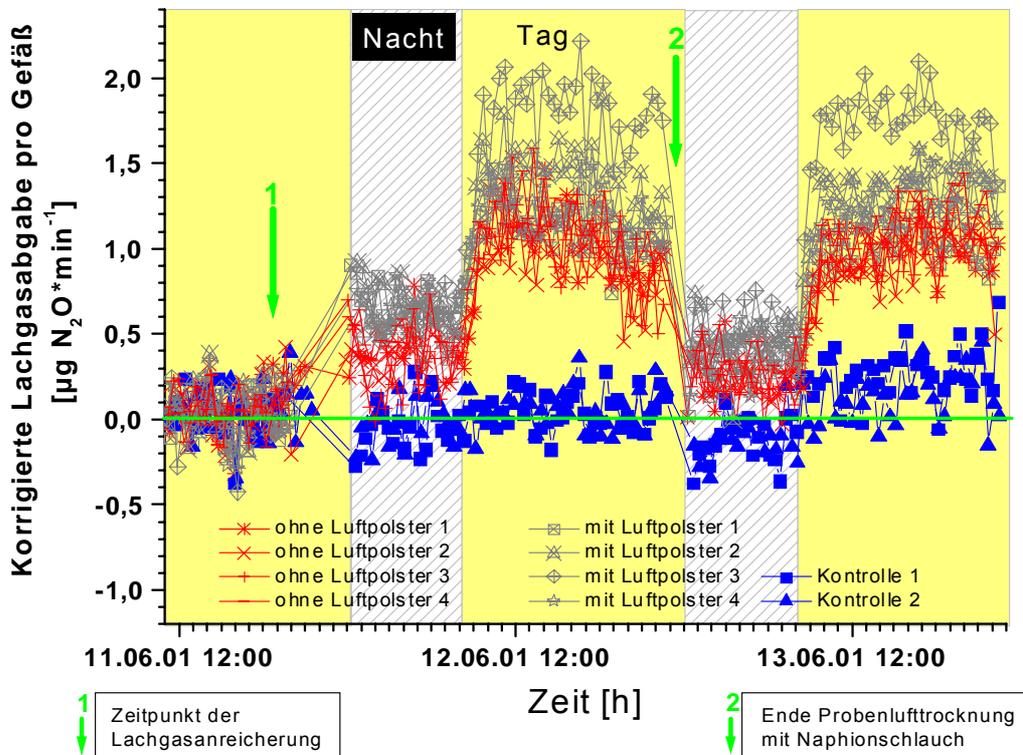


Abb. 5.4.6: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasabgabe aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Korrekturfaktor 6,38446E-06 (Versuchspflanze Sonnenblume).

Die Abbildungen 5.4.5 und 5.4.6 stellen die zum Teil korrigierten absoluten Lachgasemissionsraten der einzelnen Gefäße dar.

Für den Zeitraum vom 13.06.01 00:00 Uhr bis 13.06.01 24:00 Uhr sind die in Abbildung 5.4.5 eingezeichneten Werte mit dem Faktor $1,16769E^{-05} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigiert. Abbildung 5.4.6 zeigt, die für den Zeitraum vom 13.06.01 00:00 Uhr bis 13.06.01 24:00 mit dem Faktor $6,38446E^{-06} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigierten Werte. Obwohl die Luftfeuchtigkeit in der Nachtperiode vom 13.06.01 00:00 Uhr bis 13.06.02 08:00 Uhr innerhalb des Kalibrationsbereiches des Messgerätes für die Kompensation des Feuchtigkeitseinflusses auf die Lachgasmessung lag, wurden die Messwerte dieses Zeitraumes ebenfalls mit den Korrekturfaktoren korrigiert. Dies geschah, um die Qualität des jeweiligen Korrekturfaktors besser erfassen zu können. Die Güte der Korrektur wurde anhand des Verlaufes der Lachgasabgabe der Kontrollgefäße überprüft. Es wurde angenommen, dass der Verlauf der Emissionskurven der Kontrollgefäße nach einer vollständigen Normalisierung die Luftaustauschraten und die Transpirationsraten betreffend, während des gesamten Versuchszeitraum auf gleichem oder zumindest sehr ähnlichem Niveau verlaufen müssten. Unter Beachtung dieser Annahme bei der Interpretation der Abbildungen 5.4.5 und 5.4.6 ergab sich, dass die wahren Lachgaskonzentrationen zwischen den in den beiden Abbildungen dargestellten Kurven liegen mussten.

In den Abbildungen 5.4.7 und 5.4.8 sind die ermittelten Lachgasemissionen pro transpirierter Wassermenge für den Versuchszeitraum vom 13.06.01 00:00 Uhr bis 13.06.01 24:00 Uhr dargestellt. Diese Darstellung der Messergebnisse war nur für den oben angegebenen Versuchszeitraum möglich, da nur für diesen Zeitraum alle erforderlichen Messwerte vorlagen. Die Darstellung der Lachgasemissionen in der Einheit $\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{gH}_2\text{O}^{-1}$ fasst alle zuvor beschriebenen Überlegungen, Korrekturen und Normalisierungen in einem Ausdruck zusammen. Diese Einheit ist zudem bezüglich des Transpirationsverhaltens und des Entwicklungsstadiums der Pflanzen der jeweiligen Versuchsgefäße vollkommen unabhängig. Sie erlaubte den direkten Vergleich der Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Behandlungen und der Kontrolle. Der obere Bereich für die wahren Verläufe der auf die Transpirationsrate bezogenen Lachgasemissionen ist in Abbildung 5.4.7 dargestellt. Der untere Bereich ist in Abbildung 5.4.8 dargestellt.

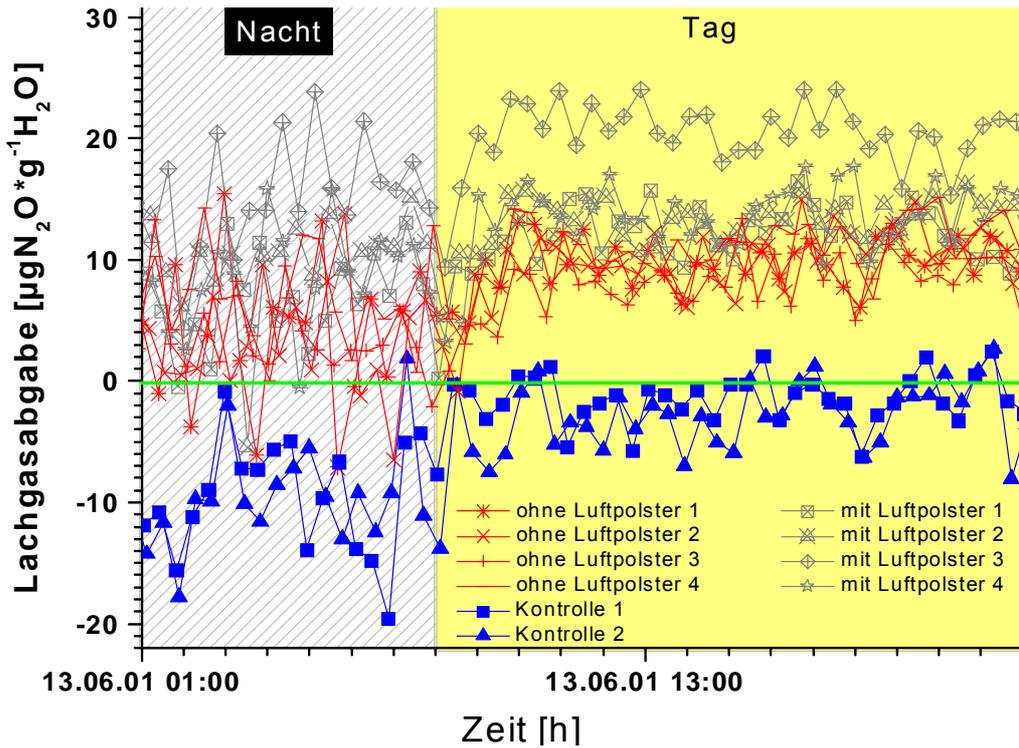


Abb. 5.4.7: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Korrekturfaktor $1,16769\text{E}^{-05}$ (Versuchspflanze Sonnenblume).

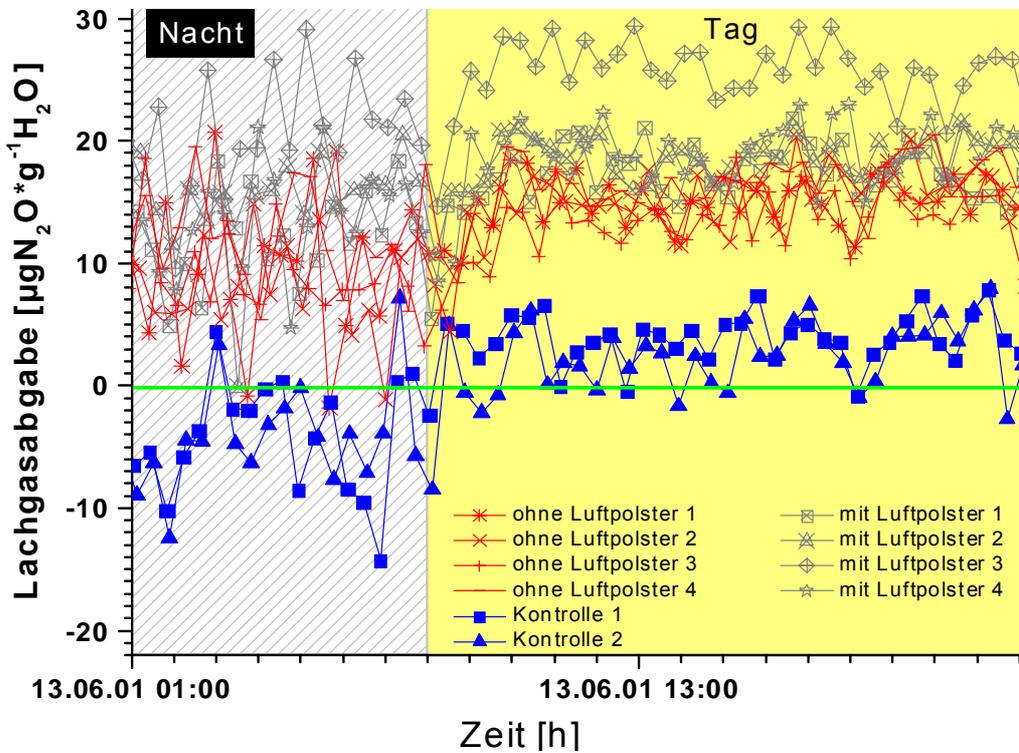


Abb. 5.4.8: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission aller Gefäße für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Korrekturfaktor $6,38446\text{E}^{-06}$ (Versuchspflanze Sonnenblume).

Die jeweils einander zugeordneten Wiederholungen der beiden Behandlungen (MLK1 zu OLK1, MLK2 zu OLK2 usw.) waren mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,1\%$ jeweils signifikant voneinander verschieden. Alle Wiederholungen beider Versuchsvarianten waren signifikant mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,1\%$ von allen Wiederholungen der Kontrolle verschieden.

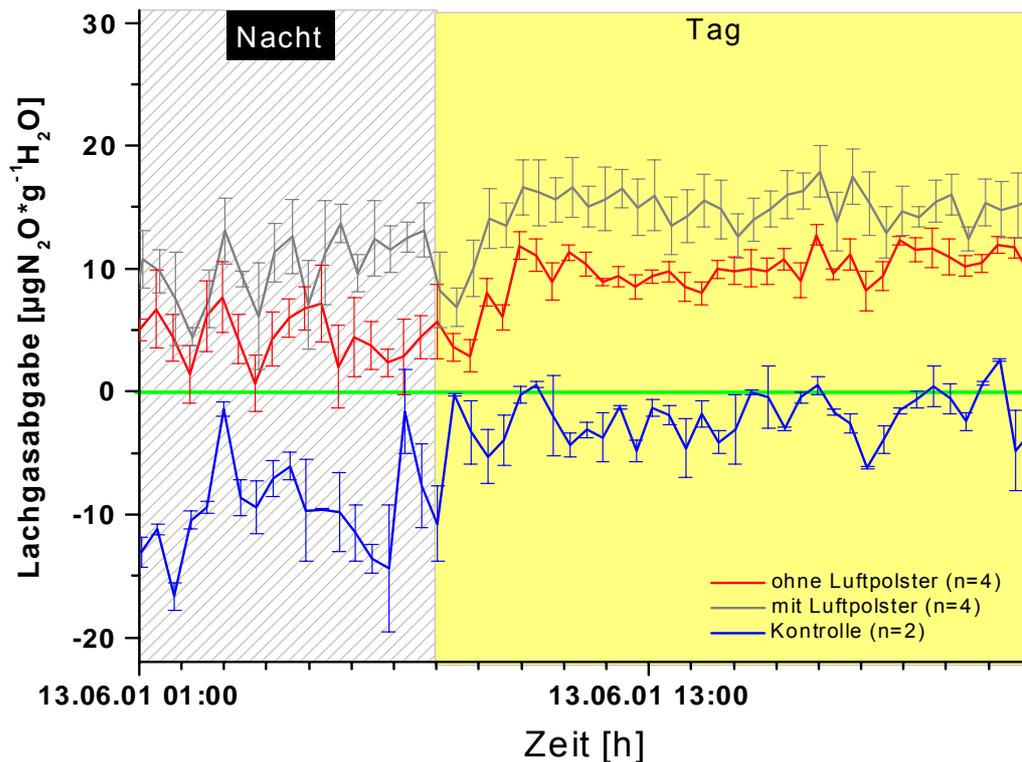


Abb. 5.4.9: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Es sind die Mittelwerte der jeweiligen Behandlungen, der Kontrolle und die jeweils dazugehörigen Standardfehler dargestellt. Korrekturfaktor $1,16769E^{-05}$ (Versuchspflanze Sonnenblume).

Um einen besseren Vergleich zwischen den Ergebnissen der beiden unterschiedlichen Behandlungen und der Kontrolle vornehmen zu können, sind die in den Abbildungen 5.4.7 und 5.4.8 dargestellten Ergebnisse in den Abbildungen 5.4.9 und 5.4.10 als Mittelwerte und mit den dazugehörigen Standardfehlern dargestellt.

Deutlich lässt sich in diesen Darstellungen erkennen, dass die Variante mit einem Luftpolster im Wurzelraum am Tag, absolut betrachtet, mehr Lachgas über die

Transpiration emittiert hat, als die Variante ohne Luftpolster im Wurzelraum. Diese Beobachtung trifft in etwas geringerem Maße auch auf die Nacht zu. Die Unterschiede beider Behandlungen zur Kontrolle sind sowohl nachts als auch am Tag sehr deutlich ausgeprägt.

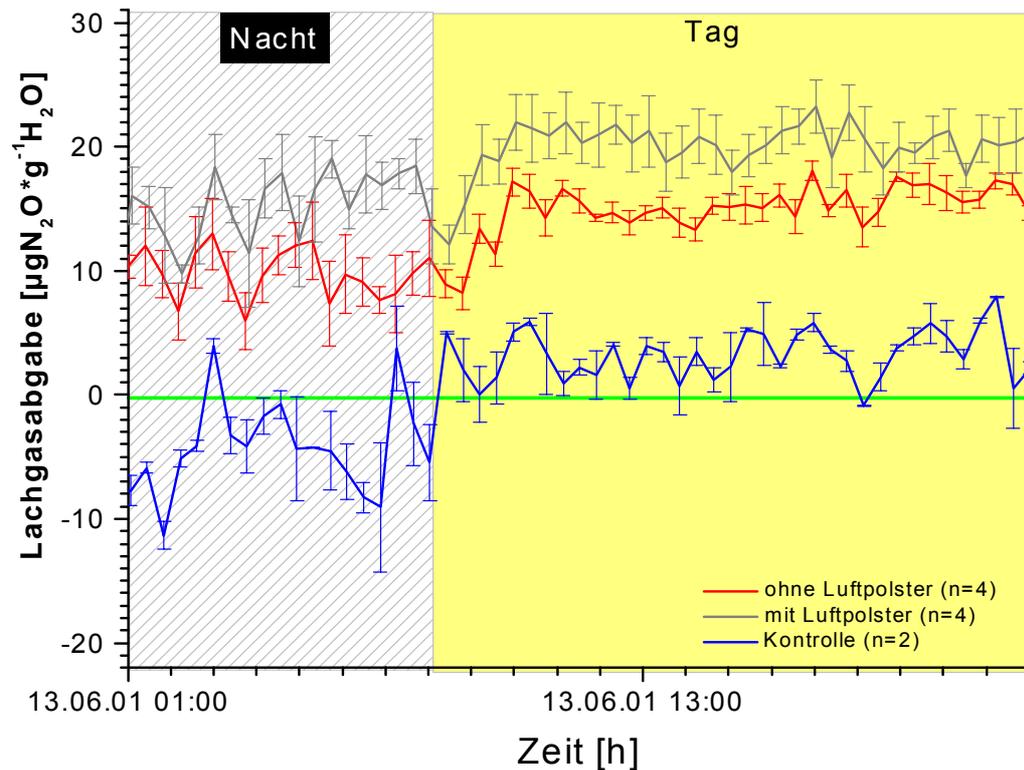


Abb. 5.4.10: Aufgrund der über dem Kalibrationsbereich liegenden Luftfeuchte korrigierte Lachgasemission für den Zeitraum von 13.06.01 00:00 bis 13.06.01 24:00. Es sind die Mittelwerte der jeweiligen Behandlungen, der Kontrolle und die jeweils dazugehörigen Standardfehler dargestellt. Korrekturfaktor $6,38446\text{E}^{-06}$ (Versuchspflanze Sonnenblume).

Die jeweiligen Mittelwerte der beiden Behandlungen und der Kontrolle waren mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,1\%$ jeweils signifikant voneinander verschieden.

5.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Für ein besseres Verständnis der Ergebnisse und zur eindeutigen Klärung der Zusammenhänge sind in Tabelle 5.5.1 die gemessenen Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes und die damit errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Varianten wiedergegeben. Die Herleitung dieser Werte ist der Tabelle 5.4.1 und den unten stehenden Ausführungen zu entnehmen.

Tab. 5.5.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume).

	Höchste im Luftpolster gemessene N ₂ O-Konzentration [g*m ⁻³]	Errechnete N ₂ O-Konzentration in der Nährlösung [g*m ⁻³]
Nacht	9,593	<u>26,503</u>
Tag	9,059	<u>25,027</u>

Die Berechnung der in Tabelle 5.5.1 wiedergegebenen Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Varianten wurde, da die Konzentrationen nicht direkt gemessen werden konnten, unter folgenden, idealisierten Prämissen rein mathematisch, ohne Zuhilfenahme der Gasgesetze bestimmt:

- Es lag ein gasdichtes, abgeschlossenes Kreislaufsystem vor.
- Gesamte zugegebene Lachgasmenge war 0,9g.
- Gesamtvolumen des Versuchsaufbaus war während der gesamten Versuchsdauer 36l.
- Das Verhältnis von Luft (im Ausgleichsgefäß, den Versorgungsschläuchen und den Wurzelkompartimenten) zu Nährlösung (im Ausgleichsgefäß, den Versorgungsschläuchen und den Wurzelkompartimenten) betrug während der gesamten Versuchsdauer 6l zu 30l.

Während in der Regel in den Grafiken wegen einer besseren Darstellbarkeit keine SI Einheiten verwendet wurden, wurde versucht bei den Tabellen das Internationale Einheitensystem zu berücksichtigen. Trotz dieser Unterschiede sind die Werte in den Tabellen und Grafiken einfach ineinander zu überführen und direkt zu vergleichen; in Bezug auf in Wasser gelöste Substanzen gilt z. B.:

$$(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})\cdot 1000 = \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} = \text{mg}\cdot\text{l}^{-1} = \text{g}\cdot\text{m}^{-3}/(1000) = \text{g}\cdot\text{t}^{-1}/(1000)$$

Da aufgrund der in Tabelle 5.3.1 dargestellten Messungen für den ersten Versuchstag für Lachgas ein Konzentrationsausgleich zwischen Gas- und Flüssigkeitsvolumen als unwahrscheinlich angenommen wurde, wurden die Gleichgewichtskonzentrationen über lineare Interpolationen bestimmt:

Es ergab sich für die zu Versuchsbeginn zu erwartende Ausgleichskonzentration im Luftpolster des Anreicherungssystems:

(1) $9,5929 \text{ mg N}_2\text{O}\cdot\text{l}^{-1}$ (zum zweiten Messzeitpunkt im Luftpolster gemessene Konzentration) + $0,53275 \text{ mg N}_2\text{O}\cdot\text{l}^{-1}$ (durchschnittliche, tägliche Konzentrationsabnahme im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes während des Versuchs) = $10,12565 \text{ mg N}_2\text{O}\cdot\text{l}^{-1}$ (zum ersten Messzeitpunkt im Luftpolster erwartete Gleichgewichtskonzentration)

Für die am ersten Versuchstag im Gleichgewicht im Luftraum des Anreicherungssystems angenommene, gelöste Lachgasmenge ergab sich aus:

(2) $6 \text{ l (gesamtes, angenommenes Luftvolumen)} \cdot 10,12565 \text{ mg N}_2\text{O}\cdot\text{l}^{-1}$ (zum ersten Messzeitpunkt im Luftpolster erwartete Gleichgewichtskonzentration) = $60,7539 \text{ mg N}_2\text{O}$ (zum ersten Messzeitpunkt im Luftpolster angenommene N_2O -Menge)

Für die am ersten Versuchstag im Gleichgewicht in der Nährlösung gelöste, gesamte Lachgasmenge ergab sich aus (2):

(3) $900 \text{ mg N}_2\text{O}$ (gesamte, zugegebene Lachgasmenge) – $60,7539 \text{ mg N}_2\text{O}$ (zum ersten Messzeitpunkt im Luftpolster angenommene N_2O -Menge) = $839,2461 \text{ mg N}_2\text{O}$ (Restmenge)

Schließlich wurde die bei erreichtem Gleichgewicht anfänglich gelöste Lachgasmenge pro Liter Nährlösung aus (3) wie folgt bestimmt.

(4) $839,2461 \text{ mg N}_2\text{O (Restmenge)} / 30\text{l (gesamtes Nährlösungsvolumen)} = 27,97487 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1}$ (Konzentration in der Nährlösung).

Analog zu den oben durchgeführten Rechnungen ergaben sich die in Tabelle 5.5.1 aufgeführten theoretisch in der Nährlösung enthaltenen Lachgasmengen für die jeweiligen Versuchsabschnitte (zu vergleichen ist ebenfalls Tabelle 5.4.1).

Um die Unterschiede zwischen den beiden Versuchsvarianten – mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum – noch besser zu erfassen und um sie in Bezug auf eine gleiche Basis zueinander ins Verhältnis zu setzen, wurden Emissionskoeffizienten bezogen auf den Lachgasgehalt in der angereicherten Nährlösung ermittelt. Die Emissionskoeffizienten wurden für beide bei der Luftfeuchtigkeitskorrektur verwendeten Faktoren errechnet. Die Tabelle 5.5.2 stellt die Mittelwerte der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen für Tag, Nacht und für jede Wiederholung bei einem Korrekturfaktor von $6,38446\text{E}^{-06} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ getrennt dar. Ebenfalls angegeben sind **die Mittelwerte aller Wiederholungen der jeweiligen Varianten**. Die Tabelle 5.5.3 enthält die gleichen Angaben wie die Tabelle 5.5.2 jedoch für den Feuchtekorrekturfaktor $1,16769\text{E}^{-05} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$.

Tab. 5.5.2: Durchschnittliche relative Lachgasabgabe pro g transpirierten Wassers auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von $6,38446\text{E}^{-06}$. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume).

	Ohne Luft- kissen 1 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Ohne Luft- kissen 2 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Ohne Luft- kissen 3 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Ohne Luft- kissen 4 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mittel- wert OLK [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mit Luft- kissen 1 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 2 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 3 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 3 3[μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mittel- wert MLK [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	k1 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	k2 [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]	Mittel- wert k [μg $\text{N}_2\text{O} \cdot$ g^{-1} H_2O]
Nacht	9,182	8,919	9,061	12,172	9,833	11,960	14,990	20,213	13,074	15,059	-4,466	-4,411	-4,438
Tag	15,037	14,941	13,498	16,266	14,936	17,621	18,381	25,487	18,678	20,042	4,143	-1,409	1,368

Tab. 5.5.3: Durchschnittliche relative Lachgasabgabe pro g transpirierten Wassers auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von $1,16769E^{-05}$. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume).

	Ohne Luft- kissen 1 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Ohne Luft- kissen 2 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Ohne Luft- kissen 3 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Ohne Luft- kissen 4 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mittel- wert OLK [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mit Luft- kissen 1 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 2 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 3 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 3[μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mittel- wert MLK [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	k1 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	k2 [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]	Mittel- wert k [μg N_2O^* g^{-1} H_2O]
Nacht	3,867	3,604	3,745	6,855	4,515	6,643	9,674	14,9	7,807	9,756	-9,782	-9,728	-9,755
Tag	9,721	9,625	8,182	10,951	9,619	12,306	13,066	20,171	13,415	14,739	-1,173	-6,725	-3,949

Die Tabelle 5.5.4 stellt die Emissionskoeffizienten für Tag, Nacht und für jede Wiederholung bei einem Korrekturfaktor von $6,38446E^{-06}$ ($\mu\text{g N}_2\text{O}^* \text{m}^{-3}$)*($\mu\text{g H}_2\text{O}^* \text{m}^{-3}$)⁻¹ getrennt dar. Ebenfalls angegeben sind **die mittleren Emissionskoeffizienten aller Wiederholungen der jeweiligen Varianten**. Die Tabelle 5.5.5 enthält die gleichen Angaben wie die Tabelle 5.5.4 jedoch für den Feuchtekorrekturfaktor $1,16769E^{-05}$ ($\mu\text{g N}_2\text{O}^* \text{m}^{-3}$)*($\mu\text{g H}_2\text{O}^* \text{m}^{-3}$)⁻¹.

Tab. 5.5.4: Emissionskoeffizienten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von $6,38446E^{-06}$. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume).

	Ohne Luftkis- sen 1	Ohne Luftkis- sen 2	Ohne Luftkis- sen 3	Ohne Luftkis- sen 4	Mittel- wert OLK	Mit Luftkis- sen 1	Mit Luftkis- sen 2	Mit Luftkis- sen 3	Mit Luftkis- sen 3	Mittel- wert MLK
Nacht	0,346	0,337	0,342	0,459	0,371	0,451	0,566	0,763	0,493	0,568
Tag	0,601	0,597	0,539	0,65	0,597	0,704	0,734	1,018	0,746	0,801

Tab. 5.5.5: Emissionskoeffizienten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt für den Luftfeuchtigkeitskorrekturfaktor von $1,16769E^{-05}$. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet. Die Daten beziehen sich auf den 13.06.01 (Versuchspflanze Sonnenblume).

	Ohne Luftkissen 1	Ohne Luftkissen 2	Ohne Luftkissen 3	Ohne Luftkissen 4	Mittelwert OLK	Mit Luftkissen 1	Mit Luftkissen 2	Mit Luftkissen 3	Mit Luftkissen 3	Mittelwert MLK
Nacht	0,146	0,136	0,141	0,259	0,170	0,251	0,365	0,562	0,295	0,368
Tag	0,388	0,385	0,327	0,438	0,384	0,492	0,522	0,806	0,536	0,589

Da die Emissionskoeffizienten als prozentualer Anteil des emittierten Lachgases am potentiell mit dem für die Transpiration benötigten Wasser aufgenommenen Lachgasmenge zu interpretieren sind, wurde aus den Tabellen abgeleitet, dass Sonnenblumenpflanzen nur einen Teil des aus dem Boden aufgenommenen Lachgases in die die Sprosse umgebende Atmosphäre abgeben. Da bei der stichprobenartigen mikroskopischen Untersuchung von Wurzelschnitten keine aerenchymatischen Gewebe gefunden wurden (siehe Kap. 4 Abb. 4.5.1) und da keine Emissionskoeffizienten ermittelt wurden, die deutlich über eins lagen, wurde das Vorhandensein von Aerenchyman für diesen Versuch ausgeschlossen.

Aufgrund der in Abbildung 5.4.5 sichtbaren Verhältnisse für die Kontrollgefäße wurde angenommen, dass die in Tabelle 5.5.5 angegebenen Emissionskoeffizienten (Korrekturfaktor $1,16769E^{-05}$) wahrscheinlicher sind als die in Tabelle 5.5.4 dargestellten Emissionskoeffizienten (Korrekturfaktor $6,38446E^{-06}$). Beim Vergleich der in Tabelle 5.5.5 für die Behandlung mit Luftkissen angegebenen Werte mit denen, die in Tabelle 4.5.2 angegeben wurden, ließ sich eine sehr enge Analogie im Lachgasemissionsverhalten von Sonnenblumenpflanzen zwischen den beiden getrennt durchgeführten Versuchen erkennen.

Die Ergebnisse dieses Versuches – **Pflanzen ermöglichen die Ausgasung von im Wurzelraum befindlichen Lachgas in die den Spross umgebende Atmosphäre**- sind in ihren wesentlichen Aussage, den von RUSCH & RENNENBERG (1998) gewonnen Ergebnissen bis auf einen wichtigen Unterschied gleich. Während

RUSCH & RENNENBERG (1998) die Lachgasemissionen aus Schwarz-Erle auf deren Aerenchyme zurückgeführt haben, zeigten die Ergebnisse des hier vorliegenden Versuchs, dass bei einer Pflanzenart, die unter normalen Bedingungen kein Aerenchym bildet, ein transpirationsvermittelter Transport von wassergelöstem Lachgas zu finden ist.

Da die Emissionskoeffizienten für die Versuchsanordnung mit Luftkissen im Wurzelraum deutlich höher lagen als diejenigen der Versuchsanordnung ohne Luftkissen im Wurzelraum und die Lachgaskonzentration im Luftpolster deutlich niedriger war als die errechnete Lachgaskonzentration in der Nährlösung, wurde geschlossen, dass Sonnenblumenpflanzen gasförmig im Wurzelraum vorkommendes Lachgas schneller aufnehmen und über den Spross wieder abgeben können als im Wurzelraum in Wasser gelöstes Lachgas.

Die Gründe für die Lachgasverluste während des betrachteten Versuchszeitraums könnten folgende sein:

- N₂O-Abbau durch Mikroorganismen.
- N₂O-Aufnahme und Metabolisierung durch die Versuchspflanzen analog zu den Untersuchungen von LENSIS & CHALAMET (1981) und GRUNDMANN et al. (1993).
- N₂O-Diffusion durch die verwendeten Kunststoffe.

Wegen der in den Tabellen 5.5.4 und 5.5.5 dargestellten Emissionskoeffizienten, die sehr deutlich unter eins liegen, erschien die Metabolisierung eines Teils des aufgenommenen Lachgases durch die Sonnenblumenpflanzen als sehr wahrscheinlich. Aus den Emissionskoeffizienten ließ sich zusätzlich erkennen, dass die Metabolisierung von Lachgas in der Nacht intensiver stattfindet als am Tag. Diese Schlussfolgerung müsste jedoch mit ¹⁵N Isotopenversuchen überprüft werden.

Kapitel 6.

EXPERIMENTE MIT GERSTE

6.1 Zusammenfassung

CHANG et al. (1997, 1998) haben für Gerste (*Hordeum vulgare* L. cv. Galt) nachgewiesen, dass Lachgas über den Transpirationsstrom aus dem Wurzelraum in die den Spross umgebende Atmosphäre transportiert wird. Da in den Versuchen von CHANG et al. (1997, 1998) die Lachgasemissionskurven den Verlauf einer Sättigungskurve zeigten, erschienen die daraus gezogenen Schlüsse zum Teil nicht konsistent. Zusätzlich bietet der von CHANG et al. (1997, 1998) gewählte Versuchsaufbau mit geschlossenen Kammern geringe Möglichkeiten, auf den zugrundeliegenden Transportmechanismus schließen zu können. Deshalb wurde der N₂O-Transport durch den Transpirationsstrom in Gerste (cv. Scarlet) untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Pflanzen in einem kontrolliert offenen System angezogen. Die Kultur erfolgte auf Nährlösung, um bodenbedingte Einflüsse auszuschließen. Es wurden zwei Versuchsvarianten (mit und ohne Luftposter im Wurzelraum), deren Wuchsmedium mit N₂O angereichert wurde, und eine Kontrollvariante ohne N₂O-Anreicherung in jeweils dreifacher Wiederholung angelegt. Die Sprosskompartimente wurden mit einer konstanten Menge Außenluft versorgt, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit CO₂ zu gewährleisten und um überschüssige Luftfeuchtigkeit zu entfernen. Veränderungen der N₂O-Konzentrationen zwischen Ein- und Ausgang der Sprosskompartimente wurden kontinuierlich gemessen. Bei eingeschaltetem Licht (Tag) wurde eine sehr enge Beziehung zwischen dem in der Nährlösung gelösten N₂O und der durch die Gerstenpflanzen abgegebenen N₂O-Menge gefunden. Bei ausgeschalteter Beleuchtung (Nacht) waren die N₂O-Emissionen durch die Pflanzen deutlich geringer als am Tage. Aus diesen Ergebnissen wurde geschlossen, dass Gerste in Wasser gelöstes N₂O über die Wurzel aufnimmt, mit dem Transpirationsstrom in die Blätter transportiert und nach und nach am Tag über die geöffneten Stomata abgibt. Weiterhin konnte aus den Versuchsergebnissen geschlossen werden, dass Gerste im Gegensatz zu Sonnenblume (vgl. Kap 4 u. 5) wassergelöstes N₂O über die Wurzel besser

aufnehmen und /oder transportieren kann als N_2O das gasförmig im Wurzelraum vorliegt.

6.2 Einleitung

CHANG et al. (1997, 1998) haben als erste Ergebnisse von Experimenten zur Identifikation des Lachgastransportes durch Pflanzen vorgestellt. Für die beiden innerhalb der Versuche verwendeten Pflanzenarten – Raps (*Brassica napus* L. cv. Westar) und Gerste (*Hordeum vulgare* L. cv. Galt) – wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt. Die Autoren schlossen aus ihren Ergebnissen, dass Lachgas über den Transpirationsstrom aus dem Wurzelraum in die den Spross umgebende Atmosphäre transportiert wird. Allerdings sind die von CHANG et al. (1997, 1998) vorgestellten Ergebnisse nicht konsistent. Bei ambienten N_2O -Konzentration über dem Boden der verwendeten Versuchsanordnung wird keine Lachgasabgabe gemessen. Dieses Ergebnis erscheint vor allem vor dem Hintergrund, dass die Emissionen in Form von Akkumulation in einer Haube gemessen wurden, sehr fragwürdig.

Lachgasemissionen wurden nur bei im Vergleich zur normalen Umgebung erhöhten Lachgaskonzentrationen gemessen. Da die Versuche mit einem geschlossenen Kammersystem für die Sprosse durchgeführt wurden, wäre mit einem linear zur Transpirationsrate verlaufenden Konzentrationsanstieg für Lachgas innerhalb der Hauben zu rechnen gewesen. Da die durch CHANG et al. (1997, 1998) gemessenen Anreicherungen einen für Sättigungskurven ähnlichen Verlauf zeigen, bestehen Zweifel daran, ob die gefundene Lachgasabgabe durch Gerste wirklich auf dem Transpirationsstrom beruht. Denkbare Ursache wäre auch ein undichter Versuchsaufbau. Auf Grund der beschriebenen Zweifel wurden Versuche durchgeführt, um das Verhalten von Gerste im Bezug auf Lachgasemissionen zu überprüfen.

6.3 Material und Methoden

Die Aussaat der für diesen Versuch verwendeten Gerstenpflanzen (*Hordeum vulgare* cv. Scarlet) erfolgte in Quarzsand. Es wurde eine tiefe Ablage des Saatgutes vorgenommen, um einen möglichst langen Halmheber zu bekommen. Das Saatgut wurde bei 25 °C zur Keimung gebracht. 42 Tage nach der Aussaat wurden die Pflanzen in ein kontrolliert offenes System umgepflanzt (Abb. 3.1.1) und auf eine vollständige Nährlösung gesetzt (Tab. 2.5.1). Der Versuch, dessen Ergebnisse unten dargestellt sind, begann 104 Tage nach der Aussaat. Die Pflanzen befanden sich im Entwicklungsstadium „Ährenschieben“.

Die Vorkultur und der Versuch fanden bei einem Tag - / Nachtrhythmus von 16h / 8h statt. In jedem Kulturgefäß waren zu Beginn fünf Pflanzen untergebracht. Zum Versuchszeitpunkt jedoch, war die Anzahl der Sprosse aufgrund vieler Abgänge und unterschiedlich guter Bestockung in den einzelnen Gefäßen unterschiedlich (Abb. 6.3.1 u. 6.3.2).



Abb. 6.3.1: Überblick des Versuchsaufbaus. Auf der linken Seite ist im Vordergrund das für die Lachgasanreicherung verwendete Ausgleichsgefäß zu sehen (Versuchspflanze Gerste).

Beim Umpflanzen nach der Keimung wurden die Pflanzen in den Bohrungen der Mittelplatte durch ein Gemisch aus Optosil R (Fa. *Heraeus*) und Prestik (Fa. *Bostik*) fixiert. In der Regel wurde versucht, den Übergang vom Wurzelkompartiment zum Sprosskompartiment mit dem Halmheber zu überbrücken. Wegen des fehlenden sekundären Dickenwachstums bei monokotylen Pflanzen und wegen der bei Getreidearten stattfindenden Bestockung war es nötig die Pflanzen regelmäßig abzudichten. Dafür war das zur Fixierung verwendete Gemisch wegen zu hoher Viskosität ungeeignet. Für die Abdichtung wurde deshalb Paraffinwachs (Fa. *Fluka*) verwendet.



Abb. 6.3.2: Auswahl einiger zu unterschiedlichen Behandlungen gehöriger Versuchsgefäße. Die unterschiedliche Belegungsdichte, Bestockung und der unterschiedliche Vitalitätszustand sind deutlich zu sehen (Versuchspflanze Gerste).

Während der Bestockung und bei beginnendem Schossen wurden die Gefäße häufig schon binnen 24 Stunden nach erfolgter Abdichtung wieder undicht, da das Paraffin durch die stattfindenden Wachstumsprozesse aufgesprengt wurde.

Die letzte Abdichtungsmaßnahme vor der Versuchsdurchführung wurde mit Unterdruck durchgeführt. So konnte auch in feinste Ritzen Wachs zur Abdichtung eingebracht werden. Weiterhin konnten durch den im Vegetationsverlauf der Gerste sehr spät angesiedelten Versuchszeitraum die Einflüsse des Wachstums minimiert werden, da die Bestockung und das Wachstum der Halme in den unteren Bereichen abgeschlossen waren. Wegen der häufigen und langwierigen Abdichtungstätigkeiten, die auch im Wurzelbereich vorgenommen werden mussten (Abb. 6.3.3), kam es in vielen Gefäßen zu Pflanzenverlusten und / oder zu Vitalitätseinbußen bei einzelnen Pflanzen.

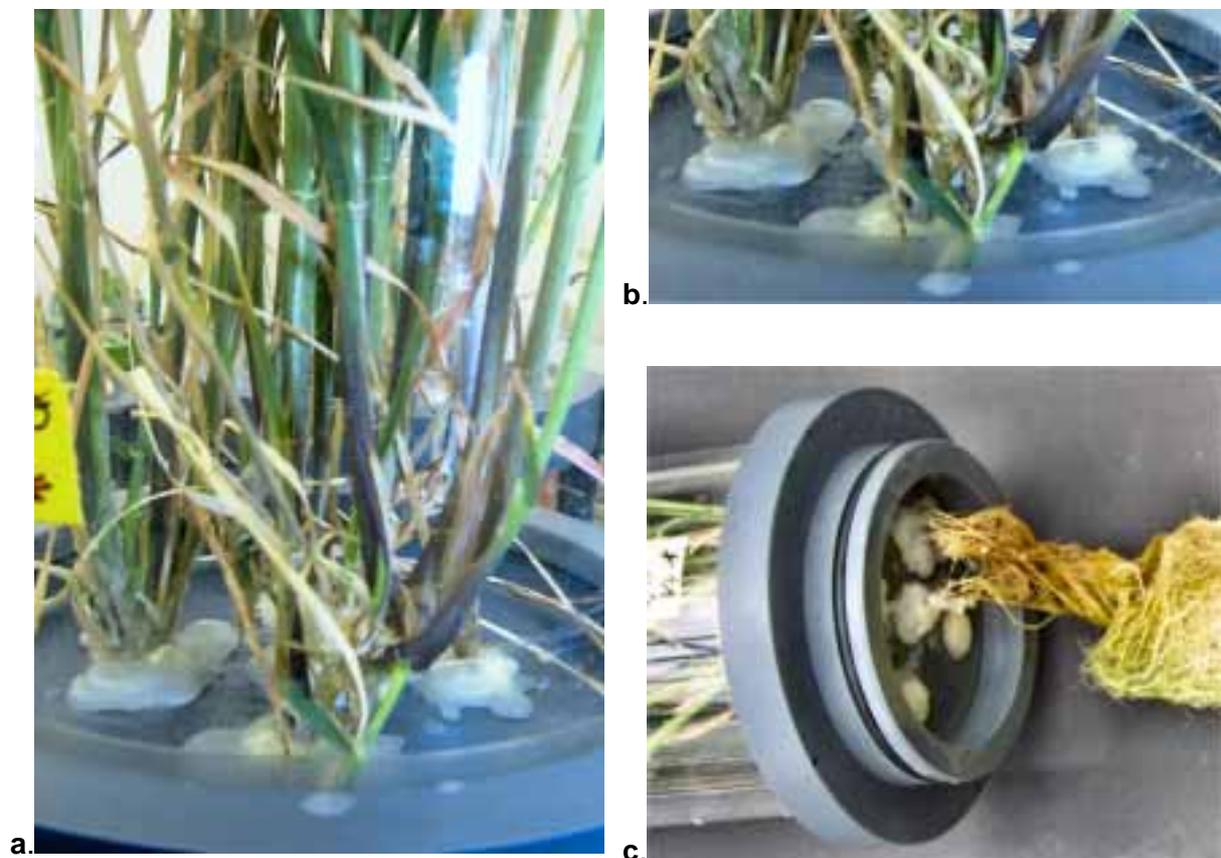


Abb. 6.3.3: Abdichtung der Gerstenpflanzen im Spross- (a. u. b.) und im Wurzelraum (Versuchspflanze Gerste).

Da die lange Versuchsdauer für die Pflanzen eine enorme Stresssituation darstellte und die Effekte der Abdichtung mit heißem Paraffinwachs in diesem Zusammenhang nicht vorhersagbar waren, wurden die Wurzelsysteme aller

Versuchsgefäße am Ende der Versuchsperiode visuell auf Schädigungen (Wurzelfarbe, Zustand der Wurzelspitzen etc.) infolge von Verbrennungen oder eventuellem Sauerstoffmangel untersucht. Dabei wurden keine Schäden festgestellt (Abb. 6.3.4.).



Abb. 6.3.4: Entwicklung und Zustand der Wurzeln am Ende des Versuchszeitraums (Versuchspflanze Gerste).

Es wurden zwei unterschiedliche Behandlungen und eine Kontrolle etabliert. Bei der Behandlung „ohne Luftkissen“ wurde der Wurzelraum kontinuierlich mit lachgasangereicherter Nährlösung in einem Kreislaufsystem gespült (analog zum in Kapitel 4 dargestellten Versuch mit Sonnenblume). So konnte sichergestellt werden, dass es bei dieser Behandlung keine luftgefüllten Wurzelbereiche gab. Die Wurzelkompartimente der zweiten Behandlung – „mit Luftkissen“ – wurden mit lachgasangereicherter Luft ebenfalls in einem Kreislaufsystem versorgt (vgl. Kapitel

5.3). Dabei wurde in den Gefäßen dieser Variante ein anfängliches Luftkissen von 150 ml eingestellt. Während des Versuchsverlaufes vergrößerte sich das Luftkissen wegen des pflanzlichen Wasserverbrauchs kontinuierlich.

Die Versorgungskreisläufe beider Behandlungen wurden unter Verwendung eines gemeinsamen Ausgleichsgefäßes betrieben (Abb. 6.3.1). In diesem Ausgleichsgefäß wurde sowohl die Lachgasanreicherung vorgenommen, als auch die Messung der durch die Anreicherung im Luftpolster erzielten Lachgaskonzentration durchgeführt.

Die Kontrollbehandlung wurde im Wurzelraum kontinuierlich mit Außenluft versorgt.

Die Sprosskompartimente aller Versuchsgefäße wurden mit einem kontinuierlichen auf die jeweiligen Erfordernisse eingestellten Strom von Außenluft versorgt. Die beiden Behandlungen und die Kontrolle wurden jeweils in dreifacher Wiederholung angelegt. Daraus ergab sich eine Gesamtzahl von neun Kulturgefäßen. Die jeweiligen Wiederholungen wurden im Hinblick auf eine spätere statistische Einzelauswertung vor Versuchsbeginn zufällig einander zugeordnet.

Zu Beginn des Versuches wurde die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes auf 7494 ppm ($13,49 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) angereichert. Dies geschah durch Zugabe von 512 ml \pm 1% Lachgas (bei 25°C) in das Ausgleichsgefäß. Dieses Gasvolumen entspricht einer Masse von 0,9216 g N_2O .

Die Versorgungsintensität der Wurzelkompartimente lag bei insgesamt ca. $2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ für die jeweiligen Gefäße der Varianten und der Kontrolle. Eine gleichmäßige Verteilung der Umwälzungskapazität wurde mit Schlauchklemmen eingestellt. Die Belüftungsintensität der Hauben wurde individuell auf den Sprossbesatz der jeweiligen Gefäße mit Durchflussmessern (Fa. *Fischer & Porter*) angepasst. Sie lag zu Beginn des Versuches zwischen $3,8 \text{ l}\cdot\text{mi}^{-1}$ und $6,9 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Die in den Sprosskompartimenten eingestellten Belüftungsströme wurden so eingestellt, dass den Versuchspflanzen ausreichend CO_2 zugeführt und überschüssige Luftfeuchtigkeit abgeführt wurde.

Die Konzentrationen der Gase N_2O , CO_2 und H_2O wurden während eines Zeitraums von 88 Stunden an den Ausgängen der Sprosskompartimente mit Hilfe eines automatischen Probenahme- und Gasmesssystems bestimmt. Das

Messsystem bestand aus einem Messstellenumschalter und einem photoakustischen Messgerät (Fa. *Innova AirTech Instruments*; vgl. Kap. 3 u. Abb. 3.1.1). Vor und nach der Messung der Konzentrationen innerhalb eines Sprosskompartiments wurden die Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Außenluft gemessen, um eventuelle Konzentrationsunterschiede mit größtmöglicher Sicherheit erfassen zu können. Die Konzentrationen von N_2O , CO_2 und H_2O im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes wurden in regelmäßigen Abständen, jedoch diskontinuierlich, ebenfalls beprobt. Der Konzentrationsverlauf der Anreicherung ist der Abbildung 6.4.3 zu entnehmen.

6.4 Ergebnisse

Die Transpirationsraten aller in diesem Versuch verwendeten Gefäße sind in der Abbildung 6.4.1 dargestellt. Die unterschiedliche Anzahl der Sprosse pro Versuchsgefäß war in den extrem unterschiedlichen Transpirationsraten eindeutig wieder zu finden. Zu erkennen war auch, dass die zweite Wiederholung der Behandlung „mit Luftkissen“ über eine äußerst geringe Vitalität verfügte, da trotz spezifisch angepasster Belüftung nur eine sehr geringe Transpiration zu messen war.

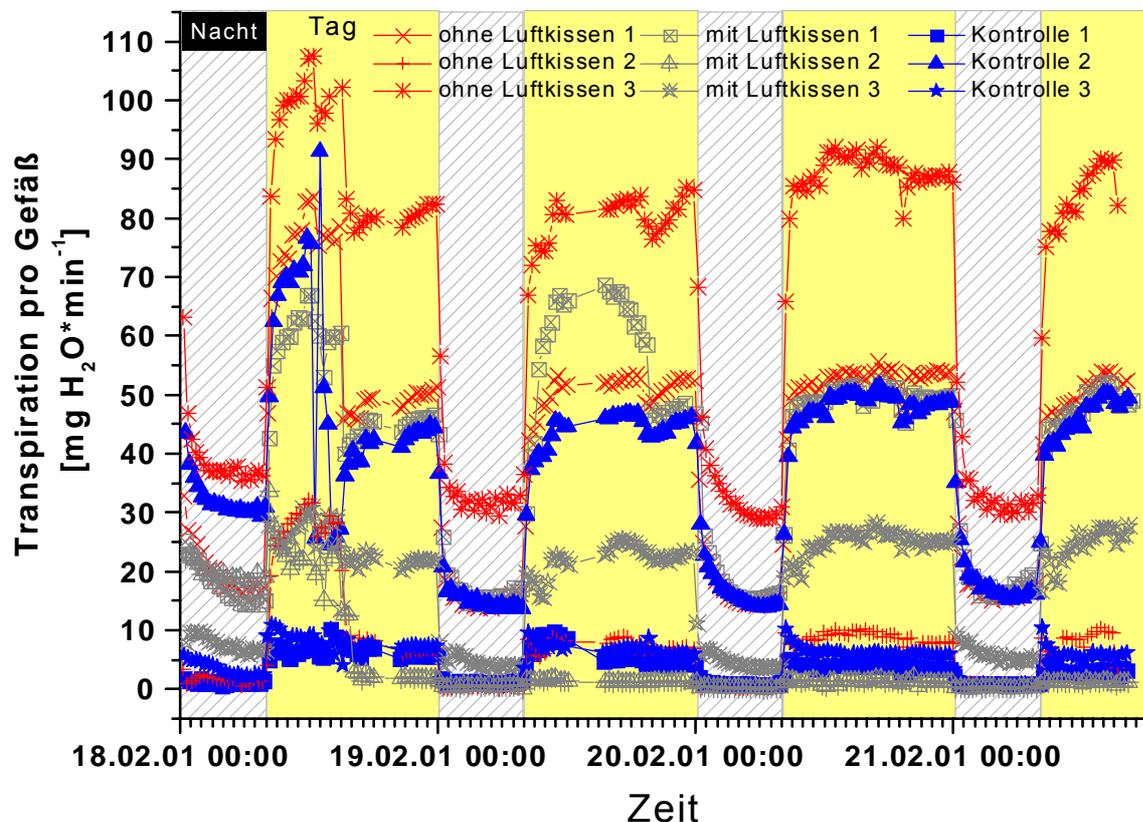


Abb. 6.4.1: Absolute Transpirationsrate aller Versuchsgefäße (Versuchspflanze Gerste).

Die erste Nachtperiode zeigt die Transpirationsraten vor der Lachgasanreicherung und bei einer anderen Belüftungsintensität. Der starke Transpirationsabfall innerhalb der ersten Tagperiode war auf die Veränderung der Belüftungsintensitäten zurückzuführen. Zugleich markiert dieser Zeitpunkt auch den Beginn der Lachgasanreicherung. Die Veränderung der Transpiration war allerdings ausschließlich auf die veränderte Belüftungsintensität zurückzuführen. Der erwartete

Tag- / Nachtrhythmus war bei allen Gefäßen deutlich ausgeprägt. Die Transpiration unter Lichteinwirkung und in Dunkelheit entsprach bis auf Ausnahmen sowohl vor als auch nach der Lachgasanreicherung dem erwarteten Verhältnis von etwa 2 zu 1 (Tab. 6.4.1).

Tab. 6.4.1: Durchschnittliche Transpirationsraten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste).

	Ohne Luftkissen 1 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	Ohne Luftkissen 2 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	Ohne Luftkissen 3 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	Mit Luftkissen 1 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	Mit Luftkissen 2 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	Mit Luftkissen 3 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	k1 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	k2 [mgH ₂ O * min ⁻¹]	k3 [mgH ₂ O * min ⁻¹]
Nacht1 ohne N ₂ O	20,141	1,703	39,211	17,710	19,556	7,564	1,118	32,292	3,467
Tag1 ohne N ₂ O	73,193	26,186	96,351	58,387	23,223	26,426	6,698	56,840	8,535
Tag1 Beginn Anreicherung	47,610	8,487	80,295	43,716	3,758	22,046	6,555	40,322	7,307
Tag1	49,668	6,797	80,785	45,283	1,825	20,171	5,548	42,728	7,277
Nacht 2	15,730	0,664	35,724	16,640	0,473	4,387	1,141	15,178	0,962
Tag 2	49,950	7,221	78,381	55,921	1,365	21,731	5,717	43,678	6,817
Nacht 3	17,370	0,361	34,390	18,794	0,240	4,581	0,912	16,723	0,690
Tag 3	51,805	8,482	85,959	48,753	1,284	24,811	3,739	47,594	6,157
Nacht 4	18,773	1,052	35,903	19,804	0,294	6,465	0,863	18,640	0,767
Tag 4	49,793	8,183	82,451	47,997	1,200	24,577	3,038	46,206	6,166

Die Versuchsgefäße, die zwischen der Tages- und Nachttranspirationsrate während des Versuchs nur geringe Unterschiede zeigten, wurden als undicht definiert („mit Luftkissen 2“). Die so identifizierten Wiederholungen wurden von der Interpretation der Ergebnisse ausgeschlossen.

Die Abbildung 6.4.2 bildet die absolute Lachgasabgabe aller bis zu dieser Auswertung hinsichtlich ihres diurnalen Transpirationsverhaltens als verwertbar angesehenen Gefäße ab. Aufgrund des Kurvenverlaufes der Wiederholung „mit Luftkissen 3“, die keinen diurnalen Rhythmus in der Lachgasabgabe zeigt, wurde geschlossen, dass auch dieses Versuchsgefäß undicht war. Die Emissionen der

übrigen Gefäße zeigten ein ähnlich uneinheitliches Bild wie die Transpirationsraten (Abb. 6.4.1). Diese Unterschiede waren teilweise darauf zurückzuführen, dass die Emissionen noch nicht auf eine gemeinsame Basis, die einen direkten Vergleich zuließ, bezogen waren. Lediglich in der ersten Nachtperiode (vor der Anreicherung mit Lachgas) lagen die N_2O -Emissionen aller Gefäße trotz unterschiedlicher Transpirationsraten sehr dicht zusammen. Das wurde wegen der relativ geringen ambienten Lachgaskonzentration so erwartet. Auch in der darauf folgenden ersten Tagperiode waren die Lachgasemissionen vor der Anreicherung erwartungsgemäß noch recht gering. Für die Kontrollgefäße ist ersichtlich, dass das Emissionsniveau während des gesamten Versuches sowohl tags als auch nachts auf den vor der Anreicherung gemessenen Niveaus blieb, während die Behandlungen im Vergleich zum nicht angereicherten Zustand deutlich höhere Emission zeigten.

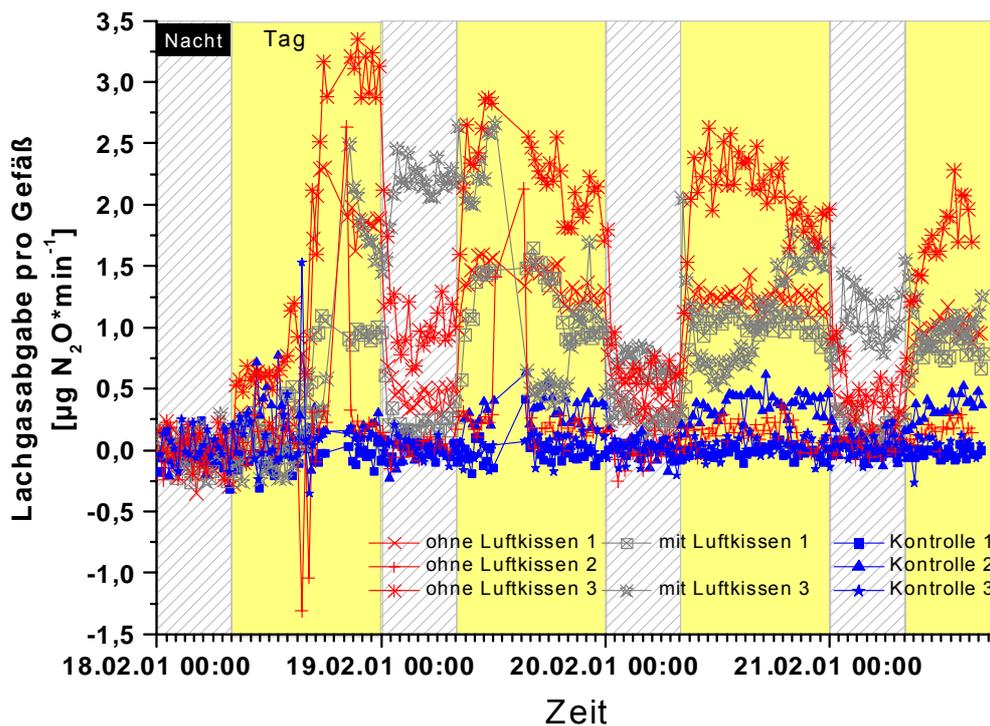


Abb. 6.4.2: Absolute Lachgasabgabe aller auf Grund der diurnalen Transpiration als verwertbar erachteten Versuchsvarianten und der Kontrollen (Versuchspflanze Gerste).

Anhand der arithmetischen Mittelwerte (Tab. 6.4.2) der Lachgasemissionen für die jeweils betrachteten Bezugszeiträume sind die durch die Lachgasanreicherung

hervorgerufenen Veränderungen besser erkennbar als in der grafischen Darstellung (Abb. 6.4.2). Für die Nachtperiode vor der Lachgasanreicherung ließ sich für einige Versuchsgefäße eine geringe mittlere Lachgasaufnahme erkennen, während nach der Anreicherung nur noch ein Kontrollgefäß Lachgasabreicherungen aus der Umgebung zeigte

Tab. 6.4.2: Durchschnittliche absolute Lachgasabgaben pro Gefäß auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste).

	Ohne Luftkissen 1 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	Ohne Luftkissen 2 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	Ohne Luftkissen 3 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	Mit Luftkissen 1 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	Mit Luftkissen 2 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	Mit Luftkissen 3 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	k1 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	k2 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]	k3 [$\mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$]
Nacht1 ohne N ₂ O	-0,092	-0,004	0,035	-0,028	0,034	0,029	-0,037	-0,012	0,038
Tag1 ohne N ₂ O	0,194	0,087	0,653	0,189	-0,014	-0,025	-0,070	0,253	0,070
Tag1 Beginn Anreicherung	1,505	-0,046	2,149	0,773	82,765	0,338	0,023	0,105	0,234
Tag1	1,850	0,413	3,076	0,942	41,521	1,838	-0,043	0,172	0,094
Nacht 2	0,479	0,033	1,174	0,230	29,956	2,165	0,018	-0,043	0,018
Tag 2	1,346	0,219	2,206	1,175	7,373	1,277	-0,010	0,314	0,026
Nacht 3	0,339	-0,006	0,674	0,299	0,036	0,640	0,010	0,013	-0,006
Tag 3	1,197	0,130	2,061	1,006	0,032	1,147	-0,008	0,363	0,029
Nacht 4	0,246	0,034	0,559	0,221	0,293	1,073	0,006	0,056	0,011
Tag 4	0,955	0,152	1,666	0,812	0,079	1,032	-0,023	0,346	0,044

Wegen der insgesamt geringen Transpirationsraten der Gefäße „ohne Luftkissen 2“, „mit Luftkissen 2“, „mit Luftkissen 3“, „k1“ und „k3“ (Tab. 6.4.1) wurden die mit diesen Versuchsgliedern gewonnenen Messergebnisse im weiteren Auswertungsverlauf kritisch betrachtet und schließlich ebenfalls von der Interpretation des Versuches ausgeschlossen, da die Vitalität der darin befindlichen Versuchspflanzen fraglich erschien.

Zusätzlich ließen sich bei diesen Gefäßen wegen der ermittelten Lachgasabgabe (Tab 6.4.2 u. 6.4.3) entweder Undichtigkeiten zwischen Wurzel- und

Sprosskompartiment („ohne Luftkissen 2“, „mit Luftkissen 2“, „mit Luftkissen 3“, „k1“ und „k3“) und / oder unzureichende Umwälzung des angereicherten Nährmediums („ohne Luftkissen 2“) und / oder das allmähliche Absterben der jeweiligen Versuchspflanzen erkennen („mit Luftkissen 2“ und „k1“).

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der beschriebenen Überlegungen sind die jeweils einander zugewiesenen Wiederholungen der einzelnen Versuchsglieder in der Abbildung 6.4.3 a. bis c. gruppenweise dargestellt.

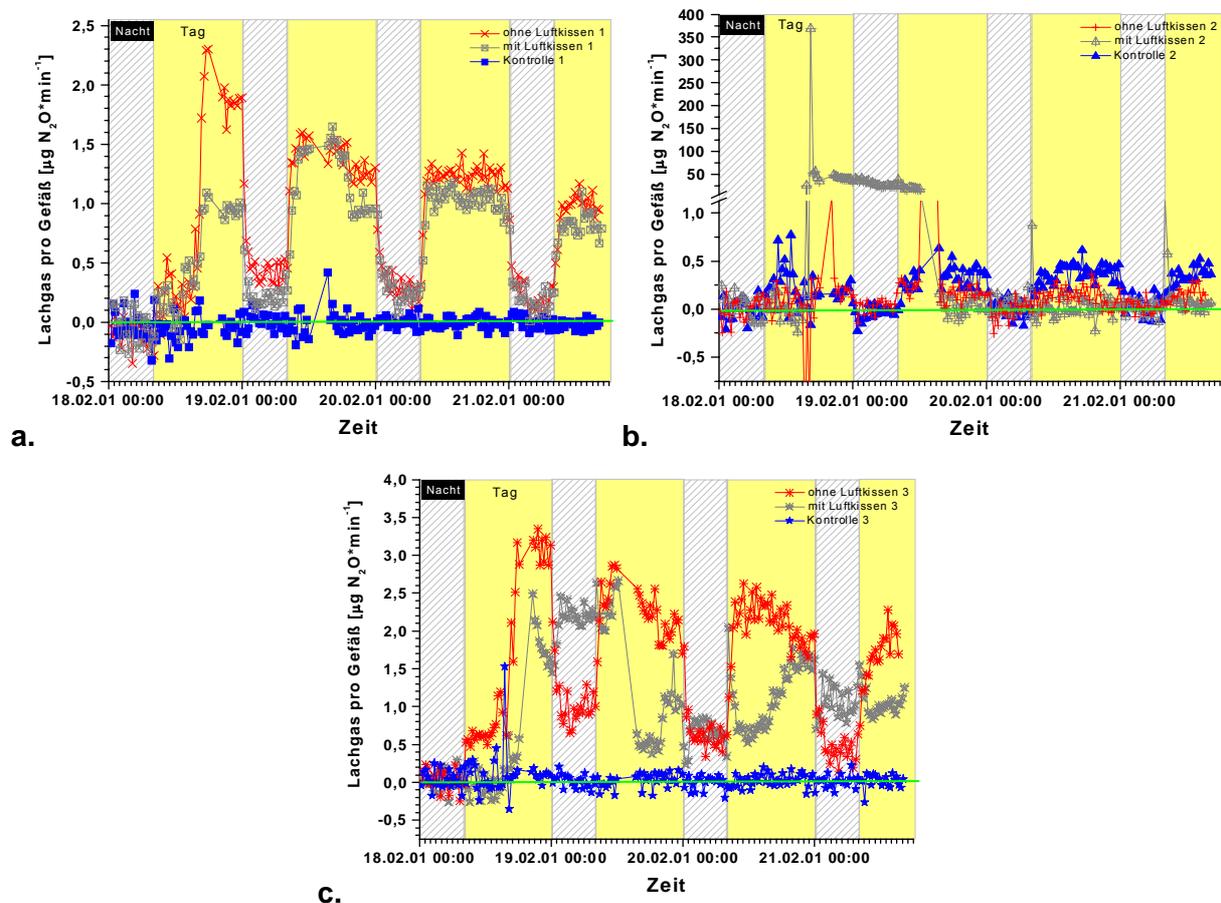


Abb. 6.4.3: Darstellung der jeweils einander zugeordneten Wiederholungen zur besseren Identifikation der gasdichten Versuchsgefäße (Versuchspflanze Gerste).

Die zuverlässigen, bzw. aussagekräftigen Gefäße lassen sich in dieser Darstellung gut identifizieren. Es sind folgende Versuchsgefäße: „ohne Luftkissen 1“, „ohne Luftkissen 3“, „mit Luftkissen 1“ und „k2“.

Zusammenfassend stellt die Abbildung 6.4.4 die absoluten Lachgasemissionen pro Versuchsgefäß für die als zuverlässig empfundenen Gefäße dar. Zusätzlich ist

noch der Verlauf der Lachgaskonzentration im Luftpolster des für die Versorgungskreisläufe verwendeten Ausgleichsgefäßes eingezeichnet. Der starke Konzentrationsabfall in der zweiten Tagperiode war bedingt durch eine längere Beprobung des Luftpolsters. Das dadurch entfernte Luftvolumen musste mit ambianter Luft kompensiert werden. Dadurch wurde ein schlagartiger Konzentrationsabfall im Gesamtsystem von $792 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$ hervorgerufen.

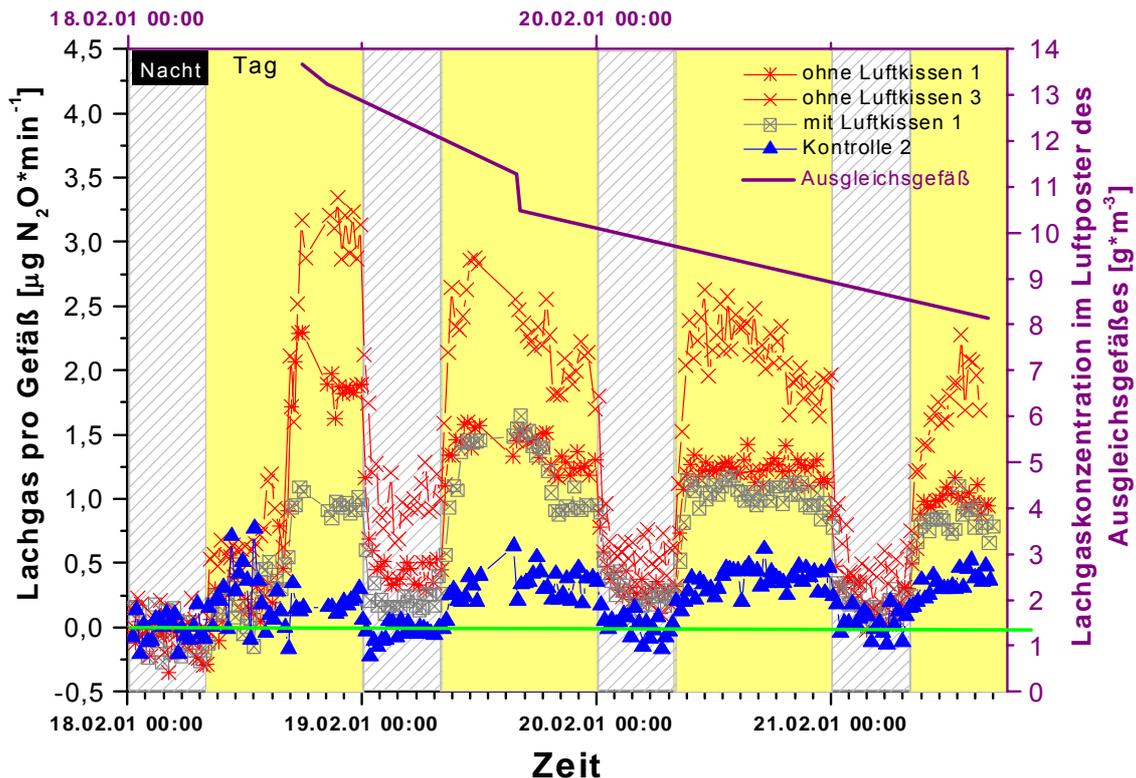


Abb. 6.4.4: Absolute Lachgasabgabe der auf Grund der Auswertungen als dicht identifizierten Gefäße. Auf der rechten Skala ist der N_2O -Konzentrationsverlauf im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes abzulesen (Versuchspflanze Gerste).

Die obige Darstellung (Abb. 6.4.4) zeigt deutlich die nach der Anreicherung aufgetretenen Unterschiede in der Lachgasemission zwischen der Kontrolle und den angereicherten Varianten. Die Emissionsunterschiede waren bei eingeschaltetem Licht deutlich größer als in Dunkelheit. Dieses Ergebnis in Kombination mit dem diurnalen Rhythmus der Lachgasemissionen, der auch beim Kontrollgefäß zu finden war, zeigt deutlich, dass die Lachgasabgabe unter solchen Versuchsbedingungen transpirationsgetrieben ist. Dieses Ergebnis wird zusätzlich dadurch gestützt, dass

die Emissionsraten relativ mit der abnehmenden Lachgaskonzentration im Nährmedium zurückgingen, sich jedoch innerhalb der angereicherten Varianten nicht auf gleichem Niveau befanden.

Anhand dieser Darstellung lässt sich allerdings keine Aussage darüber machen, ob luftgefüllter Wurzelraum einen Einfluss auf die Lachgasemission hat.

Um den eventuellen Einfluss luftgefüllten Wurzelraumes herausarbeiten zu können, wurden die Emissionsraten standardisiert, indem sie auf die jeweiligen Transpirationsraten bezogen wurden. Diese Umrechnung eliminierte den Einfluss unterschiedlicher Sprossdichten in den Gefäßen und ermöglichte den direkten Vergleich der Ergebnisse.

Tab. 6.4.3: Durchschnittliche relative Lachgasabgabe pro g transpirierten Wassers auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste).

	Ohne Luftkis- sen 1 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	Ohne Luftkissen 2 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	Ohne Luftkis- sen 3 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	Mit Luftkis- sen 1 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	Mit Luftkissen 2 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	Mit Luftkissen 3 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	k1 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	k2 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]	k3 [$\mu\text{gN}_2\text{O}$ * g^{-1} H_2O]
Nacht1 ohne N2O	-4,55	-2,61	0,88	-1,57	1,72	3,82	-33,07	-0,37	10,88
Tag1 ohne N2O	2,65	3,30	6,77	3,23	-0,58	-0,94	-10,52	4,46	8,25
Tag1 Beginn Anreiche- rung	31,61	-5,40	26,77	17,68	22021,03	15,33	3,47	2,60	32,06
Tag1	37,25	60,79	38,07	20,81	22755,44	91,13	-7,72	4,03	12,97
Nacht 2	30,46	50,27	32,87	13,82	63386,23	493,46	16,04	-2,83	18,23
Tag 2	26,94	30,36	28,15	21,01	5400,91	58,74	-1,71	7,19	3,86
Nacht 3	19,51	-17,02	19,61	15,90	149,55	139,70	11,25	0,77	-9,28
Tag 3	23,11	15,35	23,97	20,64	24,69	46,24	-2,16	7,62	4,67
Nacht 4	13,12	31,98	15,58	11,14	996,84	166,03	6,92	3,00	14,62
Tag 4	19,17	18,63	20,21	16,91	65,68	41,98	-7,50	7,48	7,17

Während die Tabelle 6.4.3 die arithmetischen Mittelwerte der pro transpirierter Menge Wasser abgegebenen, relativen Lachgasmenge der jeweils ausschlaggebenden Versuchszeiträume wiedergibt, zeigt die Abbildung 6.4.5 den zeitlichen Verlauf der standardisierten, relativen N_2O -Emissionen. Die beiden Wiederholungen ohne Luftkissen zeigten sowohl nachts als auch tags sehr ähnliche Emissionsraten bezogen auf die Transpiration. Diese waren immer höher als bei dem Gefäß, welches ein Luftpolster hatte. Der Unterschied zwischen den beiden Anreicherungsvarianten wird vor allem durch den Vergleich von „ohne Luftkissen 1“ mit „mit Luftkissen 1“ deutlich. Obwohl beide Varianten eine sehr ähnliche Transpirationsrate hatten, unterschieden sie sich in der über die Transpiration abgegebenen Lachgasmenge deutlich.

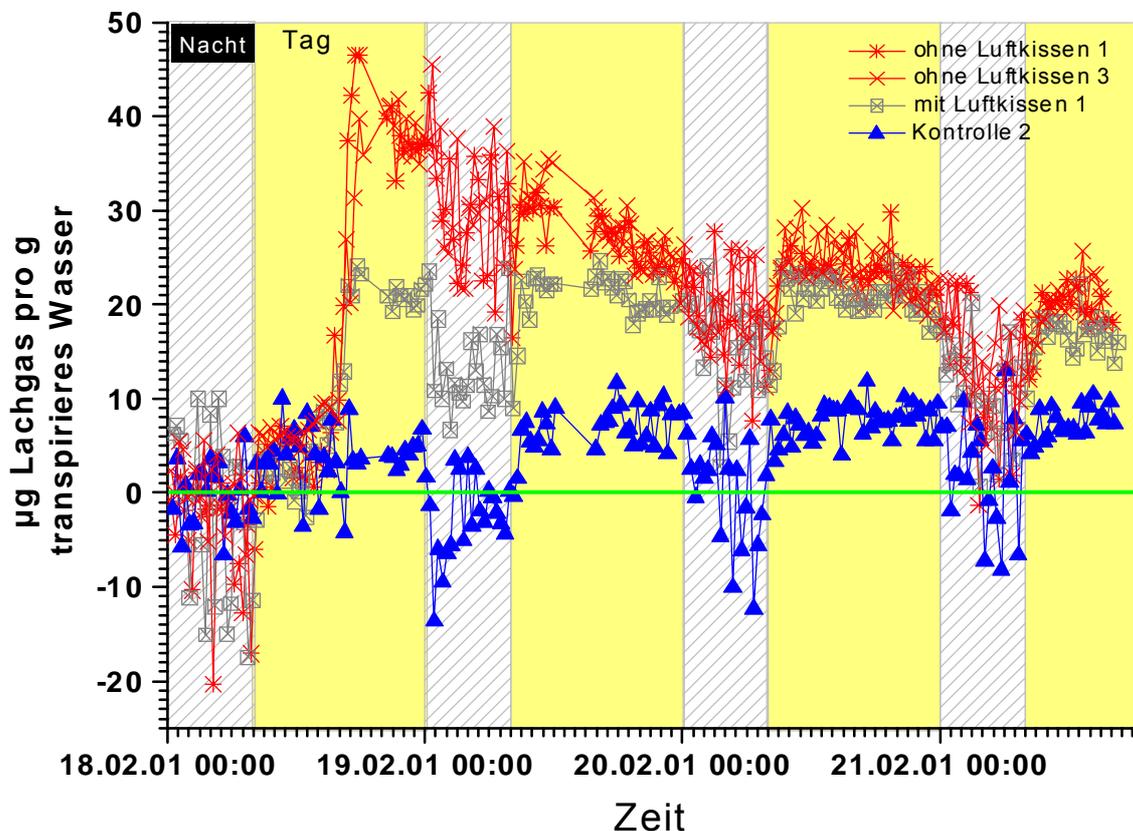


Abb. 6.4.5: Absolute emittierte Lachgasmenge bezogen auf das transpirierte Wasser (Versuchspflanze Gerste).

In Abbildung 6.4.5 ist weiterhin zu erkennen, dass sich die unterschiedlichen Varianten nicht nur in der Emissionsmenge unterschieden, sondern vor allem bei Dunkelheit unterschiedliche Emissionsmuster zeigten. Während bei dem

Kontrollgefäß in der Nacht häufig relative Lachgasaufnahme zu sehen war, kam das bei den angereicherten Versuchsgefäßen in der Regel nicht vor. Bei den Gefäßen ohne Luftpolster war bei Dunkelheit eine viel größere Schwankung der Emissionsraten zu beobachten als bei der Variante mit Luftpolster. Die nächtlichen relativen N₂O-Emissionen lagen bei einer Kultur ohne Luftpolster teilweise auf dem Niveau der Emissionen, die am Tag ermittelt wurden. Mit fortschreitender Versuchsdauer wurden die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Behandlungen immer geringer.

6.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Obwohl wegen der hohen Ausfallquote bei den Versuchsgefäßen eine statistische Auswertung nicht möglich war, war es auf Grund der deutlichen Unterschiede zwischen den intakten Gefäßen der jeweiligen Behandlungen dennoch möglich, eindeutige Ergebnisse aus dem vorliegenden Versuch abzuleiten.

Für ein besseres Verständnis der Ergebnisse und zur eindeutigen Klärung der Zusammenhänge sind in Tabelle 6.5.1 die gemessenen Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes und die damit errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Varianten und in Tabelle 6.5.2 die Emissionskoeffizienten der jeweiligen Behandlung wiedergegeben. Die Berechnung der in Tabelle 6.5.1 wiedergegebenen Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Varianten wurde, da die Konzentrationen nicht direkt gemessen werden konnten, unter folgenden idealisierten Prämissen rein mathematisch, ohne Zuhilfenahme der Gasgesetze bestimmt:

- Es lag ein gasdichtes, abgeschlossenes Kreislaufsystem vor.
- Gesamte zugegebene Lachgasmenge war 0,9216g.
- Gesamtvolumen des Versuchsaufbaus war während der gesamten Versuchsdauer 30l.
- Das Verhältnis von Luft (im Ausgleichsgefäß, den Versorgungsschläuchen und den Wurzelkompartimenten) zu Nährlösung (im Ausgleichsgefäß, den Versorgungsschläuchen und den Wurzelkompartimenten) betrug während der gesamten Versuchsdauer 7,6l zu 22,4l.

Während in der Regel in den Grafiken wegen einer besseren Darstellbarkeit keine SI Einheiten verwendet wurden, wurde versucht bei den Tabellen das Internationale Einheitensystem zu berücksichtigen. Trotz dieser Unterschiede sind die Werte in den Tabellen und Grafiken einfach ineinander zu überführen und direkt zu vergleichen; in Bezug auf in Wasser gelöste Substanzen gilt z. B.:

$$(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})\cdot 1000 = \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} = \text{mg}\cdot\text{l}^{-1} = \text{g}\cdot\text{m}^{-3}/(1000) = \text{g}\cdot\text{t}^{-1}/(1000)$$

Für die zu Versuchsbeginn in der angereicherten Luft befindliche Lachgasmenge ergab sich

$$(1) 7,6l \cdot 13,49 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot l^{-1} \text{ (gemessene Konzentration im Luftpolster)} = 102,5 \text{ mg N}_2\text{O}$$

Für die zu Versuchsbeginn in der Nährlösung gelöste gesamte Lachgasmenge ergab sich aus (1):

$$(2) 921,6 \text{ mg N}_2\text{O} \text{ (insgesamt zugegebene Menge)} - 102,5 \text{ mg N}_2\text{O} \text{ (im Luftpolster enthaltene N}_2\text{O-Menge)} = 819,1 \text{ mg N}_2\text{O}$$

Schließlich wurde die gelöste Lachgasmenge pro Liter Nährlösung aus (2) wie folgt bestimmt.

$$(3) 819,1 \text{ mg N}_2\text{O} \text{ (Restmenge)} / 22,4l \text{ (gesamtes Nährlösungsvolumen)} = 36,57 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot l^{-1} \text{ (Nährlösung)}$$

Analog zu den oben durchgeführten Rechnungen ergaben sich die in Tabelle 6.5.1 aufgeführten theoretisch in der Nährlösung enthaltenen Lachgasmengen für die jeweiligen Versuchsabschnitte.

Die mittleren Lachgaskonzentrationen für die Zeiträume, die zwischen der Beprobung des Luftpolsters des Ausgleichsgefäßes lagen, wurden unter der Annahme einer linearen Konzentrationsabnahme in der Nährlösung als ungewichtetes arithmetisches Mittel der Anfangs- und der Endkonzentration der betrachteten Versuchsabschnitte extrapoliert. **Gemessene** und die aufgrund von **Messungen erhaltenen Werte** wurden in der unten stehenden Tabelle **fett** dargestellt. Die *extrapolierten Werte* wurden *kursiv* wiedergegeben.

Tab. 6.5.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße (Versuchspflanze Gerste).

	Nacht 1 ohne N ₂ O	Tag 1 ohne N ₂ O	Tag1 Beginn Anreicherung	Tag 1	Nacht 2	Tag 2	Nacht 3	Tag 4	Nacht 4	Tag 4
Mittlere im Luftpolster gemessene N ₂ O-Konzentration [g*m ⁻³]	n. b.	n. b.	13,49	12,39	n. b.	10,5	n. b.	n. b.	n. b.	8,12
Errechnete N ₂ O-Konzentration in der Nährlösung [g*m ⁻³]	n. b.	n. b.	36,57	33,58	28,46	28,45	26,84	25,23	23,68	22,02

Anhand der in Tabelle 6.5.2 enthaltenen Werte ließ sich das unterschiedliche Verhalten der jeweiligen Behandlung besser erkennen.

Tab. 6.5.2: Emissionskoeffizienten auf Tag und Nacht aufgeschlüsselt. „Ohne Luftkissen“ bezeichnet die Gefäße, die mit Lachgas angereicherter Nährlösung versorgt wurden. „Mit Luftkissen“ bezeichnet die Versuchsvarianten, die mit angereicherter Luft versorgt wurden und bei denen ein Luftkissen im Wurzelraum etabliert war; mit „k“ sind die Kontrollgefäße gekennzeichnet (Versuchspflanze Gerste).

	Ohne Luftkissen 1	Ohne Luftkissen 2	Ohne Luftkissen 3	Mit Luftkissen 1	Mit Luftkissen 2	Mit Luftkissen 3	k1	k2	k3
Nacht1 ohne N ₂ O	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Tag1 ohne N ₂ O	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Tag1 Beginn Anreicherung	0,865	-0,148	0,732	0,478	602,232	0,419	n. b.	n. b.	n. b.
Tag1	1,109	1,810	1,134	0,620	677,553	2,714	n. b.	n. b.	n. b.
Nacht 2	1,071	1,767	1,155	0,473	2227,453	17,341	n. b.	n. b.	n. b.
Tag 2	0,947	1,067	0,989	0,726	189,856	2,065	n. b.	n. b.	n. b.
Nacht 3	0,727	-0,634	0,730	0,568	5,572	5,205	n. b.	n. b.	n. b.
Tag 3	0,916	0,608	0,950	0,813	0,978	1,832	n. b.	n. b.	n. b.
Nacht 4	0,554	1,351	0,658	0,447	42,099	7,012	n. b.	n. b.	n. b.
Tag 4	0,871	0,846	0,918	0,767	2,982	1,906	n. b.	n. b.	n. b.

Bei dem errechneten Emissionskoeffizienten handelt es sich um eine dimensionslose Zahl. Diese erhält man, indem man die durch die Transpiration abgegebene Lachgasmenge pro definierter Transpirationsmenge (Wasser) ins Verhältnis zur angenommenen Lachgaskonzentration in der Nährlösung setzt. Dabei würde ein Wert von eins unter der idealisierten Annahme, dass die Pflanze bei der Photosynthese kein Wasser verbraucht, bedeuten, dass das gesamte über die Wurzel mit dem für die Transpiration benötigten Wasser aufgenommene Lachgas über die Stomata abgegeben wird.

Da die Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung vor der Anreicherung in keinem und nach der Anreicherung in den Kontrollgefäßen nicht bestimmt wurden, wurden für die betroffenen Behandlungen und Zeiträume keine Emissionskoeffizienten berechnet (Tab. 6.5.2 „n. b.“)

Aus Tab. 6.5.2 ist der Unterschied zwischen der angereicherten Variante mit Luftkissen im Wurzelraum („mit Luftkissen 1“) und den beiden Wiederholungen ohne Luftkissen im Wurzelraum („ohne Luftkissen 1“ und „o. L. 3“) zu jedem Versuchszeitpunkt, sowohl tags als auch nachts, immer eindeutig. Nach einem Zeitraum, der für den Konzentrationsausgleich innerhalb des Anreicherungssystems vorausgesetzt wurde („Tag 1 Beginn Anreicherung“), emittierte die Behandlung mit Luftpolster bei Lichteinstrahlung etwa 75% des potentiell mit der für die Transpiration und die Photosynthese benötigten Nährlösung aufgenommenen Lachgases. In der Nacht wurde nur etwa die Hälfte der potenziell - mit dem für die Transpiration benötigten Wasser - aufgenommene Lachgasmenge emittiert. Eine Erklärung dafür könnte auch eine in der Nacht niedrigere Lachgasaufnahme durch die Wurzeln sein.

Die Emissionskoeffizienten für „Tag 1“ und „Nacht 2“ der beiden Wiederholungen ohne Luftpolster erschienen auf den ersten Blick etwas unglaublich, da sie größer als eins waren. Für diese Abweichung von dem aufgrund der idealisierten Annahmen postulierten Höchstwert von eins für den Emissionskoeffizienten gibt es mehrere mögliche Gründe:

- Die Volumina (Luft, Nährlösung, Gesamt) wurden nicht genau genug bestimmt. Bei höheren Volumina würde die errechnete

Lachgaskonzentration in der Nährlösung sinken.

- Bei eingeschaltetem Licht wird Lachgas in der Pflanze auf Grund des Wasserbedarfes für die Photosynthese aufkonzentriert und sukzessive über die Stomata mit dem Transpirationsstrom abgegeben.
- Als Reaktion auf eine Stresssituation (gasfreier Wurzelraum) bilden die Versuchspflanzen N_2O , das mit dem über die Wurzel aufgenommenen N_2O ebenfalls mit dem Transpirationsstrom über die Stomata abgegeben wird.

Ein unzureichender Konzentrationsausgleich innerhalb des Anreicherungssystems konnte nach spätestens vier Stunden bei dem vorliegenden Versuchsaufbau wegen der kontinuierlichen Umwälzung des jeweiligen Nährmediums ausgeschlossen werden.

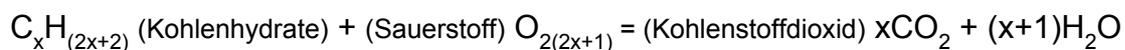
Für die Klärung des ersten Punktes hätten während der Versuchsdurchführung regelmäßig Volumenbestimmungen durchgeführt werden müssen, die selbst einen direkten, gravierenden Einfluss auf die Lachgaskonzentration im Versuchssystem gehabt hätten. Dieses Problem ließe sich mit einem Versuchsaufbau umgehen, der eine gravimetrische Bestimmung des vorhandenen Nährlösungsvolumens zulassen würde. Die beiden letzten möglichen Einflussfaktoren könnten mit Isotopenversuchen überprüft werden.

Ab dem zweiten Versuchstag lagen auch die Emissionskoeffizienten der Behandlungen ohne Luftpolster unter eins. Tagsüber wurden durchschnittlich ca. 95 % des potentiell aufgenommenen Lachgases emittiert, wobei es nachts lediglich zwischen 55 % und 73 % waren. Damit lagen die Emissionskoeffizienten dieser Behandlung immer über denen der Behandlung mit Luftpolster. Aus dieser Beobachtung heraus wurde ein gasförmiger Lachgastransport von der Wurzel in den Spross ausgeschlossen. Deshalb wurden die Lachgasemissionen ausschließlich auf den Transport des emittierten Lachgases mit dem Transpirationsstrom zurückgeführt.

Die Lachgasemissionskoeffizienten der Versuche mit Gerste lagen über denen, die bei den Versuchen mit Sonnenblume ermittelt wurden (Kap. 4 u. 5). Dies könnte entweder an einem unterschiedlichen Lachgasstoffwechsel der beiden Pflanzenarten liegen oder an unterschiedlichen Lachgasaufnahmeleistungen durch deren Wurzeln. In

Analogie zu den Ergebnissen von LEVY et al. (1999) wäre es darüber hinaus vorstellbar, dass die Unterschiede der Emissionskoeffizienten auf verschiedene pH-Werte des Xylemsaftes der beiden Pflanzenarten zurückzuführen wären. LEVY et al. (1999) haben einen Zusammenhang zwischen dem pH-Wert des Xylemsaftes von Bäumen und der im Xylem ermittelten CO₂-Konzentration gefunden. Dadurch wurde der transpirationsvermittelte Transport von CO₂ aus dem Wurzelraum in die Blätter stark beeinflusst.

Da die nächtlichen Lachgasemissionen pro transpiriertem Wasser bei allen Anreicherungsvarianten ab „Tag 2“ geringer waren als die Emissionen am Tage, wurde eine vor allem nächtlich stattfindende Assimilation durch die Pflanze für Gerste postuliert. Der aktive Ausschluss oder eine Abgabe des aufgenommenen Lachgases durch die Wurzel wurde ausgeschlossen, da die diurnalen Unterschiede dadurch nicht erklärt werden konnten. Ein zusätzlicher Einflussfaktor für die in Dunkelheit geringeren Emissionen könnte die wasserproduzierende Atmung der Pflanzen sein, die sich nach folgender Formel ergibt:



Damit kann allerdings nicht der Gesamtrückgang der nächtlichen Lachgasemissionen erklärt werden.

Die verringerten nächtlichen Lachgasemissionen könnten auch auf einen vollständigen Stomataschluss in der Nacht und eine geringe Lachgasemission mit der cuticulären Transpiration zurückzuführen sein (RÖMHELD, mündliche Mitteilung (2001)). In der Nacht wurden jedoch hohe CO₂-Emissionen durch die Pflanzen beobachtet, die zu einer Konzentrationserhöhung in den Sprosshauben von bis zu 50 mg*m⁻³ über dem ambienten Level führten. Dieses CO₂ wurde entweder stomatär oder cuticulär abgegeben. Da sich CO₂- und N₂O-Moleküle chemisch in höchstem Maße ähnlich verhalten (WIBERG E., 1976 b, c), ist anzunehmen, dass die nächtlichen N₂O-Emissionen durch die Cuticula und die verringerte Stomataöffnung in ähnlich geringem Umfang behindert werden, wie die nächtlichen CO₂-Emissionen. Berücksichtigt man zusätzlich die im Vergleich zu CO₂ sehr geringe N₂O-Emissionskonzentration, so liegt der Schluss nahe, dass die Cuticula einen nur geringen oder keinen Einfluss auf die nächtlichen N₂O-Emissionen haben kann.

Somit kann die nächtliche Verringerung der N_2O -Emissionskoeffizienten ebenfalls nicht auf eine Behinderung der N_2O -Emission durch die Cuticula zurückgeführt werden.

Bei einem Vergleich der hier erhaltenen Ergebnisse mit denen von CHANG et al. (1997, 1998), konnte Folgendes festgestellt werden:

- Eine Lachgasemission durch Gerste konnte ähnlich wie durch CHANG et al. (1997, 1998) nachgewiesen werden.
- Im Gegensatz zu CHANG et al. (1997, 1998) wurde für Gerste gezeigt, dass der Lachgastransport mit Sicherheit ausschließlich durch den Transpirationsstrom erfolgen kann.
- Ein sättigungskurvenähnlicher Verlauf der Lachgasemissionen, wie er von CHANG et al. (1997, 1998) berichtet wurde, wurde nicht gefunden. Dieser Emissionsverlauf erschien im Licht der eigenen Ergebnisse als Artefakt.

Darüber hinaus wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Der Anteil des gasgefüllten Wurzelraums im Vergleich zum Anteil des flüssigkeitsgefüllten Wurzelraums am Gesamtwurzelraum hat einen Einfluss auf die Lachgasemission durch Gerstenpflanzen.
- Gerstenpflanzen der Sorte Scarlet können Lachgas assimilieren.

Kapitel 7.

EXPERIMENTE MIT MAIS

7.1 Zusammenfassung

Mit biologisch erzeugtem (über die natürliche Denitrifikation) ^{15}N markiertem Lachgas erhielten GRUNDMANN et al. (1993) Ergebnisse, die die Vermutung nahe legen, dass im Boden gebildetes und in die Atmosphäre emittiertes Lachgas von Maispflanzen metabolisiert werden kann. Den Versuchsergebnissen konnte jedoch nicht entnommen werden, ob deshalb die transpirationsgetriebene Lachgasemission durch Maispflanzen aus dem Wurzelraum in die den Spross umgebende Atmosphäre ausgeschlossen ist. Zur Klärung dieser Frage wurden Maispflanzen in einem kontrolliert offenen System angezogen. Die Kultur erfolgte auf Nährlösung, um bodenbedingte Einflüsse auszuschließen. Es wurden zwei Versuchsvarianten (mit und ohne Luftposter im Wurzelraum), deren Wurzelmedium mit N_2O angereichert wurde, in jeweils zweifacher Wiederholung, und eine Kontrollvariante ohne N_2O -Anreicherung ohne Wiederholung, angelegt. Die Sprosskompartimente wurden mit einer konstanten Menge Außenluft versorgt, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit CO_2 zu gewährleisten und um überschüssige Luftfeuchtigkeit zu entfernen. Veränderungen der N_2O -Konzentrationen zwischen Ein- und Ausgang der Sprosskompartimente wurden kontinuierlich gemessen. Bei der Betrachtung der auf die Transpirationsrate bezogenen Lachgasemissionen konnten sowohl für die Versuchsvarianten mit Lachgasanreicherung als auch für die Kontrolle diurnale Rhythmen beobachtet werden. Die diurnalen Rhythmen äußerten sich einerseits in stärkeren Oszillationen der Lachgasemissionen bei Dunkelheit und andererseits in im Mittel geringeren Emissionen bei Dunkelheit als bei eingeschalteter Beleuchtung. Die Lachgasemissionen der Versuchsvarianten konnten weder untereinander noch von der Kontrolle signifikant unterschieden werden. Nach der Durchführung von Korrekturen für außerhalb des Kalibrationsbereiches liegende Luftfeuchtigkeit wurde im Mittel ausschließlich Lachgasaufnahme gefunden. Diese Ergebnisse führten zu dem Schluss, dass Mais im Wurzelraum befindliches in Wasser gelöstes N_2O , wenn überhaupt, nur in sehr geringem Umfang über den Spross abgibt.

7.2 Einleitung

Der Einfluss von Pflanzen auf den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre hat Auswirkungen auf die biologische Denitrifikation und beeinflusst somit die Messungen des auf die biologische Denitrifikation zurückgeführten Gaswechsels (STEFANSON, 1972; UPPAL et al., 1990).

Versuchsergebnisse von GRUNDMANN et al. (1993) lassen vermuten, dass Lachgas vom Spross von Maispflanzen aufgenommen wird. Mit biologisch erzeugtem (über die natürliche Denitrifikation) ^{15}N markiertem Lachgas erhielten GRUNDMANN et al. (1993) Ergebnisse, die die Vermutung nahe legen, dass ein Teil des aus dem Boden emittierten Lachgases von den Maispflanzen metabolisiert wurde. Aufgrund des von Grundmann et. al verwendeten Versuchsaufbaus ließen sich jedoch keine Erkenntnisse über einen eventuellen Lachgastransport vom Wurzelraum in die den Spross umgebende Atmosphäre durch Maispflanzen gewinnen.

In den nachfolgend dargestellten Versuchen wurde in einem kontrolliert offenen hydroponischen Kultursystem die Lachgasaufnahme und der Lachgastransport bei hohen Lachgasanreicherungskonzentrationen untersucht. Dabei wurde die Lachgasverfügbarkeit rein in Wasser gelöst und gasförmig simuliert.

7.3 Material und Methoden

Mais (*Zea mays* (L.) cv. Helix) wurde in Quarzsand ausgesät. Das Saatgut wurde bei 25 °C unter einer Abdeckung aus Kunststoffolie zur Keimung gebracht. 28 Tage nach der Aussaat wurden die Pflanzen in ein kontrolliert offenes System umgepflanzt (Abb. 3.1.1) und auf eine vollständige Nährlösung gesetzt (Tab. 2.5.1). Der Versuchszeitraum der unten dargestellten Ergebnisse begann 49 Tage nach der Aussaat.

Die Vorkultur und der Versuch fanden bei einem Tag - / Nachtrhythmus von 16h / 8h statt. In jedem Kulturgefäß befanden sich zu Beginn vier Pflanzen. Zum Versuchszeitpunkt war die Anzahl der Pflanzen jedoch aufgrund regelmäßiger Abdichtungsmaßnahmen teilweise geringer (Abb. 7.3.1 und 7.3.2 a.).



Abb.7.3.1: Mit Mais bepflanzte Versuchsgefäße. Die Hauben wurden für Abdichtungsarbeiten am Spross abgenommen.

Beim Umpflanzen nach der Keimung wurden die Pflanzen in den Bohrungen der Mittelplatte durch ein Gemisch aus Optosil R (Fa. Heraeus) und Prestik (Fa. Bostik) fixiert. Es wurde versucht den Vegetationskegel der Maiskeimlinge in die Mitte der Mittelplatte zu bringen, damit sich die Pflanzen bei beginnendem Schossen selbst in

den Bohrungen verankern konnten. Wegen des fehlenden sekundären Dickenwachstums bei monokotylen Pflanzen und wegen der Adventivwurzelbildung (Abb. 7.3.2 d.) war es bei den Versuchen mit Mais nötig die Pflanzen regelmäßig abzudichten.



Abb. 7.3.2: Im Sprosskompartiment mit unterschiedlichen Materialien abgedichtete Maispflanzen (a.). Wurzelsystem eines Versuchsgefäßes (b.). Durch das Wachstum der Maispflanzen in Mitleidenschaft gezogene Abdichtung (c.). Zerstörung der Abdichtung durch Adventivwurzeln bei Maispflanzen (d.).

Während des ersten Versuchszeitraums (13.09.2001 – 17.09.2001) wurden eine Behandlung (**OLK**) und eine Kontrolle etabliert. Bei der Behandlung (**OLK**) wurde der Wurzelraum kontinuierlich mit lachgasangereicherter Nährlösung in einem Kreislaufsystem gespült, damit kein Luftkissen im Wurzelraum entstand. Der Versorgungskreislauf der Behandlungen wurde unter Verwendung eines Ausgleichsgefäßes betrieben. In diesem Ausgleichsgefäß wurde sowohl die Lachgasanreicherung vorgenommen als auch die Messung der durch die Anreicherung im Luftpolster erzielten Lachgaskonzentration durchgeführt. Die erste Anreicherung wurde am 13.09.2001 zwischen 19:30 Uhr und 19:45 Uhr mit 480 ml reinem Lachgas bei 25 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Masse von 0,864g N₂O. Die erste Konzentrationsmessung im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ergab 14773 mg N₂O *m⁻³. Eine zweite Anreicherung wurde am 14.09.2001 zwischen 10:15 Uhr und 10:25 Uhr mit 240 ml reinem Lachgas bei 25 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Masse von 0,432g N₂O. Die nachfolgende Konzentrationsmessung im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ergab 13781 mg N₂O *m⁻³. Die Kontrollbehandlung wurde im Wurzelraum kontinuierlich mit Außenluft versorgt. Es wurden zwei Kontrollgefäße und acht Gefäße für die Lachgasanreicherung verwendet.

Die Ergebnisse dieses Versuchszeitraums sind in Kapitel 7.4.1 dargestellt.

Im zweiten (19.09.2001 – 20.09.2001) Versuchszeitraum wurden zwei unterschiedliche Behandlungen und eine Kontrolle etabliert. Bei der Behandlung ohne Luftkissen im Wurzelkompartiment (**OLK**) wurde der Wurzelraum kontinuierlich mit lachgasangereicherter Nährlösung in einem Kreislaufsystem gespült. Die zweite Variante hatte ein Luftkissen im Wurzelraum (**MLK**). Das Luftkissen im Wurzelkompartiment hatte zu Beginn des Versuchs ein Volumen von 250 ml, wobei es sich wegen des pflanzlichen Wasserverbrauchs während des Versuchsverlaufes kontinuierlich vergrößerte. Die Lachgasanreicherung der Behandlung mit Luftkissen im Wurzelkompartiment (**MLK**) wurde mit einem kontinuierlichen Luftstrom lachgasangereicherter Luft vorgenommen, der in einem Kreislauf geführt wurde. Beide Anreicherungskreisläufe (Wasserkreislauf und Luftkreislauf) mündeten in ein gemeinsames Ausgleichsgefäß. Dieses Ausgleichsgefäß diente auch zur Bestimmung der in den Wurzelkompartimenten erzielten Lachgasanreicherung.

Die Kontrollbehandlung wurde im Wurzelraum kontinuierlich mit Außenluft versorgt.

Die Lachgasanreicherung innerhalb des zweiten Versuchszeitraums (19.09.2001 – 20.09.2001) wurde am 19.09.2001 zwischen 15:00 Uhr und 15:15 Uhr mit 480 ml reinem Lachgas bei 25 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Masse von 0,864g N₂O. Die erste Konzentrationsmessung im Luftpolster des Ausgleichgefäßes ergab 11713 mg N₂O *m⁻³. Die Kontrolle umfasste zwei, die Variante OLK vier und die Variante MLK ebenfalls vier Gefäße.

Die Ergebnisse des zweiten Versuchszeitraums sind in Kapitel 8.4.2 wiedergegeben.

Die Sprosskompartimente aller Versuchsgefäße wurden innerhalb der beiden Versuchszeiträume und auch in den dazwischen liegenden Zeiträumen mit einem kontinuierlichen, auf die jeweiligen Erfordernisse eingestellten Strom von Außenluft versorgt. Die jeweiligen Wiederholungen wurden im Hinblick auf eine spätere statistische Einzelauswertung vor Versuchsbeginn zufällig einander zugeordnet.

Die Versorgungsintensität der Wurzelkompartimente lag bei insgesamt ca. 2 l*min⁻¹ für die jeweiligen Gefäße der Varianten und der Kontrolle. Eine gleichmäßige Verteilung der Umwälzungskapazität wurde mit Schlauchklemmen eingestellt. Die Belüftungsintensität der Hauben wurde individuell auf den Sprossbesatz der jeweiligen Gefäße mit Durchflussmessern (Fa. *Fischer & Porter*) angepasst. Sie lag zu Beginn der Versuche zwischen 6,8 l*min⁻¹ und 9,1 l*min⁻¹ und an deren Ende zwischen 7,6 l*min⁻¹ und 8,9 l*min⁻¹. Die in den Sprosskompartimenten eingestellten Belüftungsströme wurden so eingestellt, dass den Versuchspflanzen ausreichend CO₂ zugeführt und überschüssige Luftfeuchtigkeit abgeführt wurde.

Die Konzentrationen der Gase N₂O, CO₂ und H₂O wurden kontinuierlich an den Ausgängen der Sprosskompartimente mit Hilfe eines automatischen Probenahme- und Gasmesssystems bestimmt. Das Messsystem bestand aus einem Messstellenumschalter und einem photoakustischen Messgerät (Fa. *Innova AirTech Instruments*; vgl. Kap. 3 u. Abb. 3.1.1). Vor und nach der Messung der Konzentrationen innerhalb eines Sprosskompartiments wurden die Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Außenluft gemessen, um eventuelle Konzentrationsunterschiede mit größtmöglicher Sicherheit erfassen zu können. Die Konzentrationen von N₂O, CO₂ und H₂O im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes wurden in regelmäßigen Abständen, jedoch diskontinuierlich,

ebenfalls beprobt.

Wegen des sehr hohen Feuchtigkeitsgehaltes der zur Belüftung verwendeten Außenluft, lagen viele Messungen außerhalb des für die Luftfeuchtigkeit eingestellten Eichbereiches des verwendeten Gasmessgerätes. Aus diesem Grunde wurden zusätzliche Messungen durchgeführt, mit deren Hilfe Korrekturfaktoren für die Errechnung der Lachgaskonzentration ermittelt wurden. Das errechnete Intervall für die Korrekturfaktoren lag zwischen $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ und $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$.

7.4 Ergebnisse

7.4.1 Versuche ohne Luftkissen im Wurzelraum

In der Abbildung 7.4.1.1 sind die Transpirationsraten der beiden Kontrollgefäße und der acht Versuchsgefäße mit Lachgasanreicherung im Wurzelraum ab dem 14.09.2001 dargestellt. Ein ausgeprägter diurnaler Rhythmus war bei nahezu allen Gefäßen zu beobachten. Lediglich die dritte und vierte lachgasangereicherte Wiederholung zeigten in der Dunkelperiode nach der zweiten Lachgasanreicherung (14.09.01 23:00 Uhr – 15.09.01 24:00 Uhr) geringe Schwankungen zwischen Tag und Nacht. Dieses im Vergleich zu den anderen Versuchsgefäßen anomal erscheinende Transpirationsverhalten könnte entweder auf Undichtigkeiten zwischen Wurzel- und Sprosskompartiment oder eine zeitweise Verringerung des Belüftungsluftstromes zurückzuführen sein. Die dritte lachgasangereicherte Wiederholung zeigte während des gesamten Versuchszeitraumes ungewöhnlich hohe nächtliche Transpirationsraten. Durch die unterschiedliche Pflanzendichte in den einzelnen Versuchsgefäßen und zusätzlich durch die unterschiedliche Größe der Versuchspflanzen bedingt, unterschieden sich die Transpirationsraten der Gefäße deutlich voneinander. Eine zusätzliche Fehlerquelle bei der Bestimmung der Transpirationsraten entstand, weil die Belüftungsraten der Sprosskompartimente am Luftauslass der Hauben nicht nachgemessen wurden.

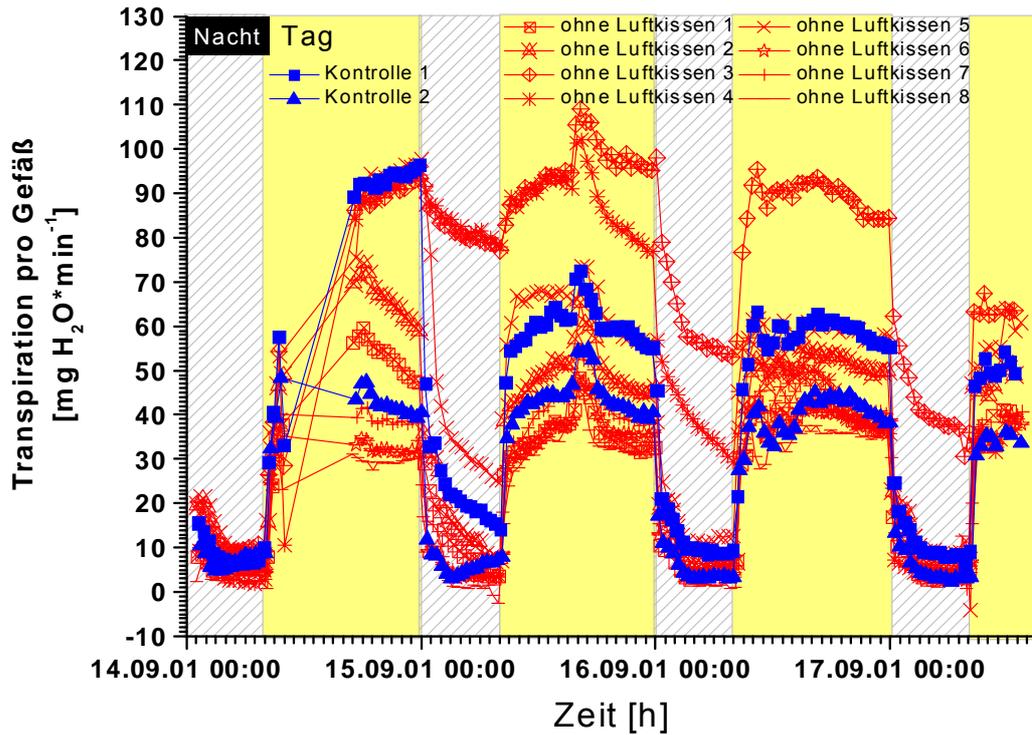


Abb. 7.4.1.1: Transpirationsraten aller Versuchgefäße. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Er ist durch die Messung der Lachgaskonzentration im Ausgleichsgefäß bedingt (Versuchspflanze Mais).

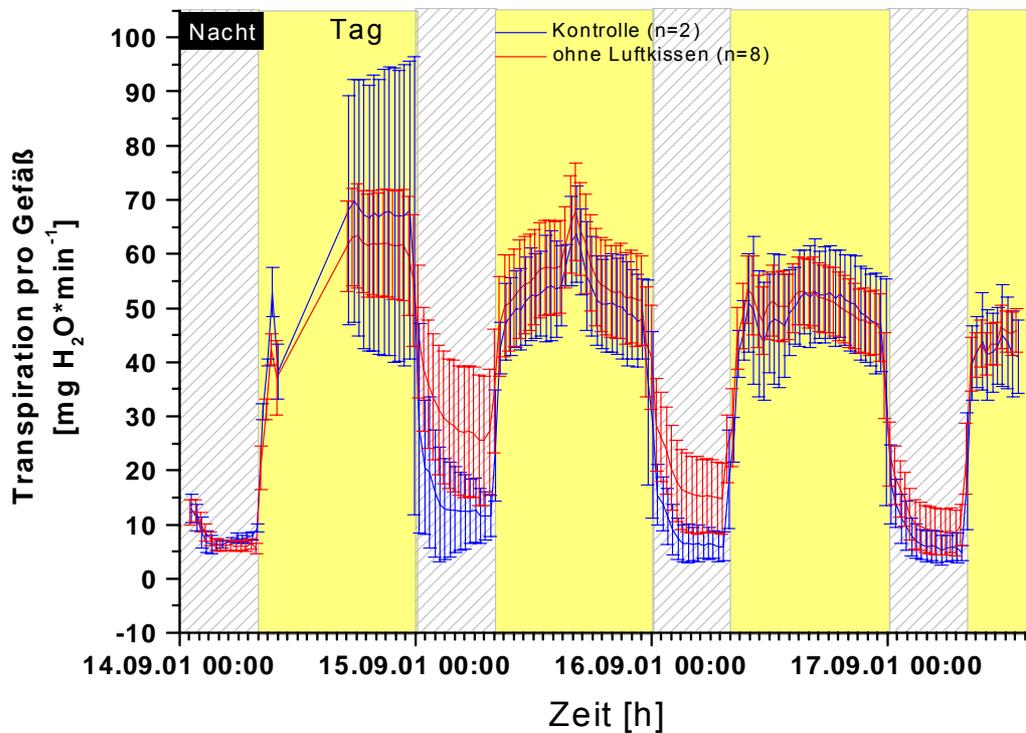


Abb. 7.4.1.2: Mittelwerte der Transpirationsraten mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Die Abbildung 7.4.1.2 zeigt die Mittelwerte der Transpirationsraten mit den zugehörigen Standardfehlern. Es sind die Werte der beiden Kontrollgefäße und der acht Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung dargestellt. Die Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung zeigten im Mittel bei Dunkelheit während des gesamten Versuchszeitraums höhere Transpirationsraten als die Kontrollgefäße. Eine statistisch signifikante Unterscheidung der Transpirationsraten der Kontrollgefäße von den Transpirationsraten der angereicherten Gefäße war nicht möglich.

Da zum Versuchszeitpunkt die Luftfeuchtigkeit der zur Belüftung der Sprosskompartimente verwendeten Außenluft sehr hoch war und die Maispflanzen schon verhältnismäßig groß waren, lag die Luftfeuchtigkeit der gemessenen Gasproben knapp außerhalb des kalibrierten Luftfeuchtigkeitsbereiches. Deshalb wurden unter Zuhilfenahme von zusätzlichen Messungen Korrekturfaktoren zur Kompensation überhöhter Luftfeuchtigkeit ermittelt. Nachfolgend sind zuerst die unkorrigierten Messergebnisse der gemessenen Lachgasemissionen dargestellt. Danach werden die Ergebnisse, die nach der Korrektur der gemessenen Werte mit zwei experimentell ermittelten Korrekturfaktoren erhalten wurden, dargestellt. Der kleinere Korrekturfaktor ($1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$) stellt die Untergrenze, der größere Korrekturfaktor ($1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$) die Obergrenze eines Intervalls dar, innerhalb dessen die wahren Lachgaskonzentrationen / -emissionen liegen.

In Abbildung 7.4.1.3 sind die Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße in der Einheit [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Gefäß}^{-1}$] ohne Luftfeuchtigkeitskorrektur wiedergegeben. Die Verhältnisse der Lachgasemissionen zwischen Gefäßen ohne Lachgasanreicherung und Gefäßen mit Lachgasanreicherung sind den Verhältnissen in Abbildung 7.4.1.1. ähnlich. Zwischen den Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und den Behandlungen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung sind bis auf die dritte und vierte Wiederholung mit Lachgasanreicherung bei der Darstellung der Werte für jede Wiederholung nur geringe Unterschiede zu den Kontrollen zu erkennen.

Zusätzlich sind in der Abbildung 7.4.1.3 die Messungen der Anreicherungskonzentrationen im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes in der Einheit [$\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$] eingezeichnet.

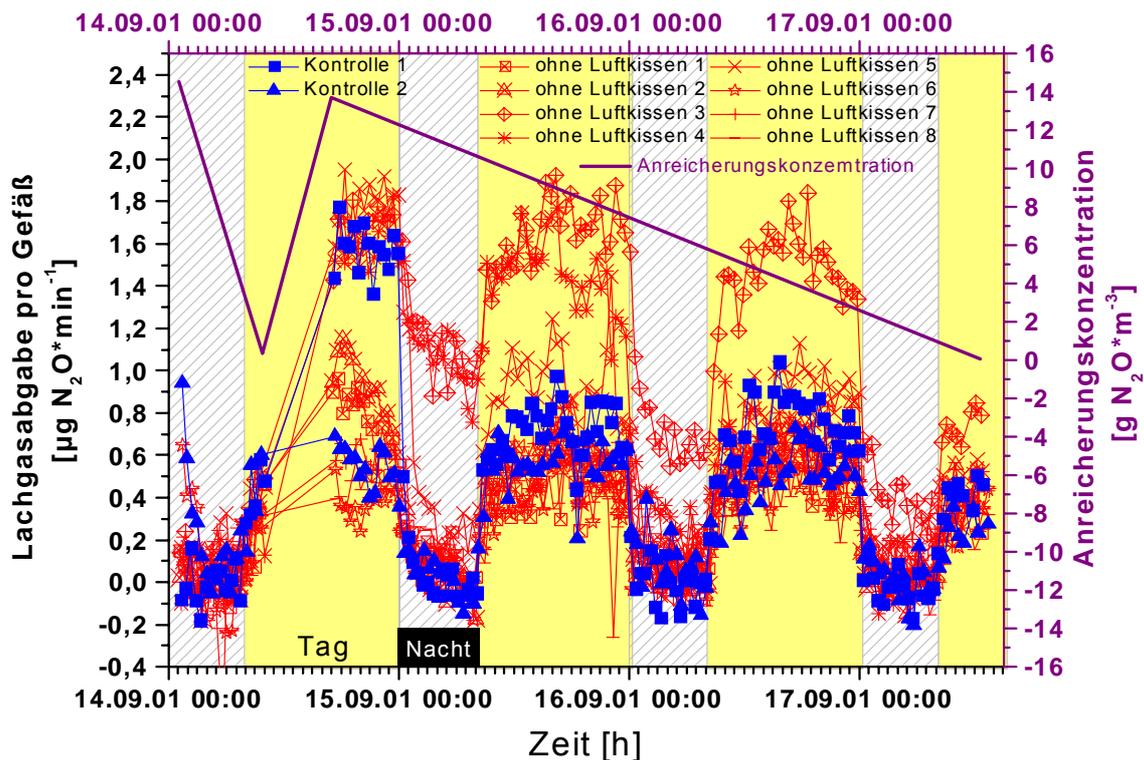


Abb. 7.4.1.3: Lachgasabgaberraten aller Versuchgefäße pro Gefäß und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Linie ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Die Mittelwerte der Lachgasemissionen für die Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und für die Behandlungen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung sind in Abbildung 7.4.1.4 dargestellt. Anhand dieser Abbildung ließen sich für die Dunkelperiode (Nacht) vom 14.09.01 23:00 Uhr bis 15.09.01 07:00 Uhr Emissionsunterschiede vermuten. Diese Unterschiede beruhen jedoch größtenteils auf den Emissionen der dritten und vierten Wiederholung mit Lachgasanreicherung. Diese schienen allerdings, wie oben erläutert, nicht zuverlässig zu sein. In den darauffolgenden Zeiträumen ließen sich anhand der Mittelwerte und den dazu gehörenden Standardfehlern keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kontrollen und den Behandlungen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung erkennen. Wie in den Abbildungen 7.4.1.1 und 7.4.1.2 für die Transpirationsrate ist auch in den Abbildungen 7.4.1.3 und 7.4.1.4 ein diurnaler Rhythmus der Lachgasemissionen pro Gefäß zu erkennen. Dabei traten

die höchsten Emissionsraten bei eingeschalteter Beleuchtung (Tag) und die niedrigsten Emissionsraten bei ausgeschalteter Beleuchtung auf.

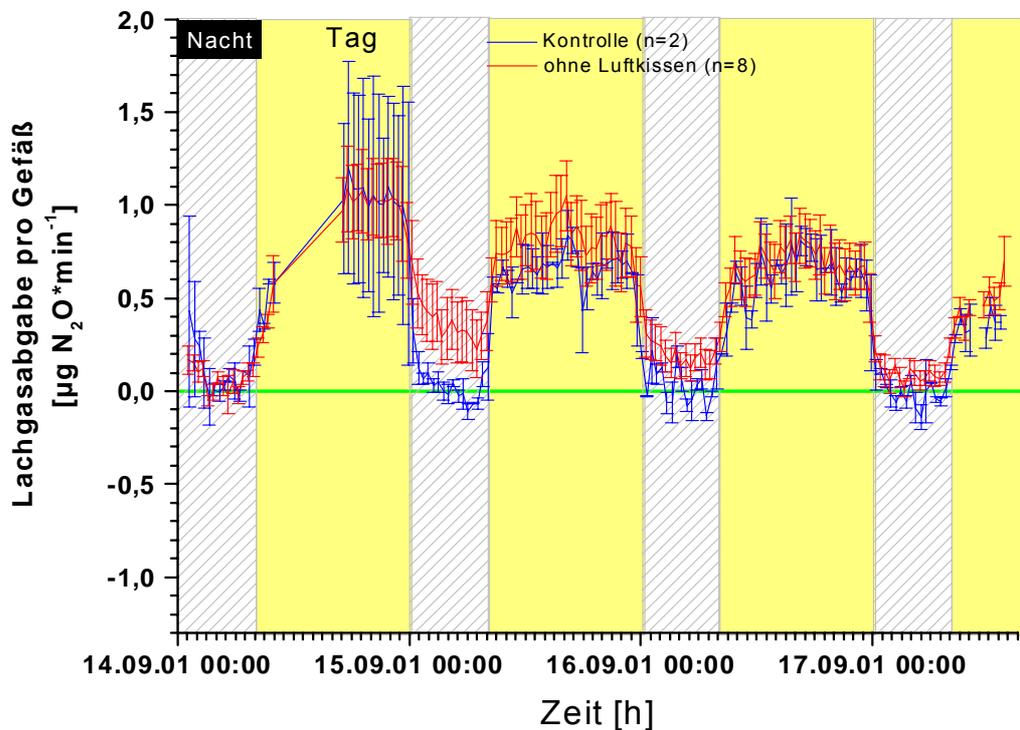


Abb. 7.4.1.4: Mittelwerte der Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Nachfolgend sind in der Abbildung 1.4.1.5 die Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge (Einheit $[\mu\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}]$) dargestellt. Die Darstellung der Messergebnisse in dieser Einheit ermöglichte einen absoluten Vergleich der Versuchsgefäße trotz unterschiedlicher Biomassen. Für die Helligkeitsphasen (Tag) ließen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Die Emissionsraten bezogen auf das transpierte Wasser blieben für alle Versuchsgefäße auf einem stabilen Niveau, das keine Veränderungstendenzen erkennen ließ. Im Gegensatz dazu zeigten die Emissionsraten in den Dunkelperioden (Nacht) bei allen Versuchsgefäßen eine sehr hohe Variabilität und im Mittel tendenziell niedrigere Emissionsraten, bzw. Lachgasaufnahme. In dieser Darstellungsweise ergaben die Versuche zwei diurnale Unterschiede. Zum einen wurden im Mittel niedrigere Lachgasemissionsraten pro g transpirierten Wassers in

der Nacht gefunden, zum anderen erhöhte sich in der Nacht die Variabilität der Lachgasemissionen pro transpiriertem Wasser.

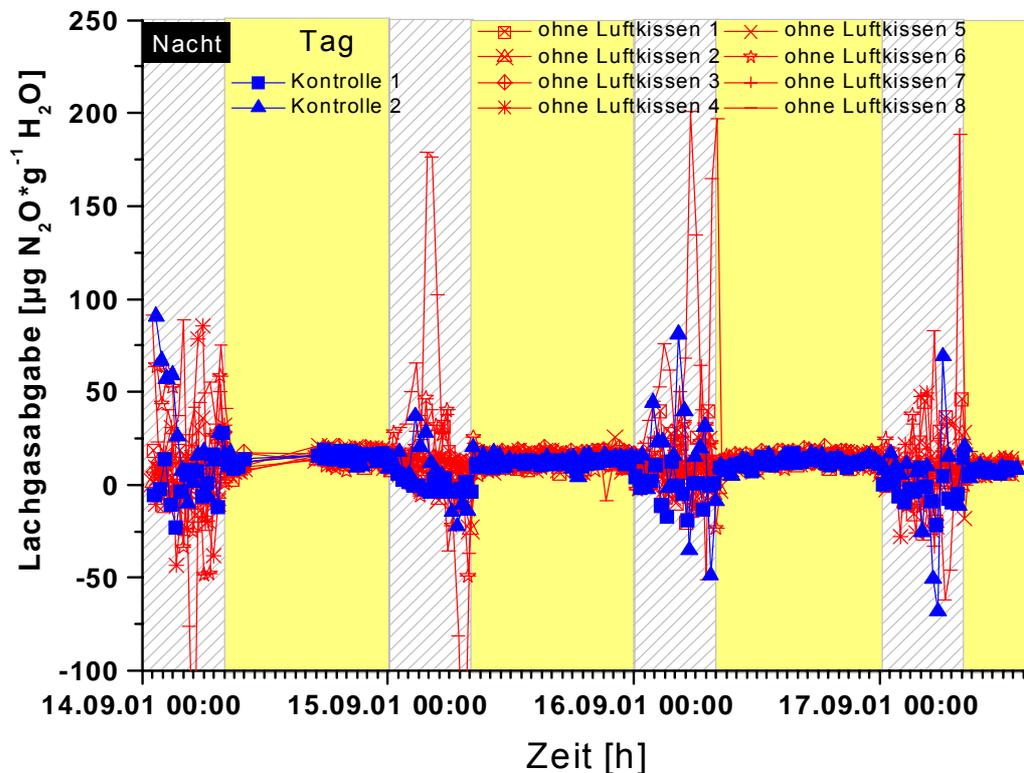


Abb. 7.4.1.5: Lachgasabgabe bezogen auf die transpirierte Wassermenge aller Versuchgefäße. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Die erhöhte nächtliche Variabilität der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen wurde am deutlichsten in der Darstellung der Mittelwerte der Kontrollgefäße und der Mittelwerte der Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und deren Standardfehler (Abb. 74.1.6). Zusätzlich zu den Mittelwerten und den zugehörigen Standardfehlern ist in Abbildung 7.4.1.6 bei null eine Orientierungsgerade eingetragen, um die Lachgasemission von der Lachgasaufnahme unterscheiden zu können. Die Erhöhung der Standardfehler in der Dunkelphase tritt deutlich hervor. Eine statistisch signifikante Unterscheidung der Mittelwerte der Kontrollgefäße und der Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung war wegen der großen Standardfehler nicht möglich.

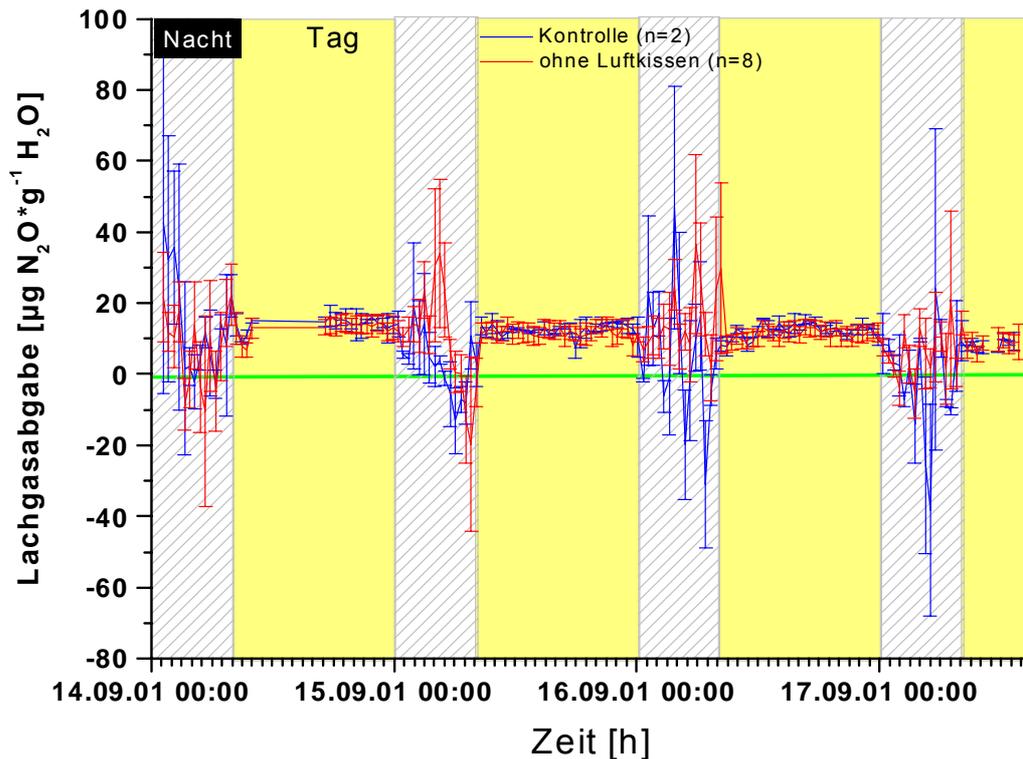


Abb. 7.4.1.6: Mittelwerte, der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen und mit den nachfolgenden Ergebnissen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Die nachfolgenden Abbildungen sind analog zu den Abbildungen 7.4.1.3 bis 7.4.1.6. Die gemessenen Werte der Lachgaskonzentration wurden lediglich wegen der hohen Luftfeuchtigkeit in den Proben mit dem Faktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigiert.

Die Abbildung 7.4.1.7 gibt die korrigierten Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße wieder. Die in der Abbildung 7.4.1.3 als unzuverlässig angenommenen Wiederholungen drei und vier mit Lachgasanreicherung hatten sich nach der Feuchtekorrektur an die anderen Messwerte angenähert. Zusätzlich ist in Abbildung 7.4.1.7 die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Anreicherungskonzentration (Lachgas) eingezeichnet und auf der rechten Seite skaliert. Diurnale Rhythmen der Lachgasemission waren auch nach der Feuchtekorrektur der Messwerte für Lachgas erkennbar.

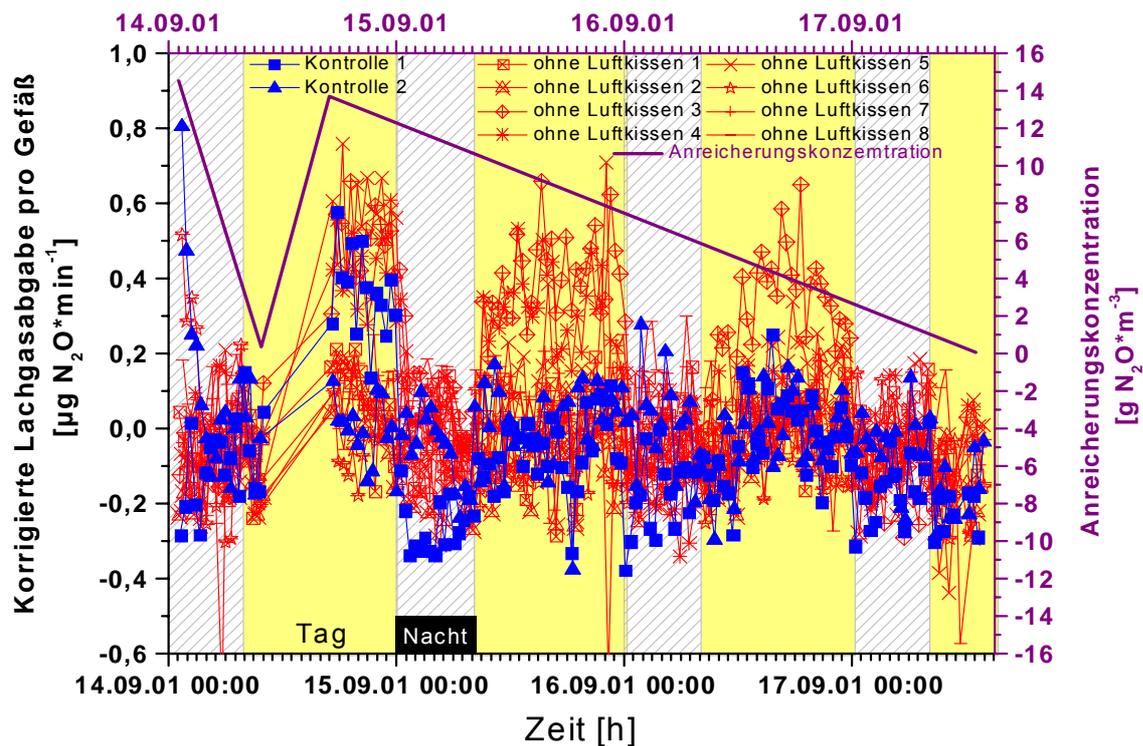


Abb. 7.4.1.7: Korrigierte Lachgasabgaberraten aller Versuchgefäße pro Gefäß und die gemessene Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration ist als Linie ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Die Mittelwerte der mit dem Faktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigierten Lachgasemissionen und die zugehörigen Standardfehler sind in Abbildung 7.4.1.8 dargestellt. Zur einfacheren Einordnung der dargestellten Ergebnisse ist bei null eine Gerade eingezeichnet. Werte, die oberhalb dieser Geraden liegen, entsprechen Emissionen. Werte, die unterhalb der eingezeichneten Nulllinie liegen, deuten auf eine Lachgasaufnahme. Nach der Korrektur der Lachgasmesswerte war sowohl bei den Kontrollgefäßen als auch bei den Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung in der grafischen Darstellung (Abb. 7.4.1.8) bei Dunkelheit tendenziell eine Lachgasaufnahme durch die Maispflanzen zu beobachten. Unterschiede zwischen den Kontrollen und den lachgasangereicherten Varianten waren in der Mittelwertdarstellung zeitweise für den 15.09.2001 erkennbar. Eine statistisch signifikante Trennung der Kontrollen von den Varianten mit Lachgasanreicherung

war wegen der großen Standardfehler nicht möglich.

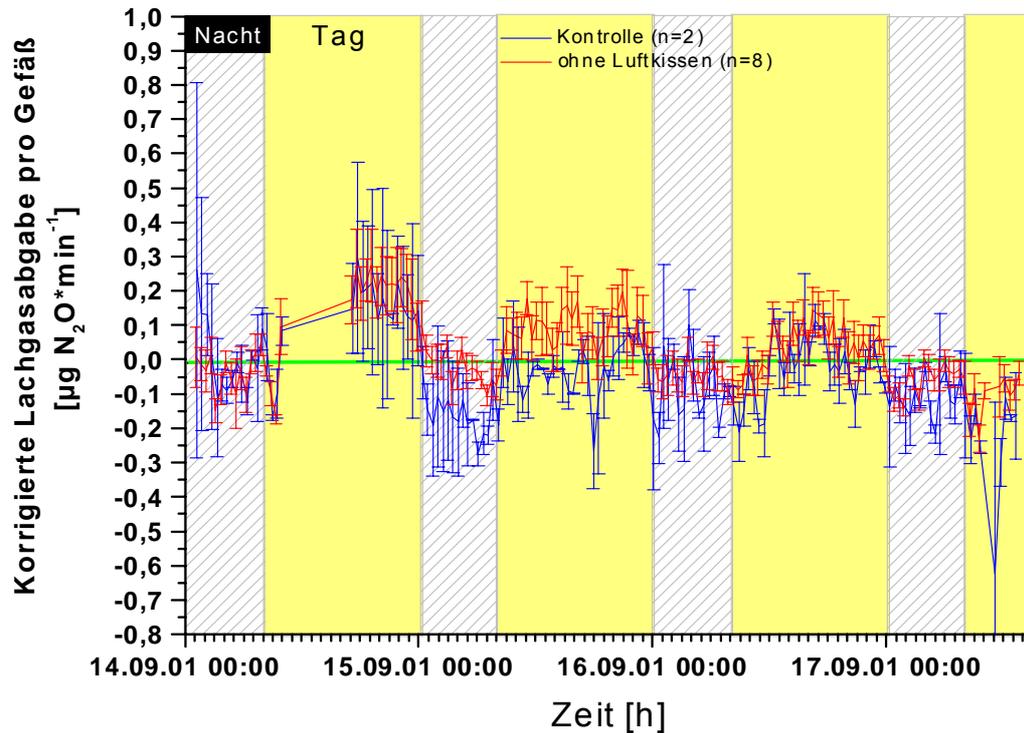


Abb. 7.4.1.8: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen und mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Die in Abbildung 7.4.1.9 dargestellten mit dem Faktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigierten Emissionen jedes Versuchsgefäßes, die auf die transpirierte Wassermenge bezogen wurden, zeigten am Tag keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Kontrollen und den lachgasangereicherten Varianten. In der Nacht war für die lachgasbehandelten Versuchsgefäße allerdings tendenziell ein intensiverer Wechsel zwischen Lachgasemission und Lachgasaufnahme pro transpirierter Wassermenge zu erkennen als bei den Kontrollen.

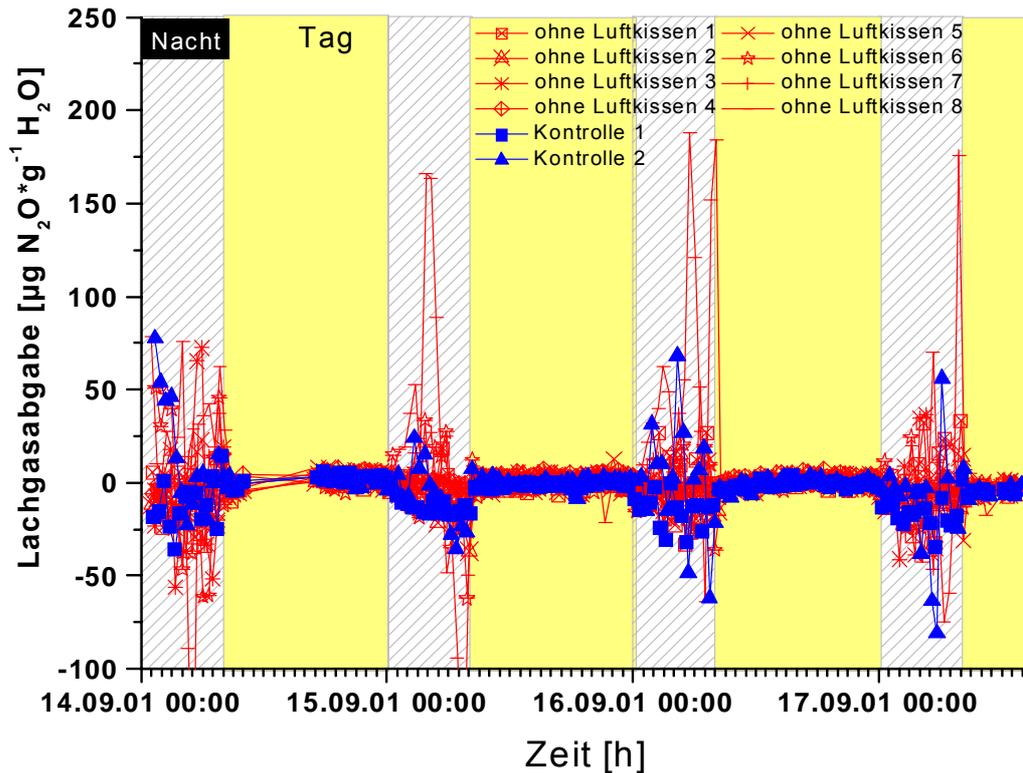


Abb. 7.4.1.9: Korrigierte Lachgasabgabe bezogen auf die transpierte Wassermenge aller Versuchgefäße. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Auch in der Mittelwertdarstellung der auf die Transpiration bezogenen korrigierten Lachgasemissionen (Abb. 7.4.1.10) ließen sich keine Unterschiede zwischen den Kontrollen und den mit Lachgas angereicherten Versuchgefäßen erkennen. Bei null ist zur besseren Differenzierung zwischen Lachgasemission und Lachgasaufnahme in der Abbildung 7.4.1.10 eine Gerade eingezeichnet. Die Werte schwankten während des gesamten Versuchszeitraums zwischen Lachgasemission und Lachgasaufnahme, wobei über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet insgesamt eine netto Lachgasaufnahme durch die Maispflanzen beobachtet wurde.

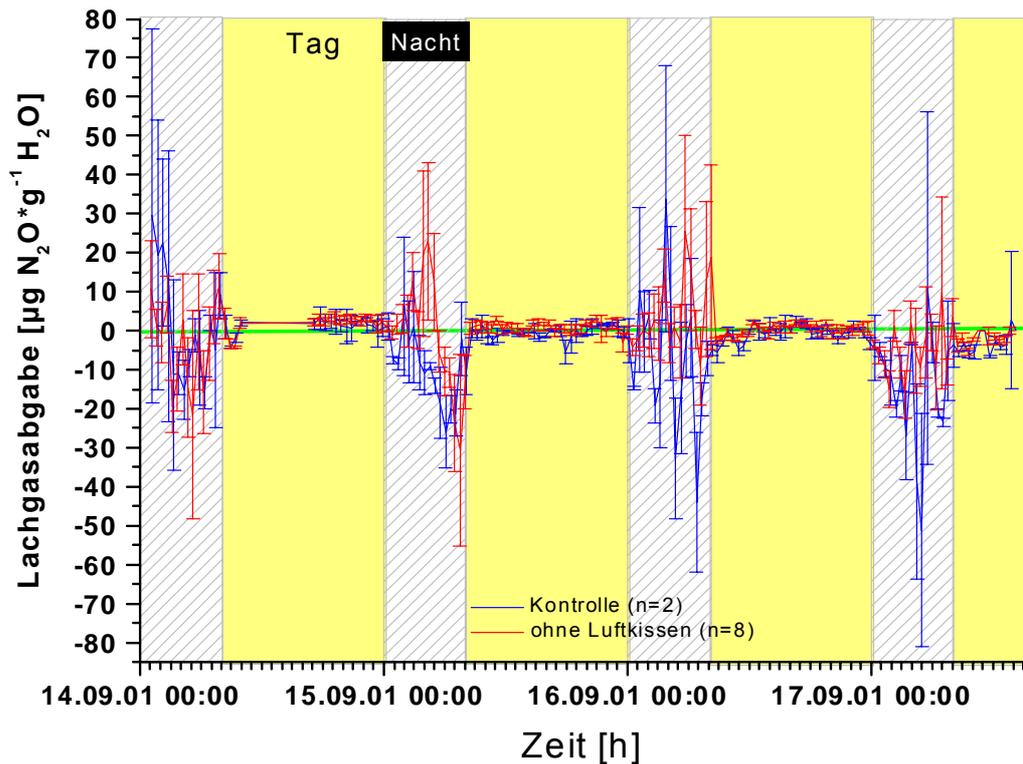


Abb. 7.4.1.10: Mittelwerte, der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen und korrigierten Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen und mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Den nachfolgenden Darstellungen liegen die mit dem Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigierten Lachgasmesswerte zugrunde. Dieser Faktor ist die Obergrenze des empirisch ermittelten Intervalls für die Korrektur der Lachgasmessungen bei außerhalb des Kalibrationsbereiches liegender Luftfeuchtigkeit in den Gasproben.

Analog zu den Abbildungen 7.4.1.3 und 7.4.1.7 sind in Abbildung 7.4.1.11 die mit dem Faktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigierten Lachgasmesswerte der beiden Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und der acht Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung eingezeichnet. Zusätzlich ist in dieser Abbildung als Kurve ohne Symbole die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes

gemessene Lachgasanreicherungskonzentration dargestellt und auf der rechten Seite skaliert. Der höhere Korrekturfaktor für die Luftfeuchtigkeit ergab noch enger beieinander liegende Lachgasemissionen, wobei die diurnale Rhythmik, die auch in den vorangehenden Darstellungen auftrat, erhalten blieb. In der Tendenz war nach Anwendung dieses Korrekturfaktors eine stärkere Verschiebung in den negativen Bereich zu beobachten.

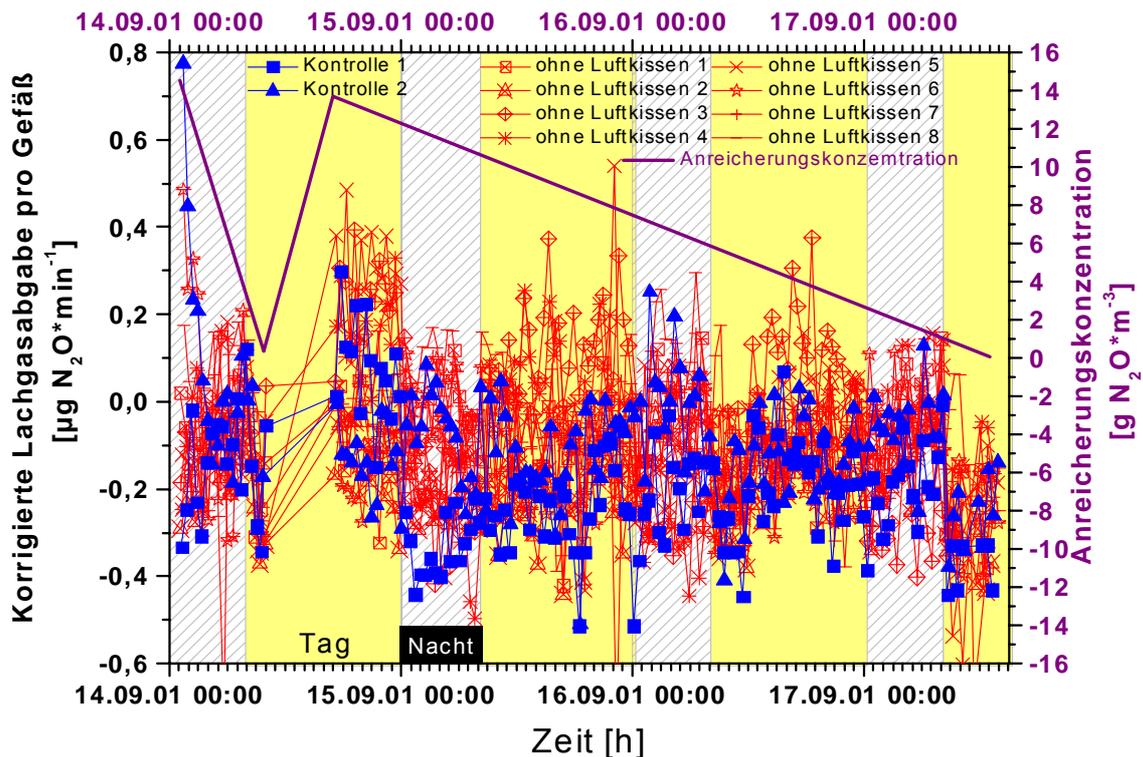


Abb. 7.4.1.11: Korrigierte Lachgasabgaberraten aller Versuchgefäße pro Gefäß und gemessene Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Linie ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Diese Verschiebung ist in der Abbildung 7.4.1.12 als Darstellung der Mittelwerte der Kontrollgefäße und der Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung noch deutlicher erkennbar. Die Mittelwerte lagen nur innerhalb eines kurzen Zeitraums oberhalb der bei null eingezeichneten Orientierungsgeraden. Eine statistisch signifikante Trennung der Kontrollen von den Behandlungen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung war auch nach Anwendung des

Korrekturfaktors $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ nicht möglich.

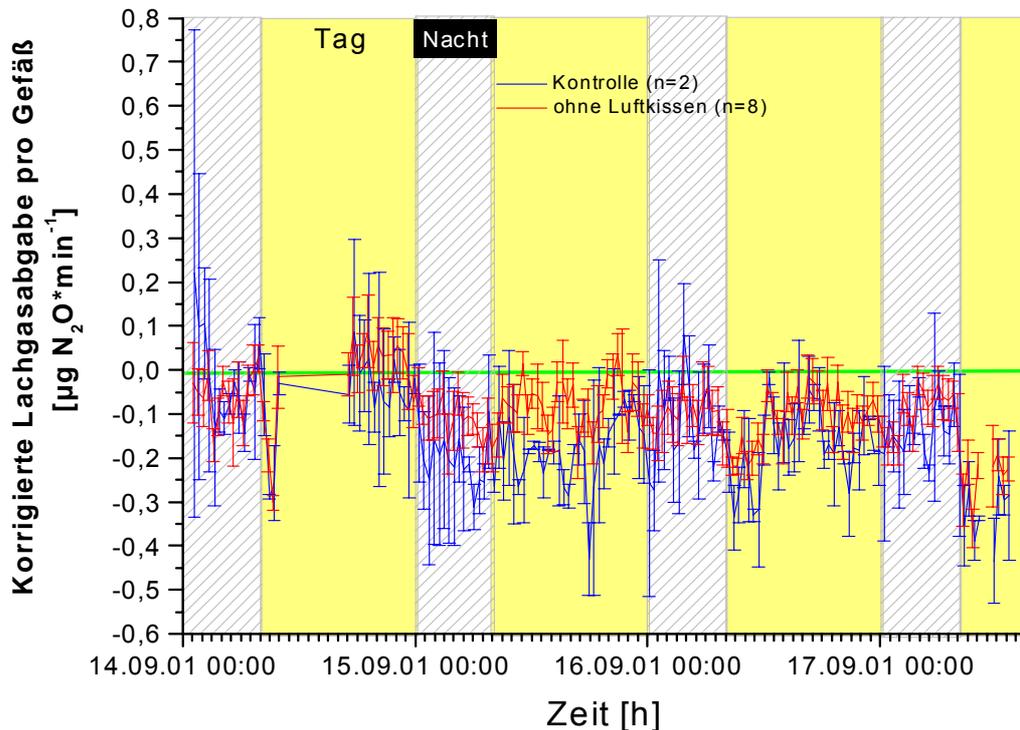


Abb. 7.4.1.12: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Die Lachgasemissionen bezogen auf die transpirierte Wassermenge, die nach der Feuchtekorrektur mit dem Faktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ermittelt wurden, sind für jedes Gefäß in Abbildung 7.4.1.13 dargestellt. Wieder waren, wie in den Darstellungen zuvor (Abb. 7.4.1.7 und 7.4.1.9), keine Unterschiede zwischen den Kontrollen und den Behandlungen mit Lachgasanreicherung erkennbar. Durch die Korrektur ergab sich eine Verschiebung der Werte in den negativen Bereich. Zusätzlich glichen sich die ermittelten Werte für die Kontrollgefäße und die Gefäße mit Lachgasanreicherung einander stark an.

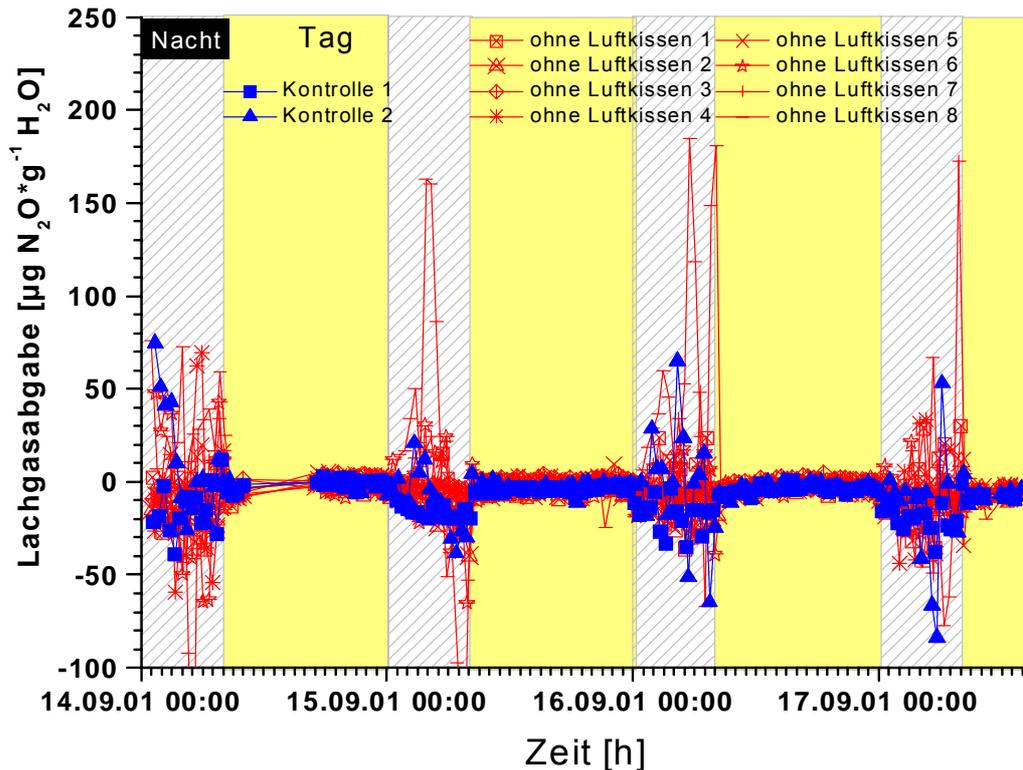


Abb. 7.4.1.13: Korrigierte Lachgasabgabe bezogen auf die transpierte Wassermenge aller Versuchgefäße. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die beiden Kontrollgefäße sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Der symbolfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar (Versuchspflanze Mais).

Die Annäherung der ermittelten Emissionswerte der mit Lachgas behandelten Gefäße an die Kontrollgefäße war in der Darstellung der Mittelwerte über alle jeweiligen Wiederholungen sehr gut ersichtlich (Abb. 7.4.1.14). Bei Anwendung dieses Korrekturfaktors lagen alle Mittelwerte für den gesamten Versuchszeitraum bis auf wenige Ausnahmen im negativen Bereich. Auch bei dieser Darstellungsweise ließen sich diurnale Rhythmen erkennen. Dabei waren bei Dunkelheit (Nacht) im Mittel geringere Werte und höhere Schwankungen zu beobachten als bei eingeschalteter Beleuchtung (Tag). Die statistisch signifikante Trennung von Kontrolle und Behandlung war auch in diesem Fall nicht möglich.

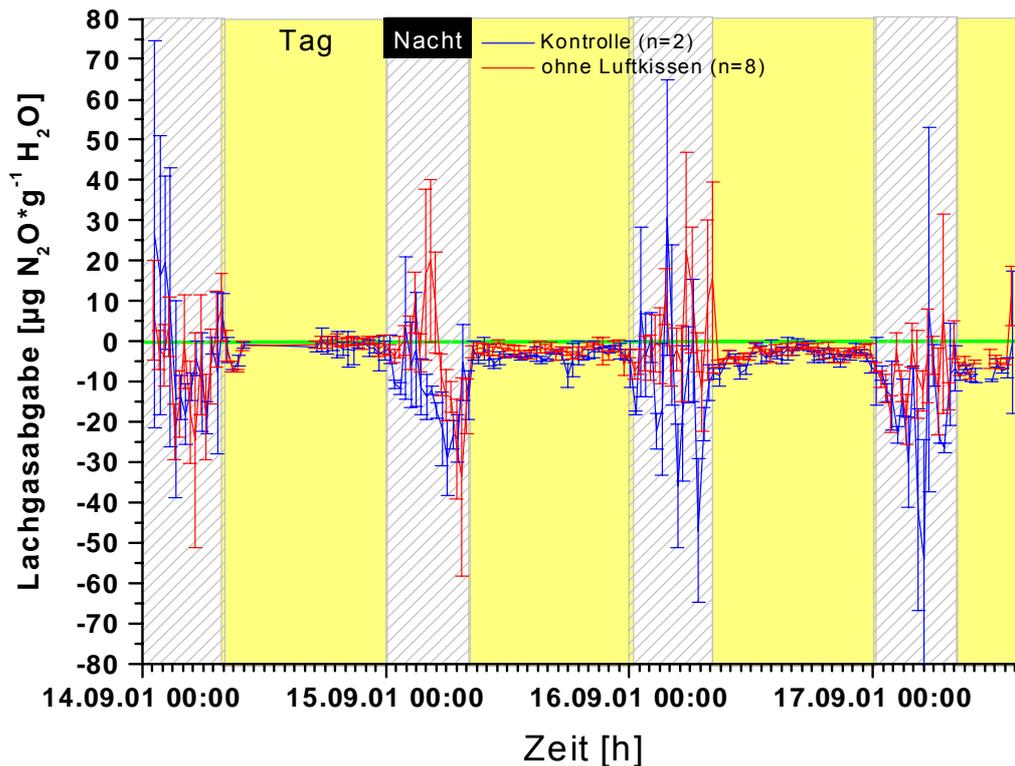


Abb. 7.4.1.14: Mittelwerte, der auf die transpierte Wassermenge bezogenen korrigierten Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, zweier Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von acht Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Der standardfehlerfreie Zeitraum am 14.09.01 stellt die zweite Lachgasanreicherung und somit den Versuchsbeginn dar. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

In der Tabelle 7.4.1.1 sind die gesamten Mittelwerte, der auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasemissionen, für Tag und Nacht getrennt, unkorrigiert und mit den Faktoren $1,3E^{-5}$ und $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ korrigiert angegeben. Dabei beschreiben die Zeiträume Nacht 1 und Tag 1a die Messungen zwischen der ersten Lachgasanreicherung in der Nährlösung am 13.09.2001 und der zweiten Lachgasanreicherung am 14.09.2001. Die Zeiträume ab Tag 1b liegen alle nach der zweiten Lachgasanreicherung.

Tab. 7.4.1.1: Tages- und Nachtmittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge ohne Korrektur für außerhalb des Kalibrationsbereiches liegende Luftfeuchtigkeit und für zwei ermittelte Korrekturfaktoren. Negative Werte bedeuten eine Lachgasaufnahme (Versuchspflanze Mais).

	Kontrolle Lachgasabgabe (ohne Feuchtekorrektur) [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	ohne Luftkissen Lachgasabgabe (ohne Feuchtekorrektur) [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	Kontrolle Lachgasabgabe (Feuchtekorrekturfaktor $1,3 \cdot 10^{-5}$) [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	ohne Luftkissen Lachgasabgabe (Feuchtekorrekturfaktor $1,3 \cdot 10^{-5}$) [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	Kontrolle Lachgasabgabe (Feuchtekorrekturfaktor $1,6 \cdot 10^{-5}$) [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	ohne Luftkissen Lachgasabgabe (Feuchtekorrekturfaktor $1,6 \cdot 10^{-5}$) [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]
Nacht 1	14,391	7,505	1,391	-3,495	-1,609	-6,495
Tag 1a	12,285	10,072	-0,715	-0,928	-3,715	-3,928
Tag 1b	14,656	13,724	1,656	2,724	-1,344	-0,276
Nacht 2	3,623	10,693	-9,377	-0,307	-12,377	-3,307
Tag 2	12,296	11,435	-0,704	0,435	-3,704	-2,565
Nacht 3	6,059	14,273	-6,941	3,273	-9,941	0,273
Tag 3	12,258	11,889	-0,742	0,889	-3,742	-2,111
Nacht 4	-1,797	5,673	-14,797	-5,327	-17,797	-8,327
Tag 4a	7,51	8,83	-5,49	-2,17	-8,49	-5,17
Tag 4b	7,596	9,098	-5,404	-4,66	-8,404	-4,902

7.4.2 Versuche mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum

Die Abbildung 7.4.2.1 gibt die mit den Belüftungsraten korrigierten Transpirationsraten eines Kontrollgefäßes, zweier Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung ohne Luftkissen im Wurzelraum und die Transpirationsrate von zwei Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und Luftkissen im Wurzelraum wieder. Zusätzlich ist durch die Kurve ohne Symbole die Luftfeuchtigkeit in einem Gefäß ohne Pflanzen dargestellt, in dessen Sprosskompartiment nasser Zellstoff gelegt wurde. Der Abbildung 7.4.2.1 ist neben der diurnalen Rhythmik der Transpiration zu entnehmen, dass die Verdunstungsraten des nassen Zellstoffs über den Transpirationsraten der Pflanzen lagen.

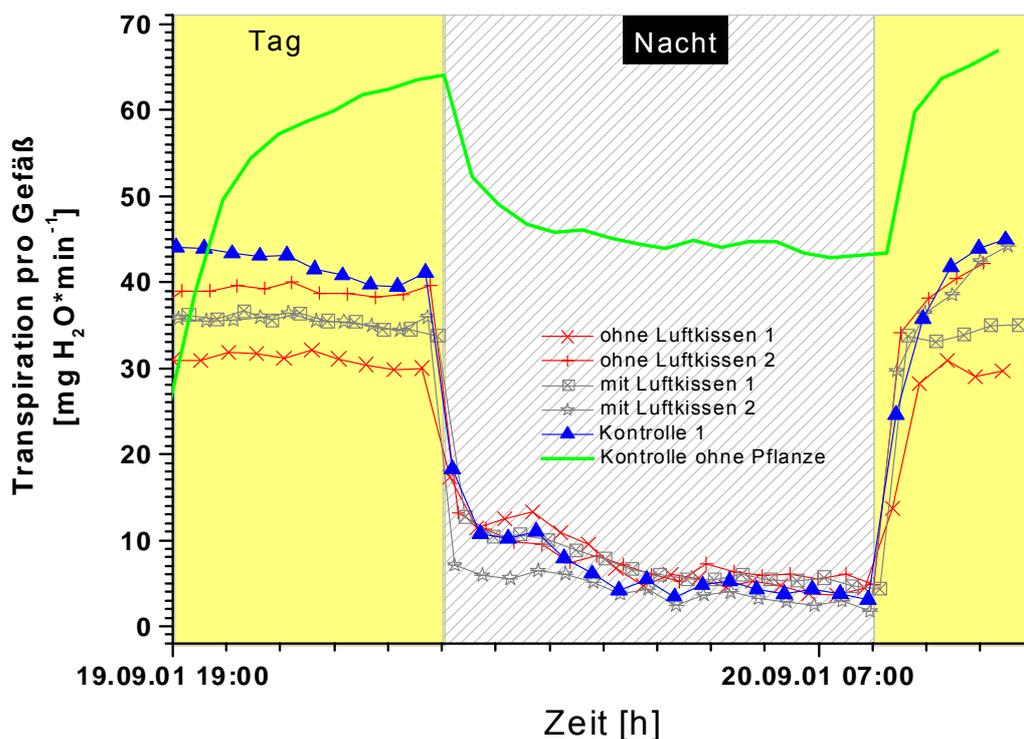


Abb. 7.4.2.1: Transpirationsraten aller Versuchsgefäße. Die Linie ohne Symbole gibt den Verlauf der Luftfeuchtigkeit in einem Versuchsgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais).

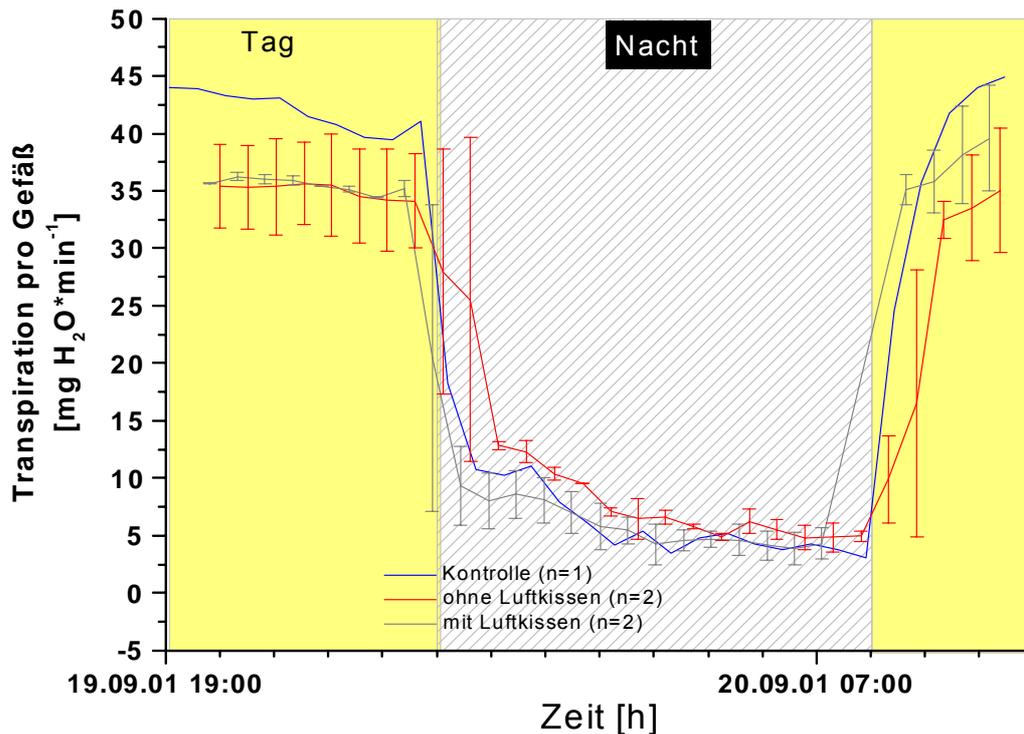


Abb. 7.4.2.2: Mittelwerte der Transpirationsraten mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuch Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren (Versuchspflanze Mais).

In Abbildung 7.4.2.2 sind für die Gefäße mit Lachgasanreicherung die Mittelwerte der Transpirationsraten mit den dazugehörigen Standardfehlern eingezeichnet. Für die Kontrolle ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung sind keine Standardfehler eingezeichnet, da keine verwertbaren Wiederholungen für die Kontrolle vorlagen.

Die gemessenen und mit der jeweiligen Belüftungsintensität korrigierten Lachgasemissionen aller Versuch Gefäße sind in der Abbildung 7.4.2.3 eingezeichnet. Die Kurve ohne Symbole bezeichnet hier, wie in der Abbildung 7.4.2.1, ein Gefäß ohne Pflanzenbewuchs in dessen Sprosskompartiment nasser Zellstoff gelegt wurde. Zusätzlich ist als Gerade mit Skalierung auf der rechten Seite die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration aufgetragen.

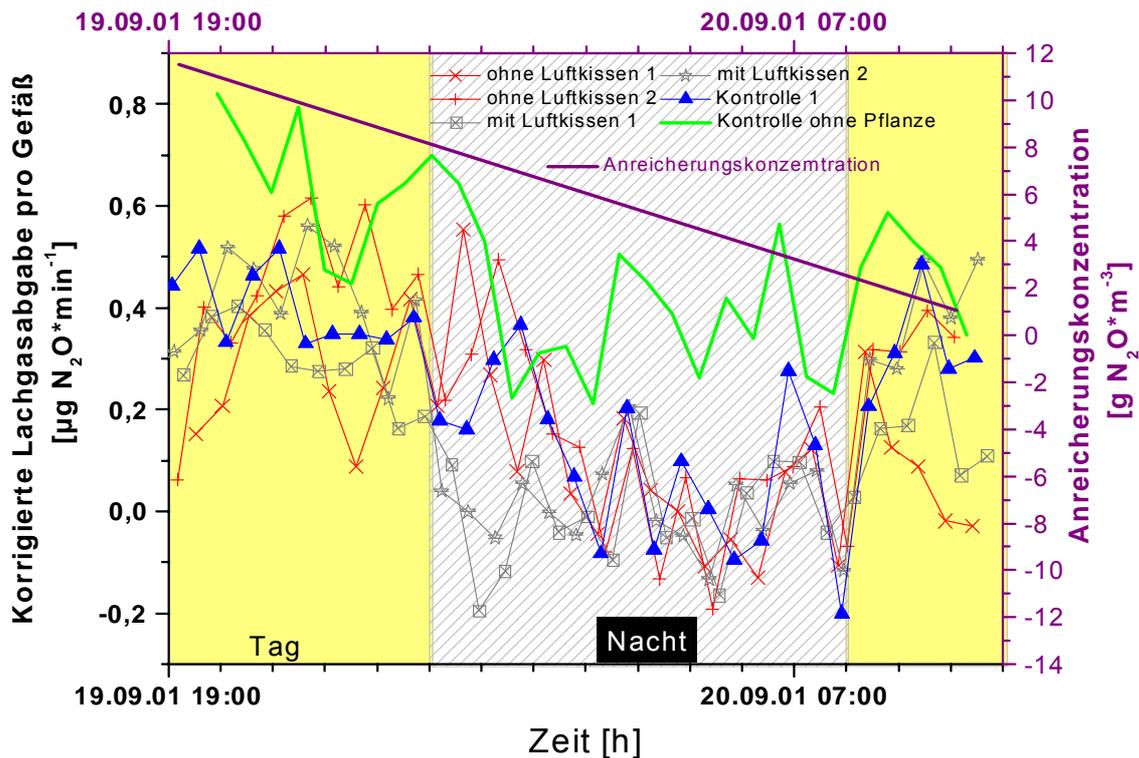


Abb. 7.4.2.3: Lachgasabgaberraten (pro Gefäß) aller Versuchgefäße und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Gerade ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert (Versuchspflanze Mais).

Die höchsten Lachgasemissionen wurden bei dem Versuchgefäß ohne Pflanzen gemessen. Eine Unterscheidung der Lachgasemissionen der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung von dem Kontrollgefäß ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung war bei dieser Darstellung nicht möglich. Ein Unterschied der Lachgasemissionen zwischen den mit Lachgas angereicherten Behandlungen mit Luftkissen im Wurzelraum und denen ohne Luftkissen im Wurzelraum war nicht deutlich zu erkennen.

Die in der Abbildung 7.4.2.4 dargestellten Mittelwerte der Lachgasemissionen der jeweiligen Behandlungen zeigen innerhalb des Zeitraums von ca. 23:00 Uhr am 19.09.2001 bis ca. 02:00 Uhr am 20.09.2001 für die Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelraum im Mittel geringere Lachgasemissionen als die Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum und das Kontrollgefäß ohne Lachgasanreicherung.

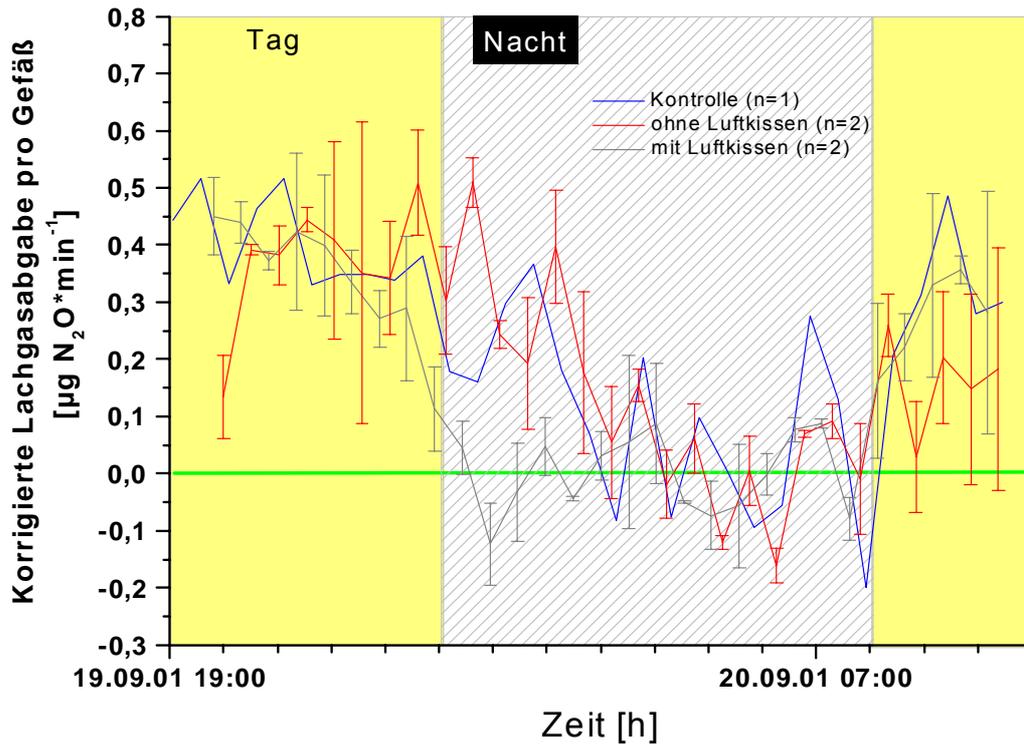


Abb. 7.4.2.4: Mittelwerte der Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Die bei null eingezeichnete Gerade dient der optischen Trennung der Lachgasemission von der Lachgasaufnahme.

Die auf die durch die Pflanzen transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasemissionen sind in der Abbildung 7.4.2.5 dargestellt. Die Kurve ohne Symbole gibt die Werte für das pflanzenfreie Versuchsgefäß wieder. Bei diesem Gefäß wurden die gemessenen Lachgasemissionen auf die aus dem nassen Zellstoff verdampfte Wassermenge bezogen. Bei eingeschalteter Beleuchtung zeigten die auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen der Versuchsgefäße, die Pflanzen enthielten, nur geringe Schwankungen. Bei ausgeschalteter Beleuchtung oszillierten die Emissionen sehr stark, hingegen blieben die Werte des pflanzenfreien Versuchsgefäßes während der gesamten Versuchsdauer in einem ähnlichen Bereich.

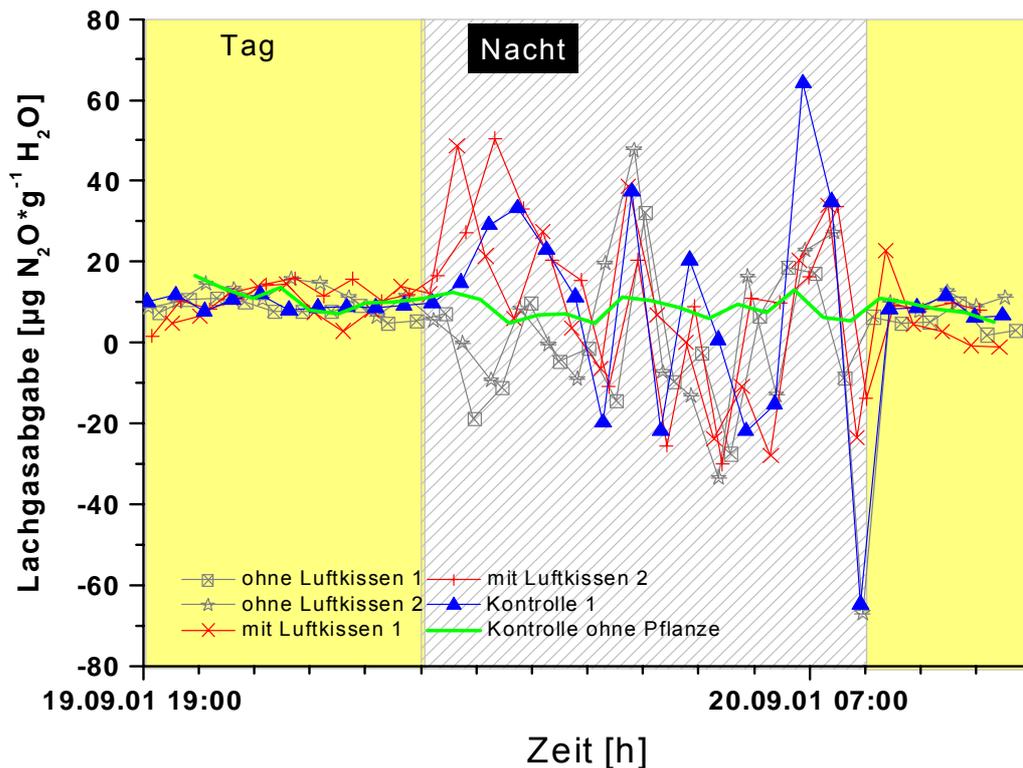


Abb. 7.4.2.5: Lachgasabgabe aller Versuchgefäße bezogen auf die transpirierte Wassermenge. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais).

Die Mittelwerte der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen der jeweiligen Behandlungen und die Lachgasemissionswerte des Kontrollgefäßes sind in Abbildung 7.4.2.6 wiedergegeben. Bei null ist wiederum eine Orientierungslinie eingezeichnet. Wie schon in der Abbildung 7.4.2.4 ist für den Zeitraum von ca. 23:00 Uhr am 19.09.2001 bis ca. 02:00 Uhr am 20.09.2001 für die Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelraum eine im Mittel geringere auf die transpirierte Wassermenge bezogene Lachgasemission als bei den Versuchgefäßen mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum und bei dem Kontrollgefäß ohne Lachgasanreicherung zu finden. Bei beiden Behandlungen und bei der Kontrolle sind in der Nacht neben Emissionen auch Zeitpunkte mit Lachgasaufnahme zu finden.

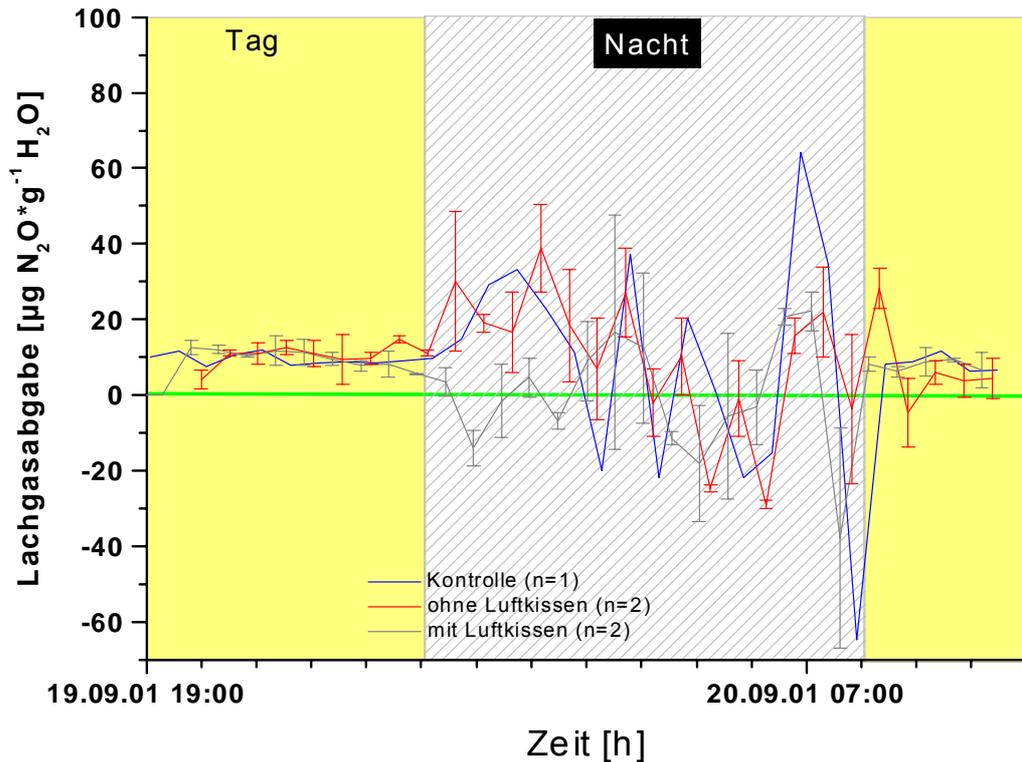


Abb. 7.4.2.6: Mittelwerte, der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Die Kurve ohne Standardfehler gibt den Verlauf für das Kontrollgefäß wieder. Um die Ergebnisse mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Aus Abbildung 7.4.2.1 in Verbindung mit der Abbildung 7.4.2.3 konnte abgeleitet werden, dass auch während des hier dargestellten Versuchszeitraums die Luftfeuchtigkeit außerhalb des kalibrierten Bereichs lag. Es erschien sehr unwahrscheinlich, dass nasser Zellstoff Lachgas emittiert. Aus diesem Grunde sind nachfolgend die mit den schon in Kapitel 7.4.1 verwendeten Korrekturfaktoren korrigierten Werte dargestellt.

Wie in Abbildung 7.4.2.7 ersichtlich, senkte die Korrektur der Messwerte mit dem Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ die Messwerte aller Versuchgefäße im Vergleich zur Abbildung 7.4.2.3 ab. Die Werte für das Versuchgefäß ohne Pflanzen wurden durch diese Korrektur in den Bereich der restlichen Gefäße gerückt. In der Abbildung 7.4.2.7 ist zusätzlich mit der Skalierung auf der rechten Seite noch die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration als Gerade ohne Symbole eingezeichnet.

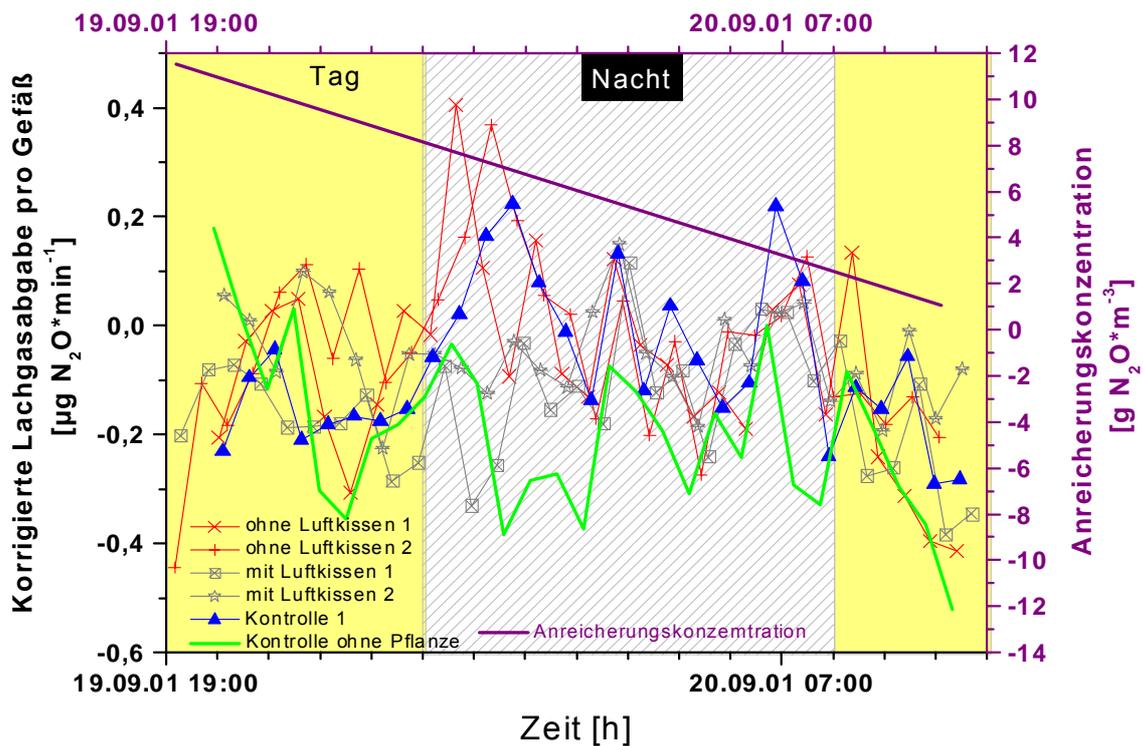


Abb. 7.4.2.7: Korrigierte Lachgasabgaberraten (pro Gefäß) aller Versuchgefäße und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^3) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^3)^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Gerade ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert (Versuchspflanze Mais).

Bei der Darstellung der korrigierten Mittelwerte der jeweiligen Behandlungen und der korrigierten Werte des Kontrollgefäßes war in der Gesamttendenz eine Lachgasaufnahme zu beobachten. Die bei null eingezeichnete Gerade dient zur optischen Trennung von Lachgasemission und Lachgasaufnahme.

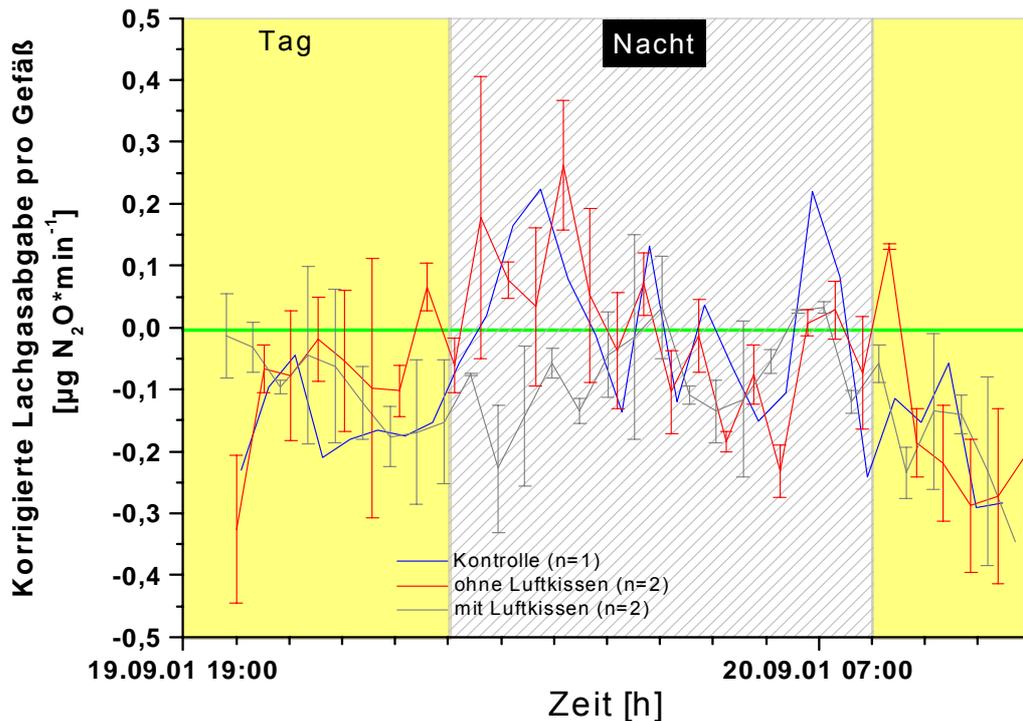


Abb. 7.4.2.8: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Durch die Korrektur der Messwerte für die Kompensation der erhöhten Luftfeuchtigkeit in den Messproben mit dem Faktor $1,3E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ gab es bei der Ermittlung der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasemission in der Abbildung 7.4.2.9 im Vergleich zur Abbildung 7.4.2.5 nur eine Niveaushiftung. Es waren keine qualitativen Veränderungen innerhalb des diurnalen Musters zu erkennen: nachts waren die Oszillationen der Emissionen deutlich höher als am Tag. Der Verlauf der Kurve für das Gefäß ohne Pflanzen, die mit den korrigierten Werten erstellt wurde, zeigte im Vergleich zu der Kurve ohne Korrektur nur eine Niveaushiftung in den negativen Bereich. Für einen kurzen Zeitraum, während der Nacht, schienen die Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und ohne Luftkissen im Wurzelraum weniger Lachgas pro transpirierte Wassermenge zu emittieren als die Kontrolle und die Behandlung mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum.

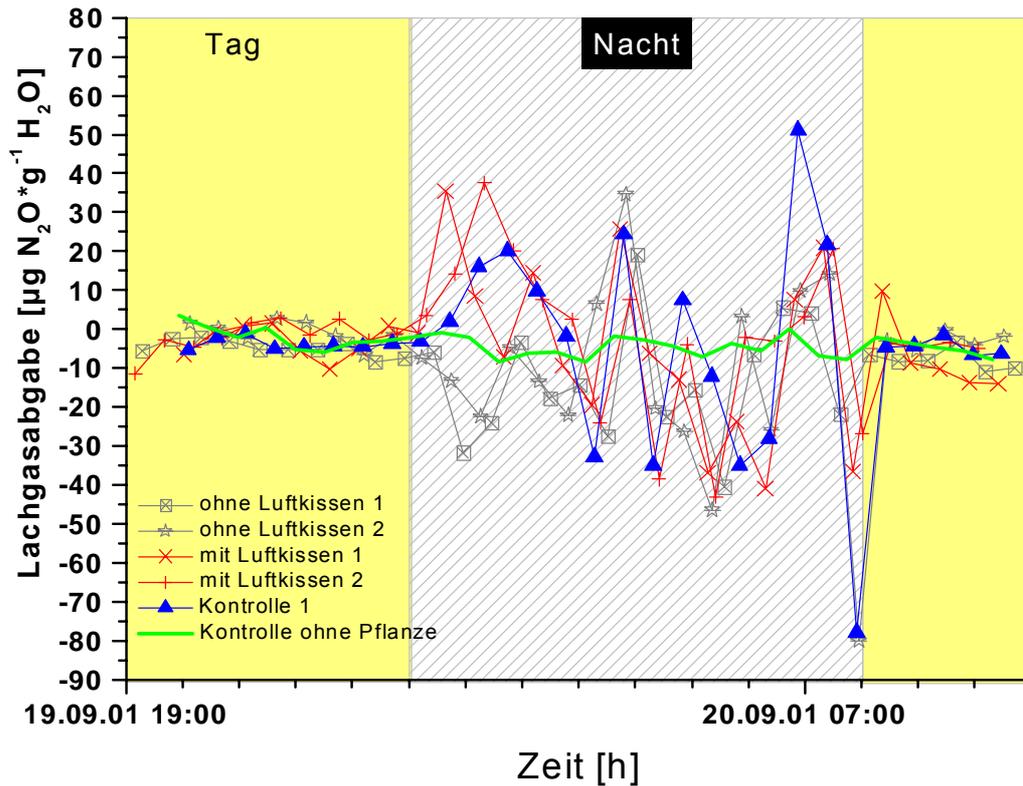


Abb. 7.4.2.9: Korrigierte Lachgasabgabe aller Versuchgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3\text{E}^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais).

Der oben beschriebene Unterschied in den Lachgasemissionen bei Nacht war bei der Betrachtung der Mittelwerte (für die jeweilige Behandlung) der auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasemission noch deutlicher zu erkennen (Abb. 7.4.2.10). Bei null ist zur Orientierung eine Gerade aufgetragen.

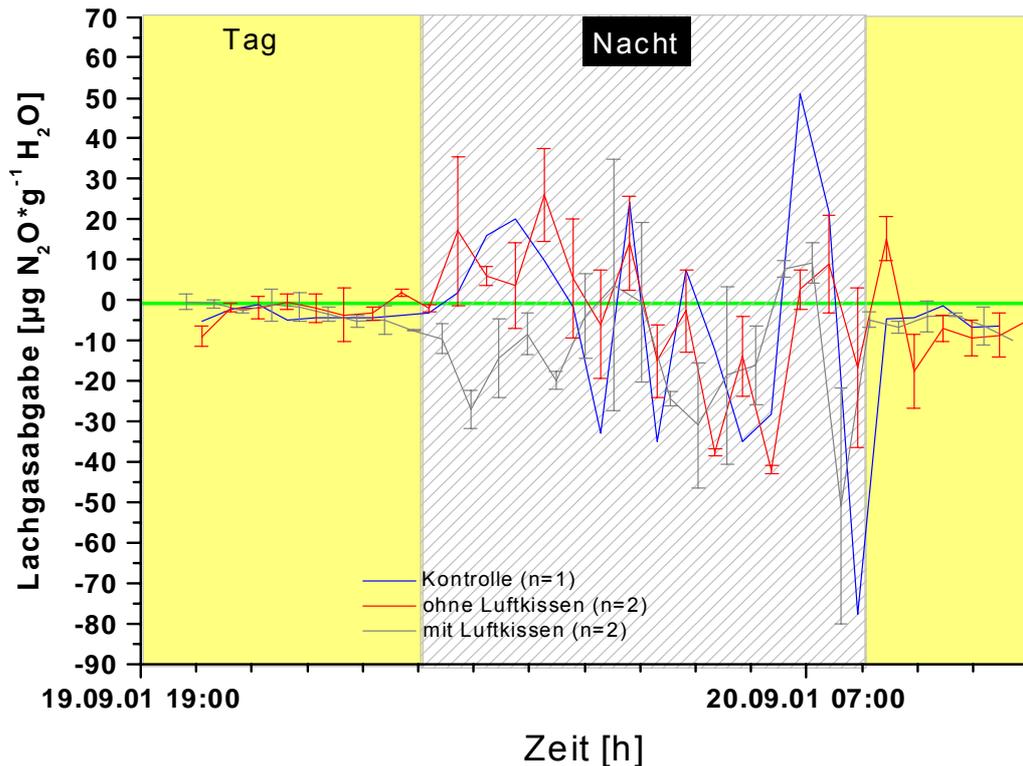


Abb. 7.4.2.10: Mittelwerte, der auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern, der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,3\text{E}^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Standardfehler gibt den Verlauf für das Kontrollgefäß wieder. Um die Ergebnisse mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die mit dem Feuchtekorrekturfaktor $1,6\text{E}^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ errechneten Lachgasemissionen dar. Die Abbildung 7.4.2.11 enthält die mit der Belüftungsintensität korrigierten Lachgasemissionen aller Versuchgefäße (vgl. Abb. 7.4.2.3 und 7.4.2.7). Zusätzlich ist die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration als Gerade ohne Symbole und mit der Skalierung auf der rechten Seite eingezeichnet. Wie schon bei der zuvor beschriebenen Korrektur mit dem kleineren Korrekturfaktor war bei der Korrektur mit dem höheren Faktor ebenfalls eine Niveauveränderung in den negativen Bereich verbunden. Die korrigierten Lachgasemissionen des Versuchgefäßes ohne Pflanzen lagen größtenteils unter den korrigierten Werten der Versuchgefäße mit Pflanzen. Insgesamt lagen nach der Korrektur alle bei eingeschalteter Beleuchtung gewonnenen Lachgasemissionswerte im negativen Bereich, während sie in der Nacht teilweise noch im positiven Bereich bleiben.

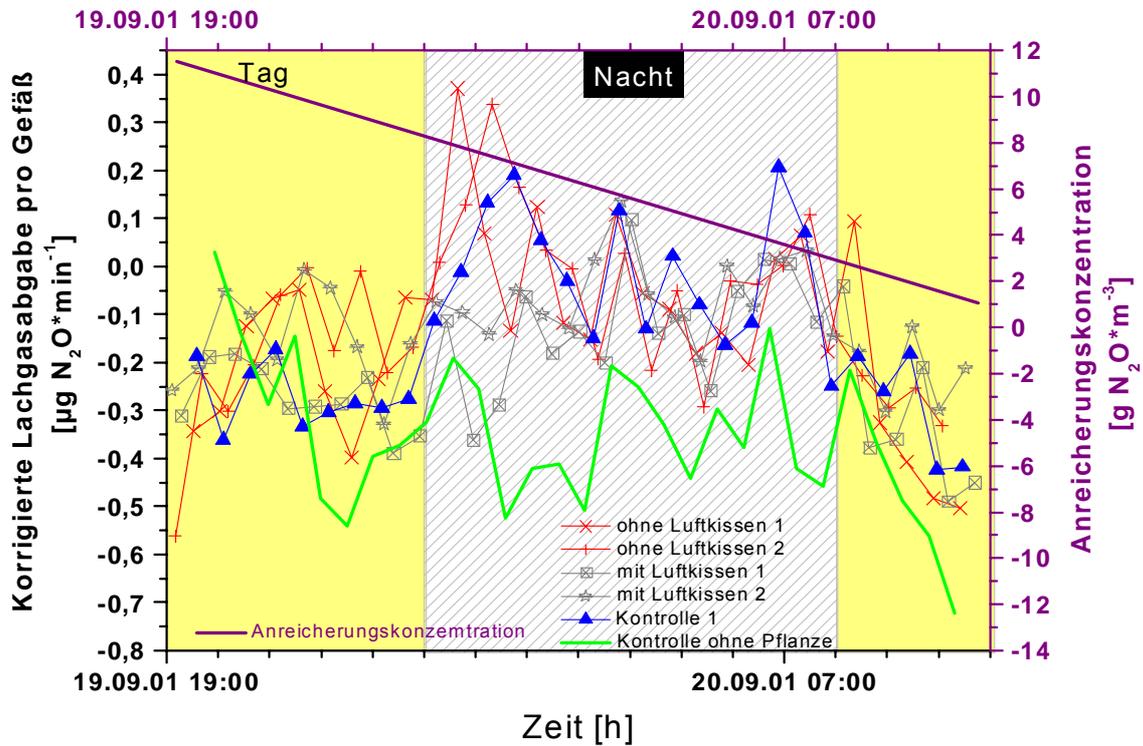


Abb. 7.4.2.11: Korrigierte Lachgasabgaberraten (pro Gefäß) aller Versuchgefäße und Lachgaskonzentration im Luftkissen des verwendeten Ausgleichsgefäßes. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchsgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ist als Gerade ohne Symbole wiedergegeben und auf der rechten Seite skaliert (Versuchspflanze Mais).

Die oben beschriebenen Veränderungen sind in der Darstellung als Mittelwerte der Wiederholungen der jeweiligen Varianten (Abb. 7.4.2.12) noch besser zu erkennen als in der Abbildung 7.4.2.11. Die in der Abbildung 7.4.2.12 bei null eingezeichnete Gerade dient zur Trennung des negativen und des positiven Darstellungsbereiches.

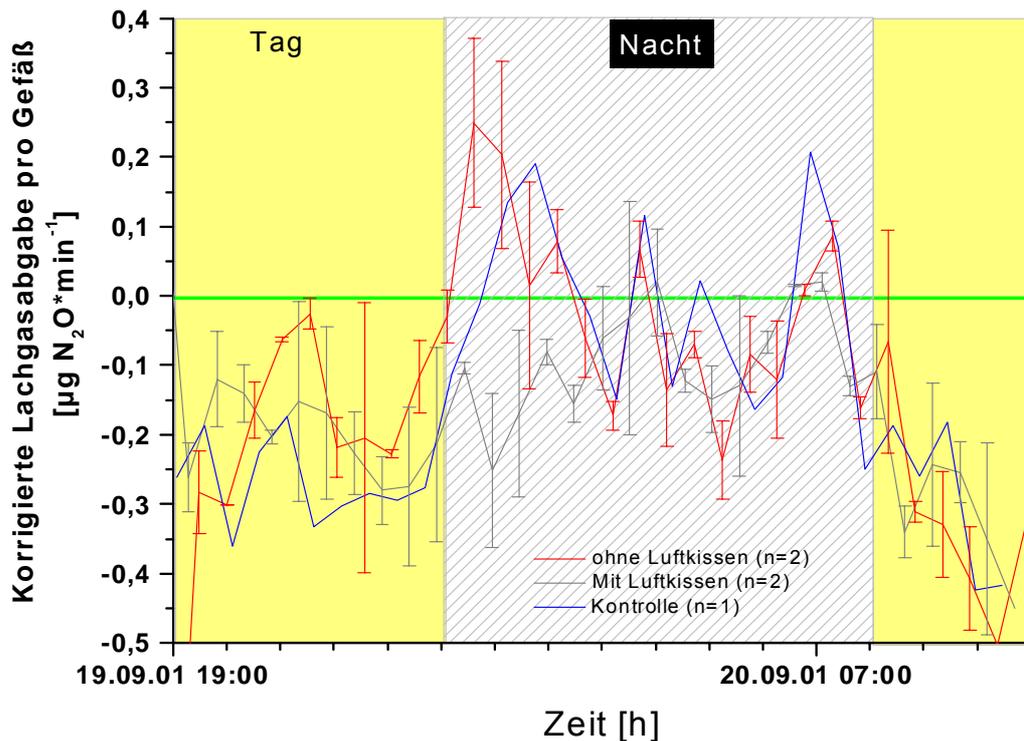


Abb. 7.4.2.12: Mittelwerte der korrigierten Lachgasabgaberraten pro Gefäß mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Für das Kontrollgefäß sind die Messwerte dargestellt, da keine Wiederholungen verfügbar waren. Um die dargestellten Werte besser einordnen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Die Darstellung der feuchtekorrigierten und auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasemissionen in Abbildung 7.4.2.13 gleicht den Abbildungen 7.4.2.5 und 7.4.2.9. Die drei Abbildungen unterscheiden sich nur bezüglich der Emissionshöhe, wobei die diurnalen Unterschiede im Emissionsverhalten durchwegs deutlich zu erkennen waren. In der Nacht waren bei den Versuchsgefäßen, in denen sich Maispflanzen befanden, weiterhin auf die transpierte Wassermenge bezogen teilweise hohe Lachgasemissionen zu finden. Die Lachgasemissionen des Versuchsgefäßes zeigten auch nach dieser Korrektur weder einen diurnalen Rhythmus noch extrem hohe Werte.

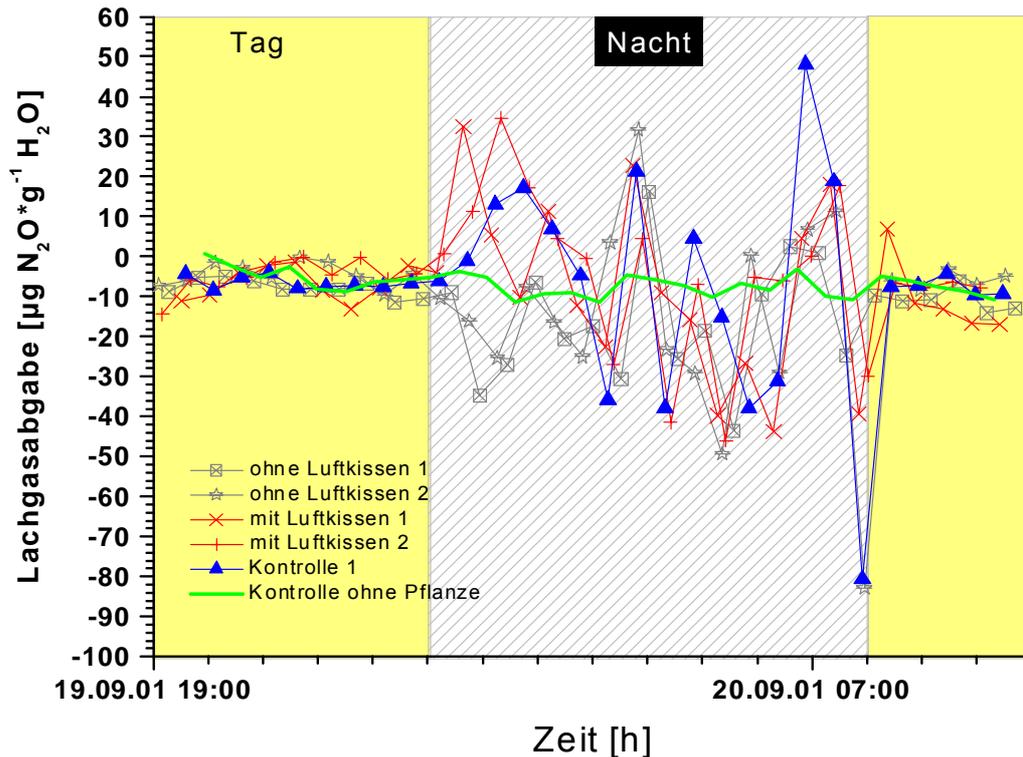


Abb. 7.4.2.13: Korrigierte Lachgasabgabe aller Versuchgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Symbole gibt den Verlauf der gemessenen Lachgasabgabe in einem Versuchgefäß ohne Pflanzen wieder, in welches nasser Zellstoff gelegt wurde. Die Messwerte des Kontrollgefäßes sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt (Versuchspflanze Mais).

Die Mittelwerte, der in Abbildung 7.4.2.13 für jedes einzelne Gefäß dargestellten Werte, sind in der Abbildung 7.4.2.14 dargestellt. Diese Darstellung ist mit den Abbildungen 7.4.2.6 und 7.4.2.10 vergleichbar.

Die Tabelle 7.4.2.1 enthält die Gesamtmittelwerte der auf die Transpirationsrate bezogenen Lachgasemissionen der jeweiligen lachgasangereicherten Varianten und des Kontrollgefäßes auf Tag und Nacht aufgesplittet, sowohl für die originalen als auch für die mit den beiden Faktoren korrigierten Werte. Während die Mittelwerte ohne Korrektur für die Variante mit Lachgasanreicherung mit Luftpolster nachts gering negativ waren, lagen die Mittelwerte der Lachgasemissionen aller Varianten und der Kontrolle nach den Korrekturen für zu hohe Luftfeuchtigkeit in den Messproben sowohl an den beiden Versuchstagen als auch in der Nacht im Negativen.

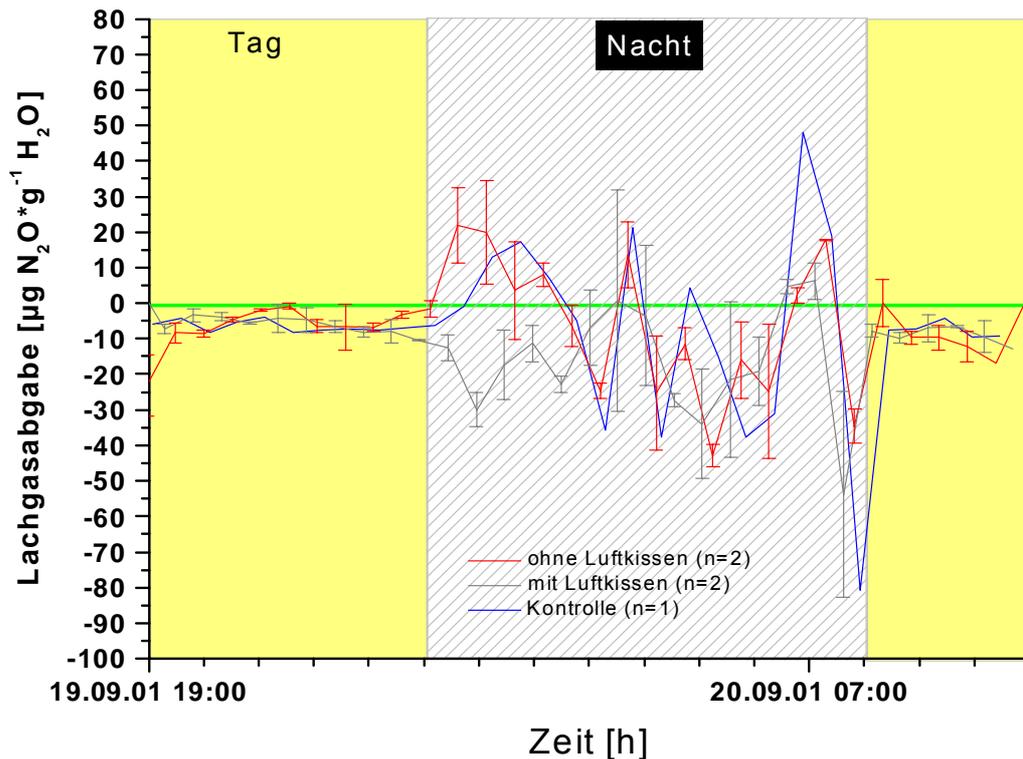


Abb. 7.4.2.14: Mittelwerte der auf die transpierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe mit den dazugehörigen Standardfehlern der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung. Verwendeter Korrekturfaktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$. Die Kurve ohne Standardfehler gibt den Verlauf für das Kontrollgefäß wieder. Um die Ergebnisse mit den nachfolgenden Darstellungen vergleichen zu können, ist bei null eine durchgehende Linie eingezeichnet (Versuchspflanze Mais).

Tab. 7.4.2.1: Tages- und Nachtmittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge ohne Korrektur für außerhalb des Kalibrationsbereiches liegende Luftfeuchtigkeit und für zwei ermittelte Korrekturfaktoren. Negative Werte bedeuten eine Lachgasaufnahme (Versuchspflanze Mais).

		Kontrolle ohne Anreicherung Lachgasabgabe [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	ohne Luftkissen Lachgasabgabe [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]	mit Luftkissen Lachgasabgabe [$\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$]
ohne Luftfeuchtekorrektur	Tag 1	9,54	10,509	10,464
	Nacht	8,46	9,784	-0,184
	Tag 2	8,775	8,369	8,201
Korrekturfaktor $1,3E^{-5}$	Tag 1	-3,732	-2,419	-3,078
	Nacht	-4,631	-2,147	-13,018
	Tag 2	-4,643	-10,596	-5,206
Korrekturfaktor $1,6 E^{-5}$	Tag 1	-6,43363636	-6,54	-5,09
	Nacht	-7,630625	-6,1721875	-16,018
	Tag 2	-7,6425	-12,14625	-8,206

7.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Obwohl der in Kap 7.4.2 dargestellte Versuch mit zwei Kontrollgefäßen, vier Wiederholungen mit Lachgasanreicherung und mit Luftkissen im Wurzelkompartiment und vier Wiederholungen mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelkompartiment konzipiert war, konnten wegen nach und nach auftretender Undichtigkeiten einiger Versuchsgefäße nur ein Kontrollgefäß, zwei Wiederholungen mit Lachgasanreicherung und mit Luftkissen im Wurzelkompartiment und zwei Wiederholungen mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelkompartiment ausgewertet werden.

Die Tabellen 7.4.1.1 und 7.4.2.1 fassen die gesamten in den Kapiteln 7.4.1 und 7.4.2 dargestellten Ergebnisse zu Tages- und Nachtmittelwerten der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemission zusammen. Aus diesen Tabellen lassen sich zum Teil zahlenmäßige Unterschiede bezüglich der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemission erkennen. Nach den Korrekturen für überhöhte Luftfeuchtigkeit in den Messproben sind die errechneten mittleren Emissionswerte jedoch bis auf eine Ausnahme in Tabelle 7.4.1.1 (in „Nacht 3“ bei der Behandlung ohne Luftkissen) alle negativ. Die negativen Lachgasemissionen werden als Lachgasassimilation (Lachgasaufnahme) interpretiert. Da die Lachgasassimilation vermutlich nicht an die Transpirationsrate gekoppelt ist, erscheint der absolute Vergleich der korrigierten Messwerte unter diesen Umständen nicht sinnvoll. Als Bezugsbasis für die Lachgasaufnahme käme viel eher die Blattfläche, das Sprossfrisch- oder –Sprosstrockengewicht in Betracht. Diese Kennzahlen wurden allerdings nicht sofort nach der Beendigung der in diesem Kapitel dargestellten Versuche ermittelt, da die Versuchspflanzen dadurch zerstört worden und somit nicht mehr für nachfolgende Experimente verwendbar gewesen wären.

Für ein besseres Verständnis der Ergebnisse und zur eindeutigen Klärung der Zusammenhänge sind in den Tabelle 8.5.1 und 8.5.2 die gemessenen Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes und die damit errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Varianten für die in Kapitel 7.4 beschriebenen Versuche dargestellt. Die Errechnung

von Emissionskoeffizienten wurde wegen der beobachteten Lachgasaufnahme unterlassen.

Die Berechnung der in den Tabellen 8.5.1 und 8.5.2 wiedergegebenen Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Varianten wurde, da die Konzentrationen nicht direkt gemessen werden konnten, unter folgenden idealisierten Prämissen rein mathematisch, ohne Zuhilfenahme der Gasgesetze bestimmt:

- Es lag ein gasdichtes, abgeschlossenes Kreislaufsystem vor.
- Gesamtvolumen der Lachgasanreicherungskreisläufe und der Wurzelkompartimente betrug während der gesamten Versuchsdauer 35 l.

Die zur Anreicherung verwendeten Lachgasmengen sind in den Tabellen angegeben.

Gemessene Werte wurden in den unten stehenden Tabellen **fett** dargestellt. Die *errechneten Werte* wurden *kursiv* wiedergegeben.

Tab. 7.5.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße für den Versuchszeitraum 14.09.01-17.09.01 (Versuchspflanze Mais).

Zeitpunkt der Lachgasmes- sung	N₂O- Konzentration gemessen [mg*m⁻³]		<i>Verhältnis N₂O in H₂O zu N₂O in Luft</i>	<i>N₂O- Konzentration in Nährlösung errechnet [mg N₂O*l⁻¹ H₂O]</i>	N₂O- Konzentration in Luft gemessen [mg N₂O*l⁻¹]
13.9.01 22:07	14773	480ml N ₂ O	<i>1,783</i>	<i>26,338</i>	14,773
14.9.01 10:11	382,31			<i>0,682</i>	0,382
14.9.01 11:03	13781	240ml N ₂ O		<i>24,569</i>	13,781
17.9.01 15:00	60			<i>0,107</i>	0,06

Tab. 7.5.2: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße für den Versuchszeitraum 19.09.01-20.09.01 (Versuchspflanze Mais).

Zeitpunkt der Lachgasmes- sung	N₂O- Konzentration gemessen [mg*m⁻³]		<i>Verhältnis N₂O in H₂O zu N₂O in Luft</i>	<i>N₂O- Konzentration in Nährlösung errechnet [mg N₂O*l⁻¹ H₂O]</i>	N₂O- Konzentration in Luft gemessen [mg N₂O*l⁻¹]
19.9.01 17:52	11234	480ml N ₂ O	2,36	27,644	11,713
20.9.01 10:58	1055,7			2,492	1,056

Für die Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung, deren Wurzelkompartimente mit Außenluft belüftet wurden, konnte als Mindestkonzentration für Lachgas im Wurzelraum die ambiente Lachgaskonzentration angenommen werden. Da die durchschnittliche Lachgaskonzentration in der Außenluft während des Versuchszeitraums 0,592 mg*m⁻³ betrug, ergab sich die mindestens in der Nährlösung zu erwartende Lachgaskonzentration zu 0,592*E⁻³ mg N₂O* l⁻¹ Nährlösung. Obwohl die Lachgaskonzentration in der Nährlösung der Gefäße mit Lachgasanreicherung im Wurzelkompartiment zu Beginn der Versuche jeweils etwa 6250-fach höher war als die angenommene Lachgaskonzentration im Wurzelraum der Kontrollgefäße, gab es vergleichsweise nur geringe Unterschiede zwischen den Lachgasemissionen / Lachgasaufnahmen. Teilweise lagen die Werte der Kontrollen sogar über denen der Gefäße mit Lachgasanreicherung. Diese Ergebnisse stimmen mit denen von LENS & CHALAMET (1981) und GRUNDMANN et al. (1993) überein, die ebenfalls Lachgasaufnahme durch die Sprosse von Mais experimentell nachgewiesen haben.

Die erhöhte Oszillation der Lachgasemission bzw. Lachgasaufnahme bezogen auf die transpierte Wassermenge bei ausgeschalteter Beleuchtung (Abb. 7.4.1.5, 7.4.1.6, 7.4.1.9, 7.4.1.10, 7.4.1.13, 7.4.1.14, 7.4.2.5, 7.4.2.6, 7.4.2.9, 7.4.2.10, 7.4.2.13, 7.4.2.14) weist darauf hin, dass die Aufnahme und die damit eventuell verbundene Metabolisierung von Lachgas durch Maispflanzen bei laufender Photosynthese effektiver zu sein scheint. Dennoch waren die beobachteten Lachgasaufnahmeleistungen pro Versuchsgefäß ([N₂O*min⁻¹]), die im Sprosskompartiment gemessen wurden, in der Nacht tendenziell höher als am Tag.

Der Grund hierfür könnte eine geringere Lachgasnachlieferung aus dem Wurzelraum sein, die durch die verminderte nächtliche Transpiration bedingt sein könnte.

Eine Unterscheidung der beiden verschiedenen lachgasangereicherten Varianten mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum war nicht eindeutig möglich. Über den gesamten in Kapitel 7.4.2 betrachteten Versuchszeitraum kumuliert, zeigte die lachgasbehandelte Variante mit Luftkissen im Wurzelraum nach einer Feuchtekorrektur der Lachgasmesswerte mit dem Faktor $1,6E^{-5} (\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\mu\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ die höchste Lachgasaufnahme. Die zweithöchste kumulierte Lachgasaufnahme wurde bei der Variante mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelkompartiment gefunden. Die Kontrolle zeigte die geringste kumulierte Lachgasaufnahme. Bei dem Ergebnis für die Kontrolle muss jedoch berücksichtigt werden, dass hierfür keine Wiederholung zur Verfügung stand.

Diese Ergebnisse waren im Vergleich zu denen mit Sonnenblume (Kap 4 u. 5) und Gerste (Kap. 6) - die neben Lachgasaufnahme auch Lachgasemission zeigten – vor allem deshalb überraschend, weil die Lachgaskonzentration im Wurzelraum bei allen Versuchen mit den drei verschiedenen Pflanzenarten in ähnlichem Umfang auf ca. $13000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes erhöht wurde.

Für eine zweifelsfreie Überprüfung, ob sich Maispflanzen mit Luftkissen im Wurzelraum bezüglich der Lachgasemission bzw. Lachgasaufnahme anders verhalten als Maispflanzen ohne Luftkissen im Wurzelraum, wären weitere Versuche nötig.

Durch den hier vorliegenden Versuchsaufbau war es nicht möglich, eindeutig herauszufinden, ob Mais in der Lage ist, Lachgas über die Wurzeln aufzunehmen. Wegen der in der Nährlösung während aller Versuchszeiträume zu beobachtenden Abnahme der Lachgaskonzentration ist jedoch anzunehmen, dass Mais Lachgas mit den Wurzeln aufnimmt und metabolisiert. Diese Annahme ließe sich mit der Verwendung von ^{15}N markiertem Lachgas eindeutig klären.

Da bei der Betrachtung der Messwerte ohne Lachgaskorrektur nur geringe Lachgasemissionsunterschiede zwischen den Kontrollen und den Gefäßen mit Lachgasanreicherung im Wurzelraum gefunden wurden, und weil nach der Anwendung des höchsten Feuchtekorrekturfaktors auf Lachgasaufnahme durch die

Maispflanzen geschlossen werden konnte, wurden die Versuchspflanzen nicht auf aerenchymatische Gewebe untersucht. Zusätzlich schien es wegen der aeroben Kulturführung im Wurzelraum als ausgeschlossen, dass die verwendeten Versuchspflanzen Aerenchyme gebildet hatten.

Aus den vorliegenden Ergebnissen wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Maispflanzen nehmen mit dem Spross Lachgas aus der Atmosphäre auf.
- Maispflanzen zeigen in der Nacht (Dunkelheit) tendenziell eine höhere Lachgasaufnahme als am Tag (Licht).
- Maispflanzen emittieren im Wurzelraum befindliches Lachgas (unabhängig, ob es gasförmig oder in Wasser gelöst vorliegt) nicht über den Spross in die Atmosphäre.
- Die im Spross stattfindende Lachgasaufnahme von Maispflanzen ist nahezu unabhängig von der im Wurzelraum herrschenden Lachgaskonzentration und der Form (gasförmig oder in Wasser gelöst) in der Lachgas im Wurzelraum vorliegt.

Kapitel 8.

EXPERIMENTE MIT REIS

8.1 Zusammenfassung

Zur Lachgasabgabe durch Reispflanzen haben MOSIER et al. (1990) vergleichende Untersuchungen im Feld und im Labor durchgeführt. Sie fanden in Parzellen bzw. Töpfen, die mit Reis bepflanzt waren, im Vergleich zu Kontrollparzellen / -töpfen ohne Pflanzen höhere Lachgasemissionen. Die höheren Emissionen wurden einem leichteren Lachgasaustritt aus dem Boden in die Atmosphäre durch die Reisaerenchyme zugeschrieben. Ein direkter Nachweis der Beteiligung der Aerenchyme der Reispflanzen wurde durch den verwendeten Versuchsaufbau nicht erreicht. Um den Einfluss von Reispflanzen und deren Aerenchyme auf die Emission im Wurzelraum befindlichen Lachgases zu überprüfen, wurden Reispflanzen in einem kontrolliert offenen System angezogen. Die Pflanzen wurden auf Nährlösung kultiviert. Dadurch konnten bodenbedingte Einflüsse ausgeschlossen werden. Es wurden zwei Versuchsvarianten (mit und ohne Luftpolster im Wurzelraum), deren Wuchsmedium mit N_2O angereichert wurde, und eine Kontrollvariante ohne N_2O -Anreicherung angelegt. Die Sprosskompartimente wurden mit einer konstanten Menge Außenluft versorgt, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit CO_2 zu gewährleisten und um überschüssige Luftfeuchtigkeit zu entfernen. Veränderungen der N_2O -Konzentrationen zwischen Ein- und Ausgang der Sprosskompartimente wurden kontinuierlich gemessen. Bei eingeschaltetem Licht (Tag) wurde bei den Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung im Vergleich zu den Gefäßen ohne Lachgasanreicherung eine erhöhte Lachgasemission gefunden. Nachts wurden nicht immer Unterschiede zwischen Kontrollen und Gefäßen mit Lachgasanreicherung gefunden. Tendenziell zeigten die Gefäße mit Lachgasanreicherung und Luftpolster im Wurzelkompartiment in den entsprechenden Versuchen die höchsten Lachgasemissionen. Bei ausgeschalteter Beleuchtung (Nacht) waren die N_2O -Emissionen durch die Pflanzen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung deutlich geringer als am Tage. Die Kontrollen ohne Lachgasanreicherung zeigten jedoch bezogen auf die Lachgasemissionen nur gering ausgeprägte diurnale Rhythmen. Aus den Ergebnissen wurde geschlossen, dass Reis in Wasser gelöstes und / oder gasförmig im Wurzelraum vorkommendes N_2O

über die Wurzel aufnehmen kann, mit dem Transpirationsstrom in die Blätter transportiert und nach und nach am Tag über die geöffneten Stomata abgibt. Aus den geringeren Lachgasemissionen und den niedrigeren Emissionskoeffizienten bei Dunkelheit (Nacht) im Vergleich zu den Werten bei eingeschaltetem Licht (Tag) wurde geschlossen, dass die Aerenchyme der Reispflanzen, wenn überhaupt, in nur sehr geringem Maße zum Lachgastransport aus dem Wurzelraum in die den Spross mit anschließender Lachgasemission in die umgebende Atmosphäre beitragen.

8.2 Einleitung

Bezüglich Reis wird im Zusammenhang mit klimarelevanten Gasen häufig eine über die Aerenchyme der Reispflanzen vermittelte Methanemission beschrieben (u. a. CICERONE & SHETER, 1981; SEILER et al., 1984; SCHÜTZ et al., 1989; BUTTERBACH-BAHL, 1993). Da Methan sehr schlecht wasserlöslich ist, müsste die Emission von gut wasserlöslichen klimarelevanten Gasen - wie Kohlenstoffdioxid und Lachgas, aufgrund der besseren Nachlieferung in wässriger Lösung an die Reiwurzeln - absolut zur Konzentration in der Bodenlösung höher sein als bei Methan. Zur Lachgasabgabe durch Reispflanzen haben MOSIER et al. (1990) vergleichende Untersuchungen im Feld und im Labor durchgeführt. Sie fanden in Parzellen bzw. Töpfen, die mit Reis bepflanzt waren, im Vergleich zu Kontrollparzellen / -töpfen ohne Pflanzen höhere Lachgasemissionen. Die höheren Emissionen wurden einem leichteren Lachgasaustritt aus dem Boden in die Atmosphäre durch die Reisaerenchyme zugeschrieben. Ein direkter Nachweis der Beteiligung der Aerenchyme der Reispflanzen wurde durch den verwendeten Versuchsaufbau nicht erreicht. Um den Einfluss von Reispflanzen und deren Aerenchyme auf die Emission im Wurzelraum befindlichen Lachgases zu überprüfen, wurden Versuche in einem kontrolliert offenen hydroponischen Kultursystem durchgeführt. Während der Versuchszeiträume wurde der Wurzelraum auf eine sehr hohe Lachgaskonzentration angereichert. Gasgefüllter Wurzelraum wurde durch die Etablierung eines Luftkissens im Wurzelraum simuliert.

8.3 Material und Methoden

Die Aussaat der Reispflanzen (*Oryza sativa* cv. 94D-22) erfolgte in Quarzsand. Es wurde eine tiefe Ablage des Saatgutes vorgenommen, um einen möglichst langen Halmheber zu bekommen. Das Saatgut wurde bei 25 °C unter einer Abdeckung aus Kunststoffolie zur Keimung gebracht. 41 Tage nach der Aussaat wurden die Pflanzen in ein kontrolliert offenes System umgepflanzt (Abb. 3.1.1) und auf eine vollständige Nährlösung gesetzt (Tab. 2.5.1). Der Versuchszeitraum der unten dargestellten Ergebnisse begann 80 Tage nach der Aussaat.

Die Vorkultur und der Versuch fanden bei einem Tag - / Nachtrhythmus von 16h / 8h statt. In jedem Kulturgefäß befanden sich zu Beginn fünf Pflanzen. Zum Versuchszeitpunkt war die Anzahl der Sprosse jedoch aufgrund regelmäßiger Abdichtungsmaßnahmen und dadurch verursachte Pflanzenverluste und unterschiedlich guter Bestockung in den einzelnen Gefäßen verschieden.

Beim Umpflanzen nach der Keimung wurden die Pflanzen in den Bohrungen der Mittelplatte durch ein Gemisch aus Optosil R (Fa. *Heraeus*) und Prestik (Fa. *Bostik*) fixiert. In der Regel wurde versucht den Übergang vom Wurzelkompartiment zum Sprosskompartiment mit dem Halmheber zu überbrücken. Wegen des fehlenden sekundären Dickenwachstums bei monokotylen Pflanzen und wegen der bei Getreidearten stattfindenden Bestockung war es nötig, die Pflanzen regelmäßig abzudichten. Dafür war das zur Fixierung verwendete Gemisch wegen zu hoher Viskosität ungeeignet. Paraffinwachs (Fa. *Fluka*) hatte sich in vorhergehenden Versuchen für die Abdichtung von Getreide nicht bewährt. Deshalb wurden die Reispflanzen regelmäßig mit Silikonkautschuk (Fa. *Thauer*, Dresden) abgedichtet (Abb. 8.3.1).



Abb. 8.3.1: Versuchsgefäß mit Reispflanzen (a.). Vergrößerte Aufnahme der Abdichtung der Reispflanzen mit Silikonkautschuk (Fa. Thauer, Dresden) (b.).

Während des **ersten Versuchszeitraums (19.01.2002 – 23(26).01.2002)** wurden eine Behandlung (**OLK**) und eine Kontrolle etabliert. Bei der Behandlung (**OLK**) wurde der Wurzelraum kontinuierlich mit lachgasangereicherter Nährlösung in einem Kreislaufsystem gespült. So konnte sichergestellt werden, dass es keine luftgefüllten Wurzelbereiche gab. Der Versorgungskreislauf der Behandlungen wurde unter Verwendung eines Ausgleichsgefäßes betrieben. In diesem Ausgleichsgefäß wurde sowohl die Lachgasanreicherung vorgenommen als auch die Messung der durch die Anreicherung im Luftpolster erzielten Lachgaskonzentration durchgeführt. Die Anreicherung wurde am 19.01.2002 zwischen 18:45 Uhr und 19:00 Uhr mit 480 ml reinem Lachgas bei 25 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Masse von 0,864g N₂O. Die erste Konzentrationsmessung im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes ergab 14988 mg N₂O *m⁻³. Die Kontrollbehandlung wurde im Wurzelraum kontinuierlich mit Außenluft versorgt. Es wurden drei Kontrollgefäße und sieben Gefäße für die Lachgasanreicherung verwendet.

Die Ergebnisse des **ersten Versuchszeitraums** sind in **Kapitel 8.4.1** dargestellt.

Im **zweiten (26.01.2002 – 27.01.2002)** und im **dritten (31.01.2002 – 07.02.2002) Versuchszeitraum** wurden zwei unterschiedliche Behandlungen und eine Kontrolle etabliert. Bei der Behandlung ohne Luftkissen im Wurzelkompartiment (**OLK**) wurde

der Wurzelraum kontinuierlich mit lachgasangereicherter Nährlösung in einem Kreislaufsystem gespült. Die zweite Variante hatte ein Luftkissen im Wurzelraum (**MLK**). Das Luftkissen im Wurzelkompartiment hatte zu Beginn des Versuchs ein Volumen von 150ml, wobei es sich wegen des pflanzlichen Wasserverbrauchs während des Versuchsverlaufes kontinuierlich vergrößerte. Die Lachgasanreicherung der Behandlung mit Luftkissen im Wurzelkompartiment (**MLK**) wurde mit einem kontinuierlichen Luftstrom lachgasangereicherter Luft vorgenommen, der in einem Kreislauf geführt wurde. Beide Anreicherungskreisläufe (Wasserkreislauf und Luftkreislauf) mündeten in ein gemeinsames Ausgleichsgefäß. Dieses Ausgleichsgefäß diente auch zur Bestimmung der in den Wurzelkompartimenten erzielten Lachgasanreicherung.

Die Kontrollbehandlung wurde im Wurzelraum kontinuierlich mit Außenluft versorgt.

Die Lachgasanreicherung innerhalb des **zweiten Versuchszeitraums (26.01.2002 – 27.01.2002)** wurde am 26.01.2002 zwischen 17:15 Uhr und 17:30 Uhr mit 480 ml reinem Lachgas bei 25 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Masse von 0,864g N₂O. Die erste Konzentrationsmessung im Luftpolster des Ausgleichgefäßes ergab 12326 mg N₂O *m⁻³. Die Kontrolle umfasste drei Gefäße, die Behandlung OLK fünf Gefäße und die Behandlung MLK zwei Gefäße.

Während des **dritten Versuchszeitraums (31.01.2002 – 07.02.2002)** wurde am 01.02.2002 zwischen 16:00 Uhr und 16:15 Uhr eine Anreicherung mit 480 ml reinem Lachgas bei 25 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Masse von 0,864g N₂O. Die erste Konzentrationsmessung im Luftpolster des Ausgleichgefäßes ergab 12429 mg N₂O *m⁻³. Die Kontrolle wurde in dreifacher, die Behandlung OLK in vierfacher und die Behandlung MLK ebenfalls in vierfacher Wiederholung durchgeführt.

Die Ergebnisse des zweiten und des dritten Versuchszeitraums sind in Kapitel 8.4.2 wiedergegeben.

Die Sprosskompartimente aller Versuchsgefäße wurden innerhalb der drei Versuchszeiträume und auch in den dazwischen liegenden Zeiträumen mit einem kontinuierlichen, auf die jeweiligen Erfordernisse eingestellten Strom von Außenluft versorgt. Die jeweiligen Wiederholungen wurden im Hinblick auf eine spätere statistische Einzelauswertung vor Versuchsbeginn zufällig einander zugeordnet.

Die Versorgungsintensität der Wurzelkompartimente lag bei insgesamt ca. $2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ für die jeweiligen Gefäße der Varianten und der Kontrolle. Eine gleichmäßige Verteilung der Umwälzungskapazität wurde mit Schlauchklemmen eingestellt. Die Belüftungsintensität der Hauben wurde individuell auf den Sprossbesatz der jeweiligen Gefäße mit Durchflussmessern (Fa. *Fischer & Porter*) angepasst. Sie lag zu Beginn der Versuche zwischen $3,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ und $7,6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ und an deren Ende zwischen $2,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ und $7,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Die in den Sprosskompartimenten eingestellten Belüftungsströme wurden so eingestellt, dass den Versuchspflanzen ausreichend CO_2 zugeführt und überschüssige Luftfeuchtigkeit abgeführt wurde.

Die Konzentrationen der Gase N_2O , CO_2 und H_2O wurden kontinuierlich an den Ausgängen der Sprosskompartimente mit Hilfe eines automatischen Probenahme- und Gasmesssystems bestimmt. Das Messsystem bestand aus einem Messstellenumschalter und einem photoakustischen Messgerät (Fa. *Innova AirTech Instruments*; vgl. Kap. 3 u. Abb. 3.1.1). Vor und nach der Messung der Konzentrationen innerhalb eines Sprosskompartimentes wurden die Gaskonzentrationen in der zur Belüftung verwendeten Außenluft gemessen, um eventuelle Konzentrationsunterschiede mit größtmöglicher Sicherheit erfassen zu können. Die Konzentrationen von N_2O , CO_2 und H_2O im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes wurden in regelmäßigen Abständen, jedoch diskontinuierlich, ebenfalls beprobt.

Bei den Gasmessungen innerhalb des dritten Versuchszeitraums (31.01.2002 – 07.02.2002) wurde zwischen dem Messstellenumschalter und dem Gasmessgerät ein sogenannter Naphionschlauch zwischengeschaltet. Der Naphionschlauch besteht aus einem semipermeablen Kunststoff. Dieser Kunststoff lässt vor allem den Übertritt von Wasser zu, ist aber für Lachgas und Kohlenstoffdioxid undurchlässig. Mit dem Naphionschlauch wurde eine gleichmäßige Luftfeuchtigkeit bei der Messung aller Proben erzielt. So konnte der befürchtete Einfluss von Luftfeuchtigkeitskonzentrationen, die eventuell außerhalb des Eichbereiches des verwendeten Gasmessgerätes liegen, ausgeschlossen werden.

8.4 Ergebnisse

8.4.1 Versuche ohne Luftkissen im Wurzelraum

Die Abbildung 8.4.1.1 enthält die Mittelwerte der Transpirationsraten mit den dazugehörigen Standardfehlern von zwei Kontrollgefäßen und acht Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und ohne Luftkissen im Wurzelraum. In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Kontrollen weniger transpirierten als die Gefäße mit Lachgasanreicherung. Während des gesamten Versuchszeitraums war ein diurnaler Rhythmus der Transpiration zu finden. Die Transpiration bei ausgeschalteter Beleuchtung (Nacht) betrug nur ca. 18% der Transpiration bei eingeschalteter Beleuchtung (Tag). Die Transpirationsrate reagierte sehr schnell auf das Ein- bzw. Ausschalten des Lichts.

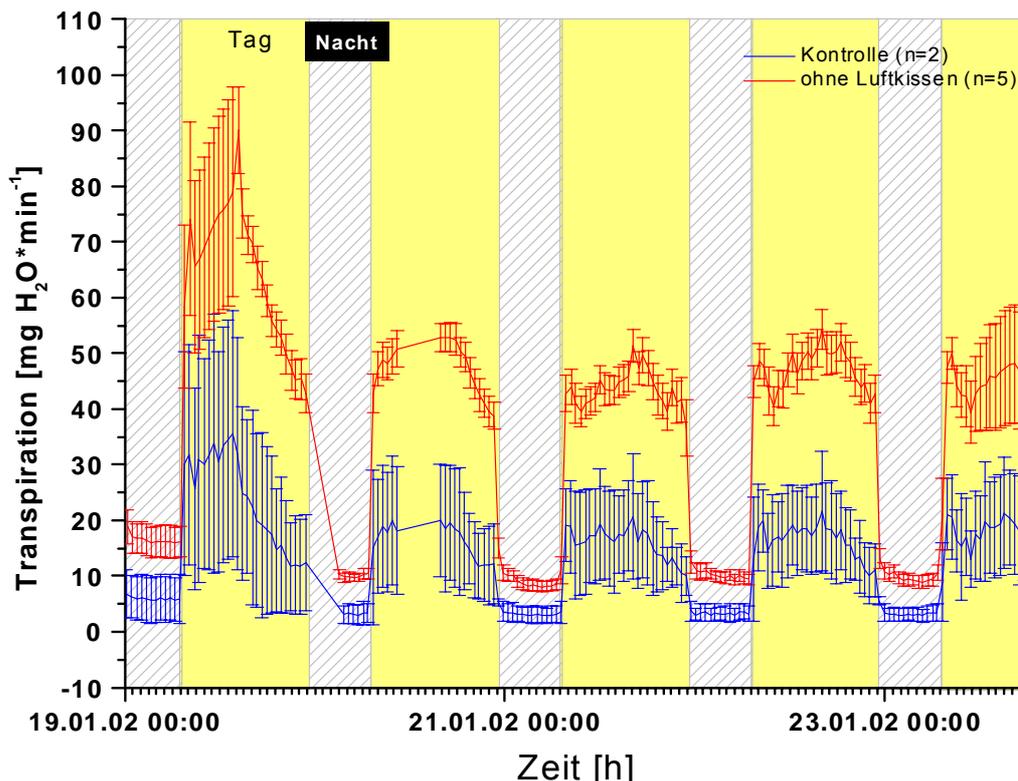


Abb. 8.4.1.1: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Transpirationsraten von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung (Versuchspflanze Reis).

Die gemessenen und mit der Belüftungsrate der Hauben bereinigten Lachgasemissionen der beiden Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und der fünf Gefäße mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelraum sind in der Abbildung 8.4.1.2 wiedergegeben. Es traten deutliche

Unterschiede zwischen den Kontrollen und den Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung auf. Die Unterschiede äußerten sich in deutlich höheren Lachgasemissionen der Versuchgefäße mit Lachgasanreicherung im Vergleich zu den Lachgasemissionen der beiden Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Wie schon zuvor bei der Transpiration wurde auch bei der belüftungsbereinigten Lachgasemission ein diurnaler Rhythmus festgestellt. Der diurnale Rhythmus war bei den Kontrollen deutlich geringer ausgeprägt als bei den Versuchgefäßen mit Lachgasanreicherung. Zusätzlich ist in der Abbildung 8.4.1.1 die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration mit der Skalierung auf der rechten Seite eingezeichnet.

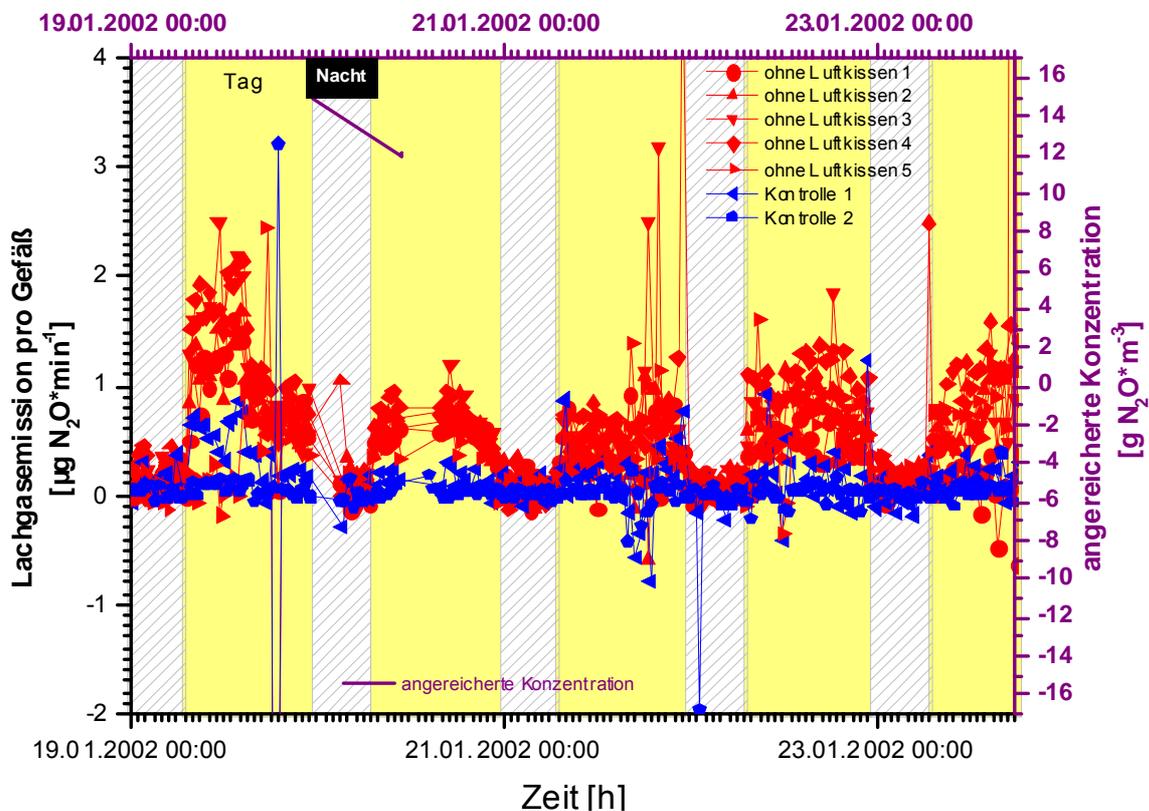


Abb. 8.4.1.2: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchgefäße (auf der linken Seite skaliert) und als Gerade ohne Symbole ist die Konzentration der Lachgasanreicherung im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (auf der rechten Seite skaliert) eingezeichnet (Versuchspflanze Reis).

Um die Unterschiede zwischen lachgasangereicherten Versuchgefäßen und Kontrollgefäßen deutlicher sehen zu können, sind in der Abbildung 8.4.1.2 die Mittelwerte mit deren zugehörigen Standardfehlern für die Kontrollen und die mit Lachgas angereicherten Behandlungen dargestellt. Wie schon in Abbildung 8.4.1.1 war ebenfalls in Abbildung 8.4.1.2 bei Tag ein ausgeprägter Unterschied zwischen den mit Lachgas angereicherten Gefäßen und den Kontrollen zu finden. In den

Nächten allerdings waren die Emissionsraten der Kontrollen und der lachgasbehandelten Versuchsgefäße nur in dem Zeitraum vom 22.01.2002 23:00 Uhr bis zum 23.01.2002 07:00 Uhr voneinander zu unterscheiden. Vor allem bei den Kontrollen konnte nachts teilweise Lachgasaufnahme gemessen werden.

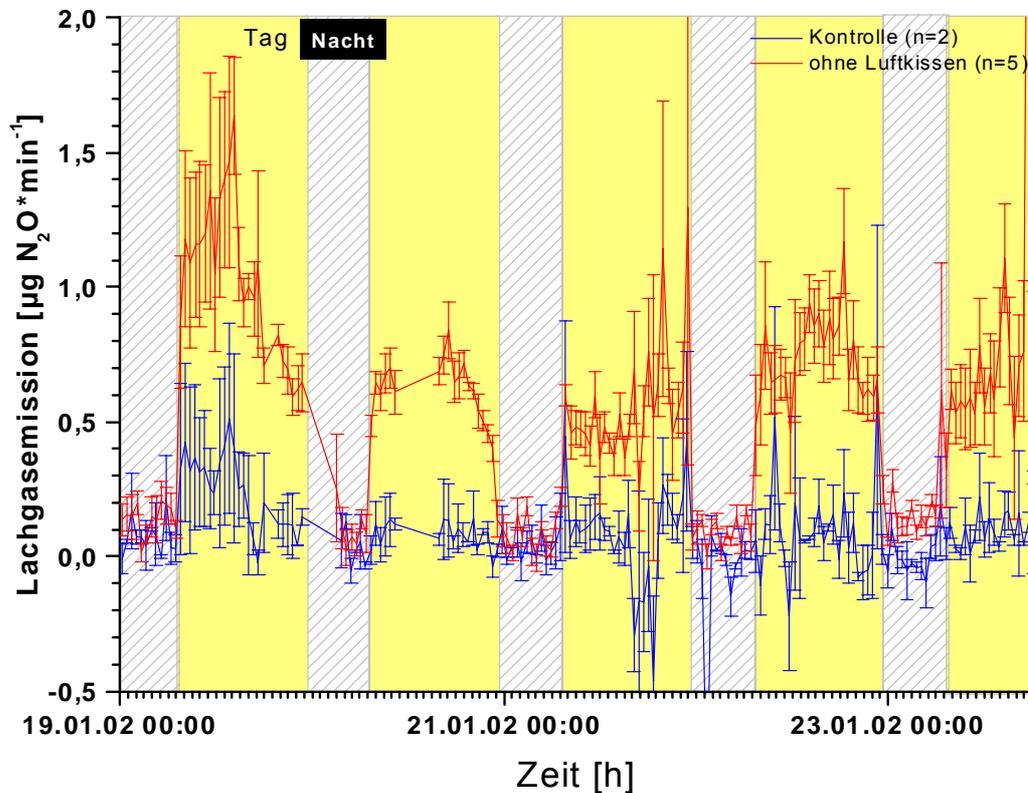


Abb. 8.4.1.3: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung (Versuchspflanze Reis).

Da die Transpirationsraten der Kontrollgefäße deutlich niedriger waren als die der Gefäße mit Lachgasanreicherung im Wurzelraum, gab erst die in der Abbildung 8.4.1.4 wiedergegebene Darstellung der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge endgültigen Aufschluss über Emissionsunterschiede zwischen den Versuchsgefäßen. In dieser Darstellungsweise zeigten sich am Tag Emissionsunterschiede. Zusätzlich war zu sehen, dass die auf die Transpirationsrate bezogenen Lachgasemissionen bei allen Versuchsgefäßen bei Nacht deutlich stärker oszillierten als am Tag. Durch die starke nächtliche Oszillation wurden Unterschiede zwischen den Gefäßen mit Lachgasanreicherung und den Kontrollgefäßen in der Grafik verwischt.

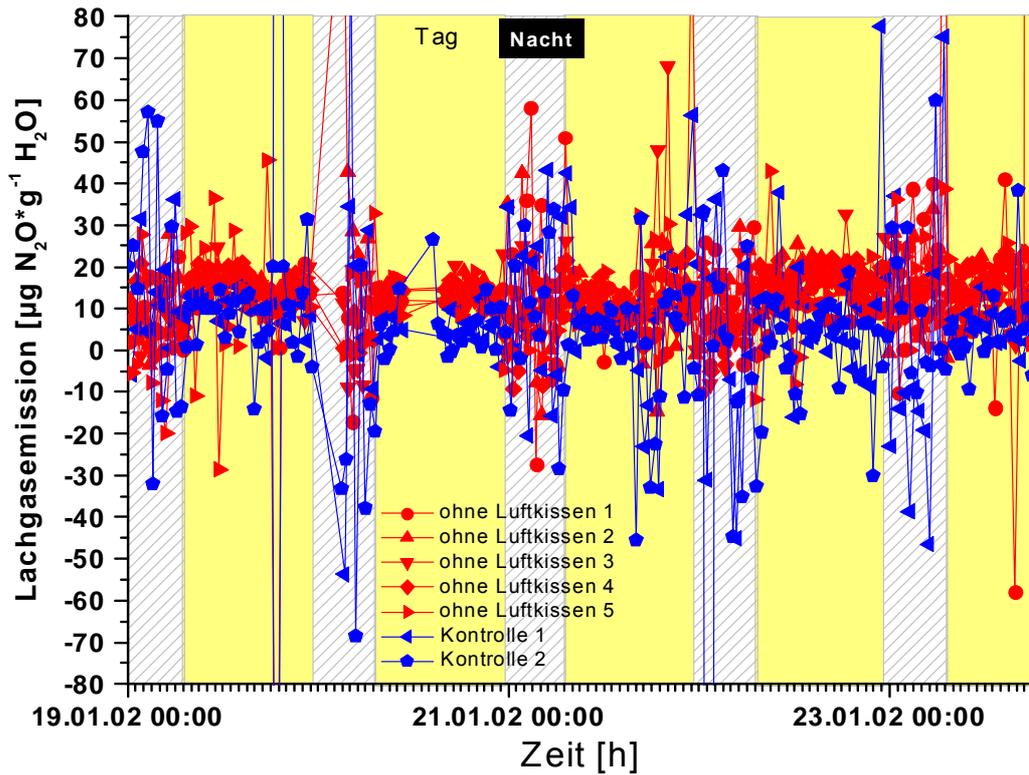


Abb. 8.4.1.4: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge (Versuchspflanze Reis).

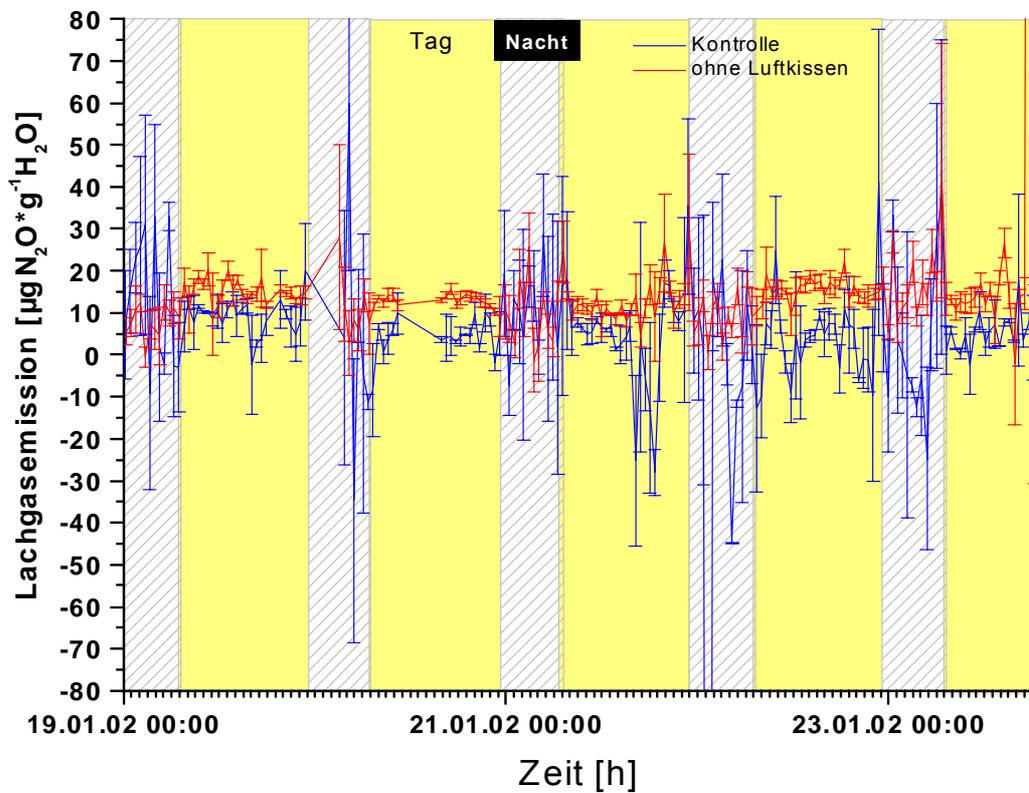


Abb. 8.4.1.5: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung (Versuchspflanze Reis).

Selbst in der grafischen Darstellung der Mittelwerte der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen konnten in der Nacht keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kontrollgefäßen und den Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung gefunden werden.

In Tabelle 8.4.1.1 sind die Gesamtmittelwerte der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße auf Tag und Nacht getrennt enthalten. Zusätzlich sind die über die zwei Kontrollgefäße und über die fünf Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung gebildeten Mittelwerte angegeben. Die Mittelwerte der Wiederholungen innerhalb der jeweiligen Behandlung (Kontrolle bzw. mit Lachgasanreicherung) zeigten bei den Mittelwerten für die Nacht sehr starke Unterschiede. Bei den Kontrollen war bezüglich der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasabgabe kein eindeutiger diurnaler Rhythmus zu erkennen. Die Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung hingegen zeigten an den betrachteten Tagen pro transpirierte Wassermenge höhere Lachgasemissionen als in den betrachteten Nächten.

Tab. 8.4.1.1: Für unterschiedliche Versuchsabschnitte errechnete Mittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpirierte Wassermenge. Es sind die Werte von zwei Kontrollgefäßen (Kont.) und fünf Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen der einzelnen unterschiedlichen Behandlungen wiedergegeben (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	Kont. 1 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	Kont. 2 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	Mittelwert Kont. µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	OLK 1 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	OLK 2 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	OLK 3 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	OLK 4 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	OLK 5 µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O	Mittelwert OLK µg N ₂ O*g ⁻¹ H ₂ O
19.1.02 6:57	11,524	14,026	12,775	6,601	11,253	7,49	10,331	4,282	7,992
19.1.02 17:55	10,193	6,87	8,531	13,538	15,887	16,612	17,061	13,62	15,344
19.1.02 22:47	8,026	8,96	8,446	14,919	14,36	13,118	15,131	14,885	14,483
20.1.02 6:43	12,653	-4,237	4,208	4,071	24,776	0,783	3,515	10,056	8,105
20.1.02 22:34	5,318	3,08	4,2	12,024	14,243	12,459	13,511	13,2406	13,095
21.1.02 6:28	10,543	9,103	9,822	15,189	10,574	10,331	3,476	7,97	9,508
21.1.02 22:54	9,246	0,922	5,084	11,133	11,019	14,342	15,727	13,892	13,222
22.1.02 6:48	3,791	-81,437	-38,823	10,181	11,906	7,126	6,156	9,202	8,914
22.1.02 22:40	7,982	-0,247	3,868	10,221	16,974	16,434	17,972	15,171	15,354
23.1.02 6:34	-2,433	10,45	4,008	16,099	14,2	13,728	25,607	18,518	17,63
23.1.02 22:25	6,680	5,023	5,852	113,681	14,564	11,441	16,829	15,669	34,437

8.4.2 Versuche mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum

Die Abbildung 8.4.2.1 zeigt die gemessenen und mit der Belüftungsintensität der Sprosskompartimente bereinigten Einzelwerte der Transpirationsrate:

- von zwei Versuchsgefäßen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung als Kontrollen,
- von drei Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung ohne Luftkissen im Wurzelraum und
- von zwei Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung mit Luftkissen im Wurzelraum.

Die beiden Kontrollgefäße zeigten deutlich niedrigere Transpirationsraten als die Gefäße mit Lachgasanreicherung. Die Unterschiede ergaben sich aus unterschiedlichen Sprossdichten in den Sprosskompartimenten der Kontrollen und der mit Lachgas angereicherten Gefäße.

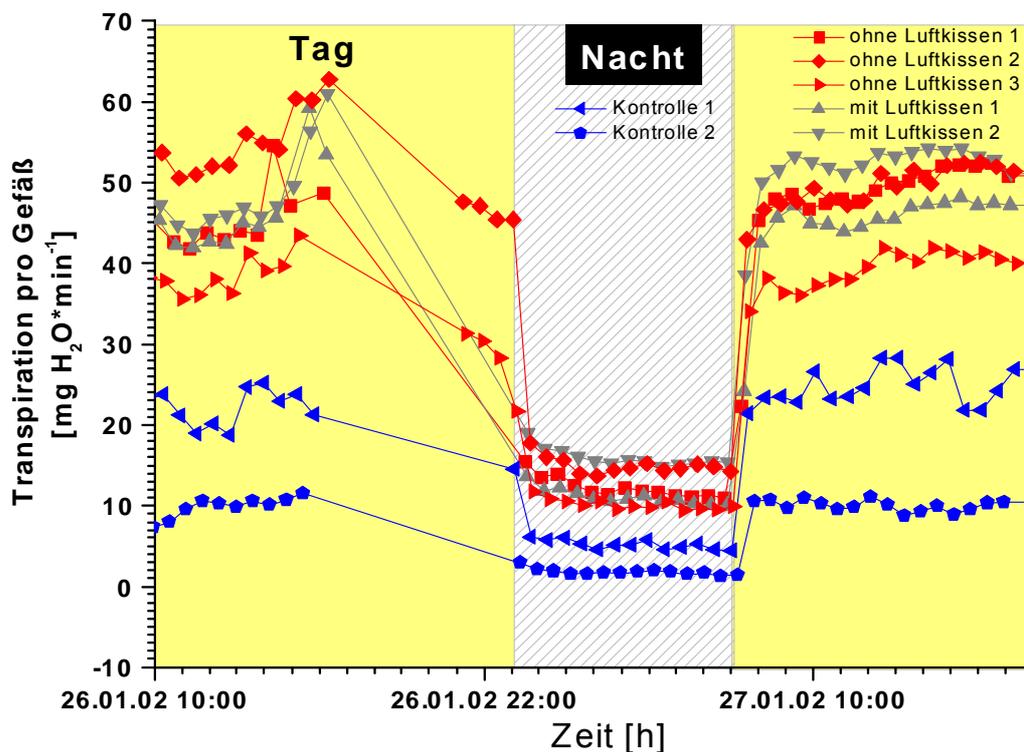


Abb. 8.4.2.1: Einzelwerte der Transpirationsrate von zwei Versuchsgefäßen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung als Kontrollen, von drei Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung ohne Luftkissen im Wurzelraum und von zwei Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung mit Luftkissen im Wurzelraum (Versuchspflanze Reis).

Bei allen Gefäßen wurde ein diurnaler Transpirationsrhythmus mit höheren Transpirationsraten am Tag und niedrigeren Transpirationsraten in der Nacht gefunden.

In der Abbildung 8.4.2.2 sind die Mittelwerte der Transpirationsraten der drei Varianten dargestellt. Die Mittelwerte der Transpirationsraten der beiden unterschiedlichen Behandlungen mit Lachgasanreicherung im Wurzelraum zeigten nur geringe Unterschiede untereinander. Doch sie unterschieden sich signifikant von den Mittelwerten der Gefäße ohne Lachgasanreicherung.

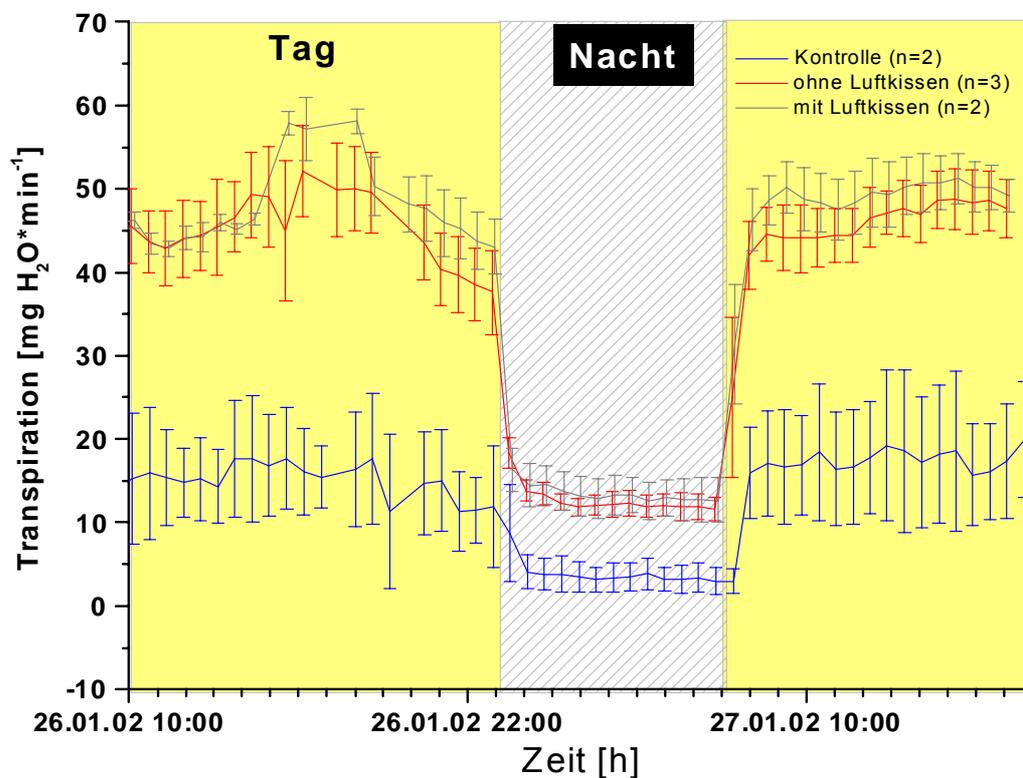


Abb. 8.4.2.2: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Transpirationsraten von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, drei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum (Versuchspflanze Reis).

Die mit der Belüftungsintensität der Sprosskompartimente bereinigten Einzelwerte der Lachgasemissionsraten aller Versuchsgefäße sind in der Abbildung 8.4.2.3 dargestellt. Zusätzlich sind die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessenen Lachgaskonzentrationen als Gerade ohne Symbole eingezeichnet und auf der rechten Seite skaliert. Die Lachgasemissionen der Gefäße ohne

Lachgasanreicherung zeigten nur geringe Unterschiede zwischen Tag und Nacht. Bei den Versuchsgefäßen mit Lachgasanreicherung hingegen konnten am Tag deutlich höhere Lachgasemissionen beobachtet werden als in der Nacht. Die lachgasbehandelten Varianten zeigten während der gesamten Versuchsdauer höhere Lachgasemissionen als die Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung. In der Tendenz zeigten die beiden Wiederholungen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und einem Luftkissen im Wurzelraum während der Nacht und am zweiten Versuchstag die höchsten Lachgasemissionen.

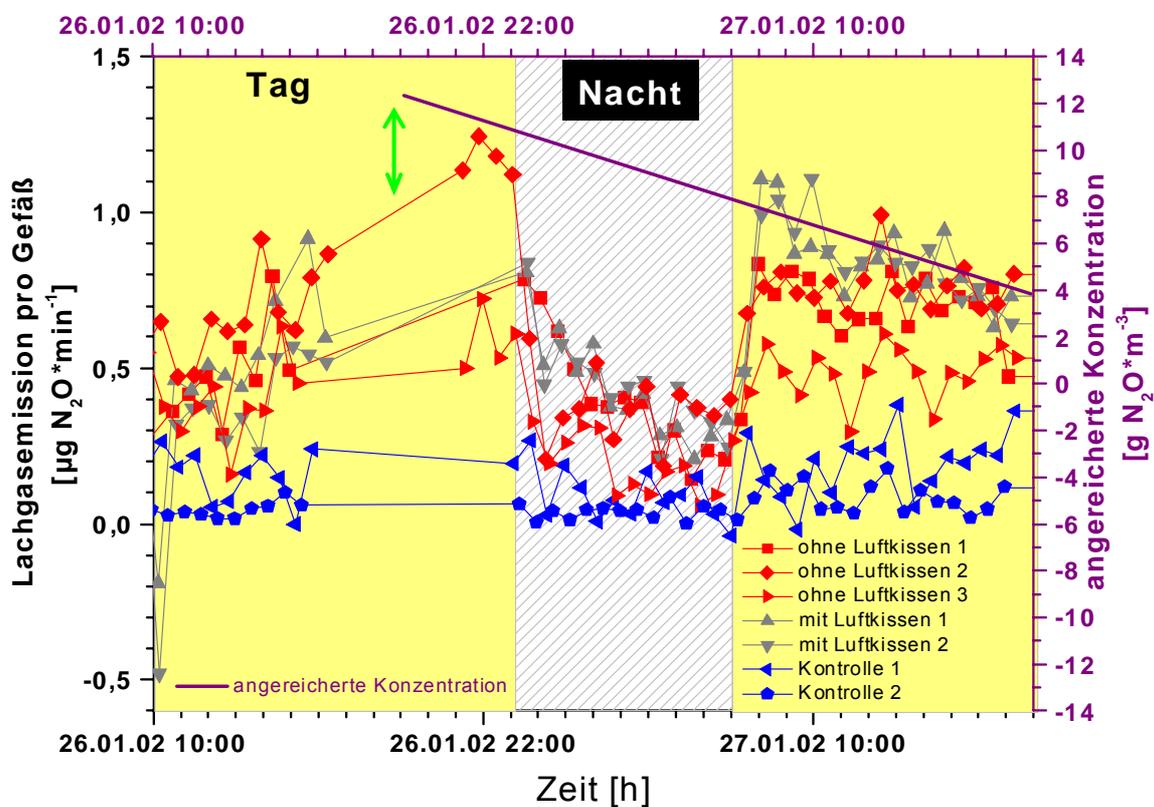


Abb. 8.4.2.3: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße (auf der linken Seite skaliert) und als Gerade ohne Symbole die Konzentration der Lachgasanreicherung im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (auf der rechten Seite skaliert). Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).

Die Unterschiede zwischen den beiden unterschiedlichen Behandlungen mit Lachgasanreicherung (mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum) wurden bei der Betrachtung der Mittelwerte mit den jeweils dazugehörigen Standardfehlern (Abb.

8.4.2.4) besser erkennbar. Nach der Lachgasanreicherung, die während des standardfehlerfreien Zeitraums (Abb. 8.4.2.4) durchgeführt wurde, zeigten die unterschiedlichen Varianten mit Lachgasanreicherung unterschiedlich hohe Lachgasemissionen.

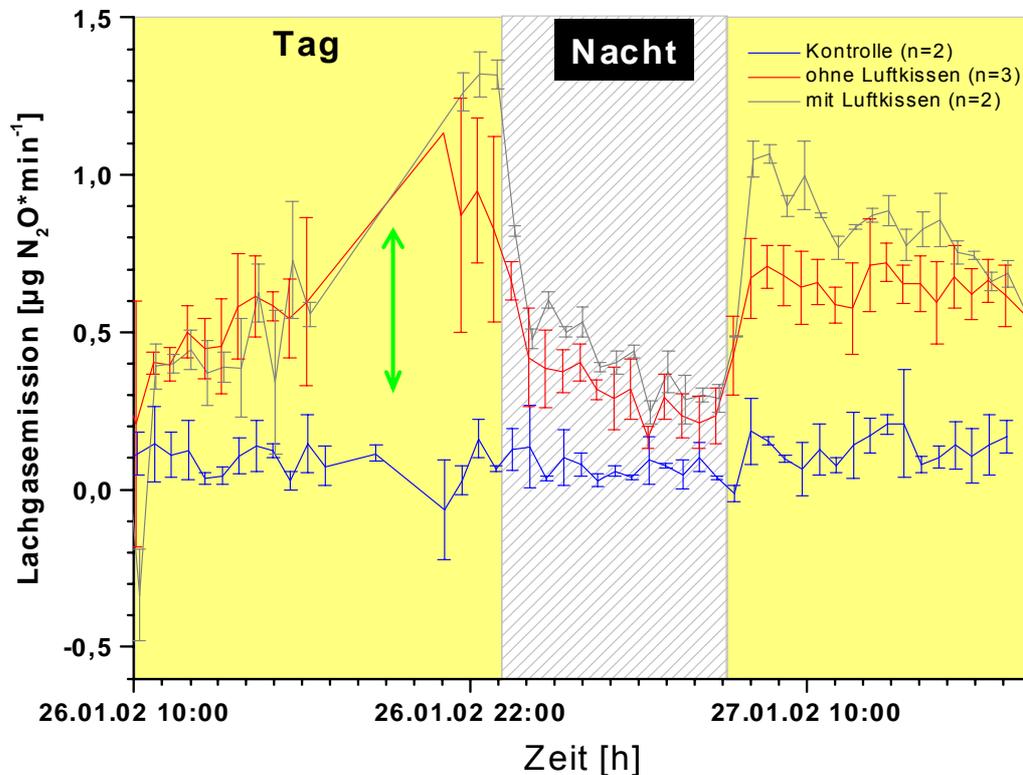


Abb. 8.4.2.4: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, drei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum. Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).

Ebenfalls gut zu erkennen ist in der Abbildung 8.4.2.4, dass die Kontrollgefäße bei den Lachgasemissionen keinen diurnalen Rhythmus zeigten.

Die Abbildung 8.4.2.5 enthält die auf die Transpirationsrate bezogenen Werte aller Versuchsgefäße. Bei den Kontrollgefäßen ohne Lachgasanreicherung im Wurzelraum zeigte sich nachts eine stärkere Oszillation der beobachteten Emissionen als am Tag. Dieser Unterschied war bei den Varianten mit Lachgasanreicherung nicht zu finden. Die Lachgasemissionen pro transpirierte Wassermenge stiegen bei den lachgasbehandelten Versuchsvarianten nach der Anreicherung deutlich an. Die auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen

der lachgasbehandelten Gefäße mit Luftkissen im Wurzelraum lagen tendenziell über denen der angereicherten Gefäße ohne Luftkissen im Wurzelraum.

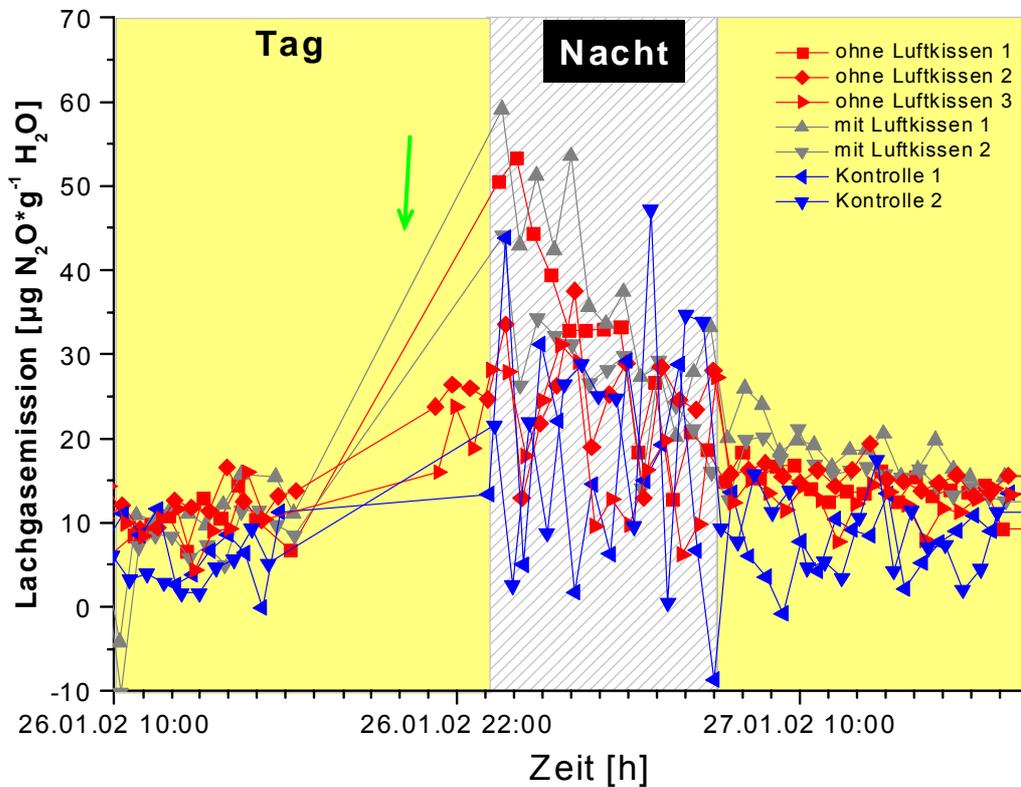


Abb. 8.4.2.5: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße bezogen auf die transpierte Wassermenge. Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).

Aus den Mittelwerten der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen der unterschiedlichen lachgasbehandelten Varianten und der Kontrollen ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung die in der Abbildung 8.4.2.5 dargestellt sind, konnten beständige Unterschiede zwischen allen unterschiedlichen Behandlungen nur für die Tagesperioden nach der Lachgasanreicherung gefunden werden.

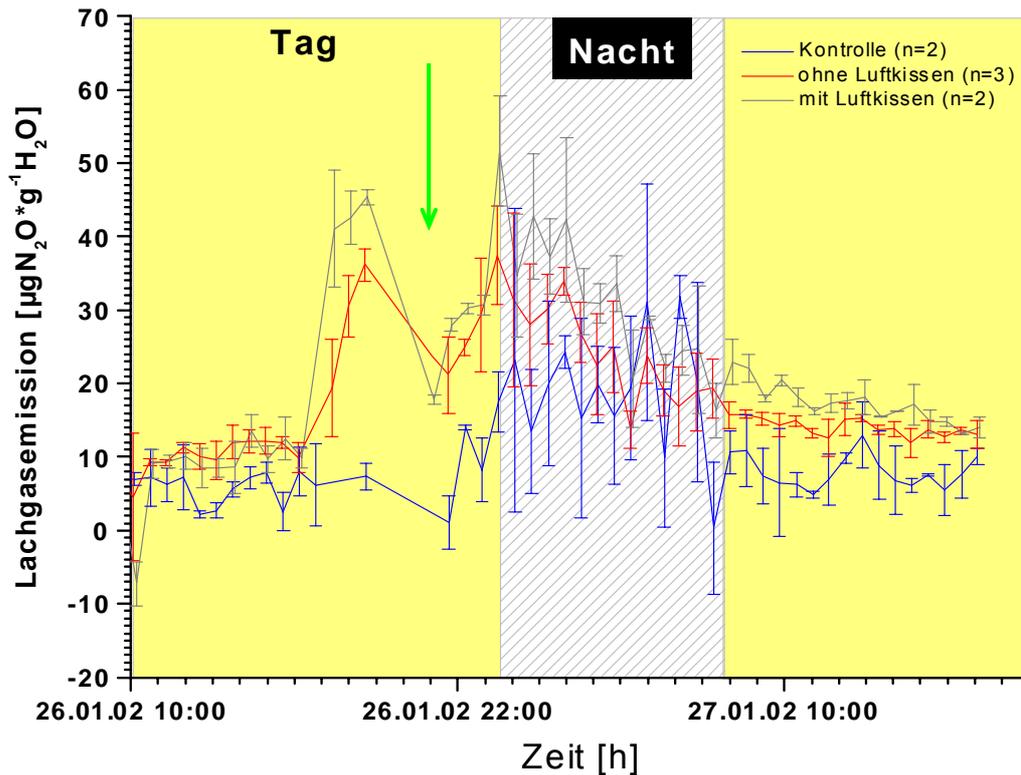


Abb. 8.4.2.6: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge von zwei Kontrollgefäßen und fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, drei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum. Der Pfeil hebt den Anreicherungszeitraum hervor (Versuchspflanze Reis).

Tab. 8.4.2.1: Für unterschiedliche Versuchsabschnitte errechnete Mittelwerte der Lachgasemissionen bezogen auf die transpierte Wassermenge. Es sind die Werte von zwei Kontrollgefäßen (Kont.), drei Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) und zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum (MLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen der einzelnen unterschiedlichen Behandlungen wiedergegeben (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	Kont. 1 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	Kont. 2 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	Mittelwert Kont. $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	OLK 1 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	OLK 2 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	OLK 3 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	Mittelwert OLK $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	MLK 1 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	MLK 2 $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	Mittelwert MLK $\mu\text{gN}_2\text{O}^* \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$
26.1.02 16:48	6,595	5,05	5,822	8,241	12,101	10,249	10,197	10,191	6,63632	8,41367
26.1.02 22:54	7,122	8,262	7,692	36,212	27,635	20,671	26,476	34,482	32,898	33,690
27.1.02 6:48	15,634	18,756	17,195	33,055	25,811	19,32	25,649	36,743	29,355	33,049
27.1.02 17:07	6,557	8,661	7,609	14,395	15,429	13,228	14,351	18,489	15,973	17,231

In Tabelle 8.4.2.1 sind die Gesamtmittelwerte der auf die Transpiration bezogenen Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße auf Tag und Nacht getrennt enthalten. Zusätzlich sind die über die beiden Kontrollgefäße, die über die drei Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und ohne Luftkissen im Wurzelbereich und die beiden Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung und mit Luftkissen im Wurzelbereich gebildeten Mittelwerte angegeben. Bei den Kontrollen war bezüglich der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen mittleren Lachgasabgabe ein eindeutiger diurnaler Rhythmus zu erkennen. Die Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung hingegen zeigten am zweiten Tag nach der Lachgasanreicherung geringere auf die transpirierte Wassermenge bezogene Lachgasemissionen als in der Nacht zuvor. Die Gefäße mit Luftkissen im Wurzelraum zeigten während des gesamten Versuchszeitraums höhere Gesamtmittel der Lachgasabgabe als die Gefäße ohne Luftkissen im Wurzelraum. Die Kontrolle zeigte durchgehend die geringsten Gesamtmittelwerte der auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasemission.

Die Ergebnisse eines weiteren, längeren Versuchsabschnittes mit ähnlichem Aufbau wie der zuvor besprochene Versuch (Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung($n=2$), Gefäße mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung mit ($n=2$) und ohne ($n=2$) Luftkissen im Wurzelkompartiment) sind in den Abbildungen 8.4.2.7 und 8.4.2.8 dargestellt.

Die Abbildung 8.4.2.7 enthält die mit den Belüftungsraten der Hauben bereinigten Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße. Als Kurve ohne Symbole ist die im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes gemessene Lachgaskonzentration eingezeichnet und auf der rechten Seite skaliert. Vor der Lachgasanreicherung lagen die Emissionen aller Versuchgefäße nahe beisammen. Auch nach der Lachgasanreicherung konnten bei den Lachgasemissionen der Kontrollgefäße keine diurnalen Unterschiede gefunden werden, während die Emissionen der Gefäße mit Lachgasanreicherung innerhalb des gesamten Versuchszeitraums nach der Lachgasanreicherung am Tag deutlich höher waren als in der Nacht. Die Lachgasemissionen der angereicherten Gefäße mit Luftpolster im Wurzelraum waren tendenziell höher als die Emissionen der angereicherten Gefäße ohne Luftpolster im Wurzelraum. Mit dem Rückgang der Lachgaskonzentration im Luftposter des

Ausgleichsgefäßes konnte ein Rückgang der Lachgasemissionen der Varianten mit Lachgasanreicherung festgestellt werden.

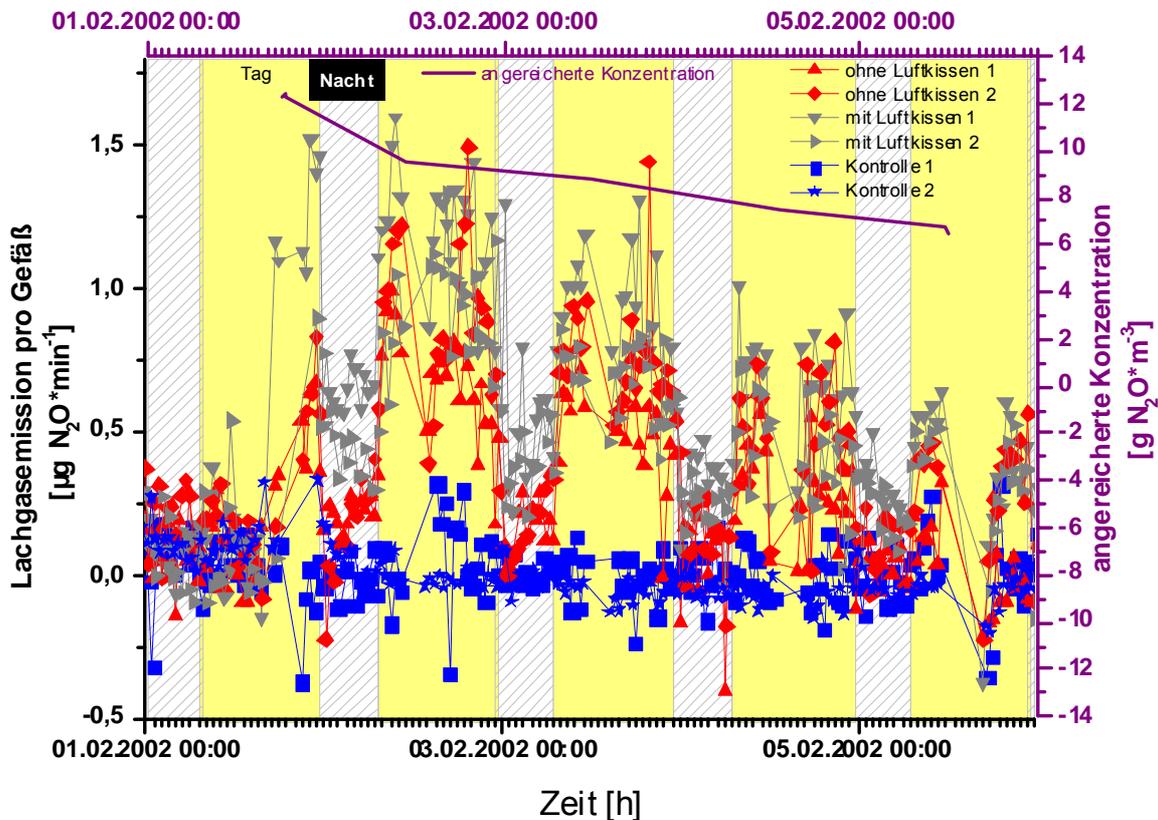


Abb. 8.4.2.7: Einzelwerte der Lachgasemissionen aller Versuchsgefäße (auf der linken Seite skaliert) und als Kurve ohne Symbole die Konzentration der Lachgasanreicherung im Luftpolster des verwendeten Ausgleichsgefäßes (auf der rechten Seite skaliert) (Versuchspflanze Reis).

In der Abbildung 8.4.2.7 sind die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardfehler der Lachgasemissionen der zwei Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung und von vier Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung dargestellt. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, zwei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum. Während der ersten 48 Stunden nach der Lachgasanreicherung waren deutliche Unterschiede zwischen allen unterschiedlichen Behandlungen zu erkennen. Diese verringerten sich mit zunehmender Versuchsdauer und der damit einhergehenden Abnahme der Lachgaskonzentration im Ausgleichsgefäß. Am Ende des Versuchszeitraumes konnten nur noch zwischen der Kontrollbehandlung und der lachgasangereicherten Behandlung mit Luftpolster im Wurzelraum eindeutige Unterschiede beobachtet

werden.

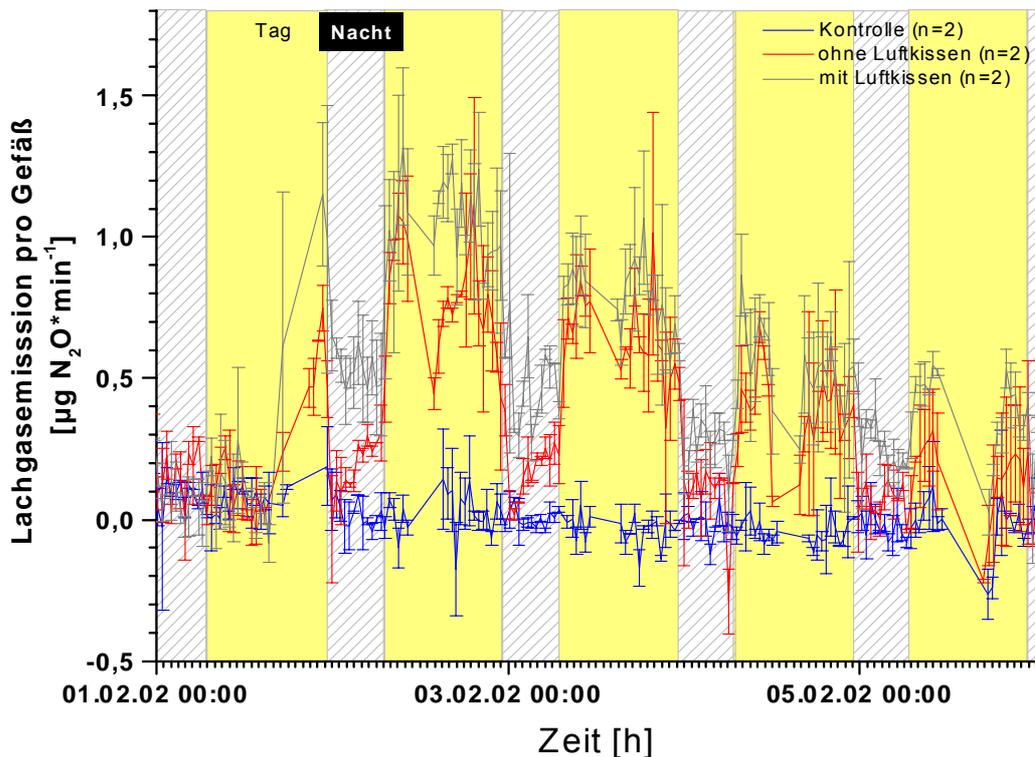


Abb. 8.4.2.8: Mittelwerte und dazugehörige Standardfehler der Lachgasemissionen von zwei Kontrollgefäßen und vier Gefäßen mit Lachgasanreicherung in der Nährlösung. Zwei Gefäße mit Lachgasanreicherung hatten ein Luftkissen im Wurzelraum, zwei Gefäße hatten nur Nährlösung im Wurzelraum (Versuchspflanze Reis).

Die Betrachtung der Ergebnisse des obigen Versuches bezogen auf die transpierte Wassermenge war leider nicht möglich, da bei diesem Versuch zwischen dem Messstellenumschalter und dem Gasmessgerät ein Naphionschlauch zur Trocknung der Proben eingebaut war.

Um zu überprüfen, ob die Reispflanzen Aerenchyme ausgebildet hatten, wurden am Ende der Versuche Wurzel- und Blattsschnitte mikroskopisch untersucht. Die in den Abbildungen 8.4.2.9 und 8.4.2.10 wiedergegebenen Bilder belegen eindeutig bei den verwendeten Versuchspflanzen das Vorhandensein sowohl von Wurzel- als auch von Blattaerenchymen.



Abb. 8.4.2.9: Repräsentative Auswahl mikroskopischer Schnitte durch Reiswurzeln unterschiedlichen Alters bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Die Wurzelaerenchyme (durch Pfeile ist jeweils beispielhaft ein Aerenchym markiert) sind gut ausgeprägt und gut zu erkennen.



Abb. 8.4.2.10: Repräsentative Auswahl mikroskopischer Schnitte durch Reisblätter bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Die Blattaerenchyme sind gut ausgeprägt und gut zu erkennen(durch Pfeile ist jeweils beispielhaft ein Aerenchym markiert).

8.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Der im zweiten Versuchszeitraum (26.01.02 – 27.01.02) durchgeführte Versuch wurde mit drei Kontrollgefäßen, fünf Gefäßen mit Lachgasanreicherung und ohne Luftpolster im Wurzelkompartiment und mit zwei Gefäßen mit Lachgasanreicherung und mit Luftpolster im Wurzelkompartiment durchgeführt. Da innerhalb der Auswertung Zweifel an der Dichtigkeit eines Kontrollgefäßes und eines Gefäßes mit Lachgasanreicherung und Luftpolster im Wurzelkompartiment auftraten, wurden diese Gefäße nicht in die Auswertung einbezogen. Bei der Auswertung eines dritten Versuchszeitraumes (31.01.02 bis zum 07.02.02) wurden von den jeweils vier Gefäßen mit Lachgasanreicherung im Wurzelkompartiment (mit und ohne Luftpolster) jeweils zwei ausgeschlossen, da nicht sichergestellt werden konnte, dass die Wurzelkompartimente dieser Gefäße innerhalb des gesamten Versuchszeitraumes dicht geblieben waren.

In den Tabellen 8.5.1- 8.5.3 sind die im Luftpolster des zur Lachgasanreicherung verwendeten Ausgleichsgefäßes gemessenen Lachgaskonzentrationen für die drei in Kapitel 8.4 vorgestellten Versuche dargestellt. Zusätzlich enthalten die Tabellen Angaben über den Zeitpunkt der Lachgasanreicherung, die zur Anreicherung verwendete Lachgasmenge und die aus den gemessenen Konzentrationen im Luftkissen des Ausgleichsgefäßes errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Gefäße. Die Lachgaskonzentrationen der angereicherten Nährlösung wurden unter folgenden Annahmen rein rechnerisch ermittelt:

- Das Anreicherungssystem war zum Zeitpunkt der Lachgasanreicherung und während des gesamten Versuchszeitraumes gasdicht.
- Der Versuchsaufbau hatte innerhalb des gesamten Versuchszeitraumes ein Gesamtvolumen von 35l (Summe des Nährlösungsvolumens, der Volumina der Luftkissen in den Wurzelkompartimenten und des Luftpolster des Ausgleichsgefäßes bezogen auf die Lachgasanreicherungskreisläufe).

Gemessene Werte wurden in den Tabellen **fett** dargestellt; *errechnete Werte* sind *kursiv* gedruckt.

Das in den unten stehenden Tabellen angegebene Verhältnis „N₂O in H₂O zu N₂O

in Luft“ wurde aus der ersten Messung der Lachgaskonzentration im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes und der daraus errechneten Anfangskonzentration von Lachgas in der angereicherten Nährlösung bestimmt. Dieses Verhältnis wurde dann zur Errechnung der späteren Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung nach folgender Formel verwendet:

$$\text{gemessene Lachgaskonzentration (im Luftpolster des Ausgleichsgefäßes)} \cdot \text{Verhältnis (N}_2\text{O in H}_2\text{O zu N}_2\text{O in Luft)} = \text{Konzentration in der Nährlösung}$$

Tab. 8.5.1: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den ersten Versuchszeitraum (19.01.02 – 26.01.02) (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	N ₂ O-Konzentration gemessen [mg*m ⁻³]	Verhältnis N ₂ O in H ₂ O zu N ₂ O in Luft	N ₂ O-Konzentration in Nährlösung errechnet [mg N ₂ O*l ⁻¹ H ₂ O]	N ₂ O-Konzentration in Luft gemessen [mg N ₂ O*l ⁻¹]
480ml Lachgas bei 25°C				
19.1.02 23:22	14988	1,755	26,302	14,988
20.1.02 10:59	12058		21,16	12,058
26.1.02 16:52	57,36		0,101	0,057

Im Ergebnisteil (Kap 8.4.1) sind von dem in Tabelle 8.5.1 dargestellten Versuchszeitraum nur die Daten bis zum 23.01.02 dargestellt, da aufgrund regelmäßig auftretender kurzzeitiger Undichtigkeiten eine interpretierbare Auswertung der zwischen dem 23.01.02 bis zum 26.01.02 erhaltenen Messwerte nicht möglich war.

Der starke Konzentrationsabfall in Bezug auf Lachgas, der in Tabelle 8.5.2 binnen 23 Stunden aufgetreten ist deutet auf Undichtigkeiten im Anreicherungs-system hin, da in den beiden anderen dargestellten Versuchszeiträumen (Tab. 8.5.1 und 8.5.3) in der Regel niedrigere tägliche Lachgasverluste aus dem Anreicherungs-system gefunden wurden. Da das Auftreten von Undichtigkeiten für den Versuchszeitraum vom 26.01.02 -27.01.02 (Tab. 8.5.2) wahrscheinlich ist und solche Undichtigkeiten häufig an dem Übergang Wurzel- zu Sprosskompartiment auftreten, sind die

Ergebnisse dieses Versuchszeitraumes vorsichtig zu interpretieren und verstärkt in Relation zu den beiden anderen vorgestellten Versuchszeiträumen zu betrachten (vgl. Tab 8.5.1 u. 8.5.3).

Tab. 8.5.2: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den zweiten Versuchszeitraum (26.01.02 – 27.01.02) (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	N ₂ O-Konzentration gemessen [mg*m ⁻³]	Verhältnis N ₂ O in H ₂ O zu N ₂ O in Luft	N ₂ O-Konzentration in Nährlösung errechnet [mg N ₂ O*l ⁻¹ H ₂ O]	N ₂ O-Konzentration in Luft gemessen [mg*l ⁻¹]
26.1.02 16:52	57,4		0,101	0,057
17:17 480 ml Lachgas bei 25°C				
26.1.02 19:08	12326	2,194	27,04	12,326
27.1.02 17:55	3840,4		8,425	3,84

Tab. 8.5.3: Gemessene Lachgaskonzentrationen im Luftpolster des für die Anreicherungsvarianten verwendeten Ausgleichsgefäßes und die daraus errechneten Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung der angereicherten Versuchsgefäße. Die Daten beziehen sich auf den dritten Versuchszeitraum (31.01.02 – 07.02.02) (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	N ₂ O-Konzentration gemessen [mg*m ⁻³]	Verhältnis N ₂ O in H ₂ O zu N ₂ O in Luft	N ₂ O-Konzentration in Nährlösung errechnet [mg N ₂ O*l ⁻¹ H ₂ O]	N ₂ O-Konzentration in Luft gemessen [mg N ₂ O*l ⁻¹]
01.02.02 16:05 480ml Lachgas bei 25°C				
1.2.02 18:22	12429	2,14	26,601	12,429
2.2.02 10:48	9588,8		20,522	9,589
3.2.02 11:58	8803,8		18,842	8,804
4.2.02 13:06	7550,2		16,159	7,55
5.2.02 11:28	6708,6		14,358	6,709
5.2.02 14:55	6353,5		13,598	6,354
6.2.02 11:45	3628		7,765	3,628
7.2.02 10:44	1120,7		2,399	1,121
7.2.02 16:08	478,2		1,023	0,478

Der hohe Konzentrationsabfall zwischen dem 01.02.02 und dem 02.02.02, der in Tabelle 8.5.3 abzulesen ist, könnte zwei Ursachen haben, worüber abschließend nicht entschieden werden konnte:

1. Eine kurzzeitige Undichtigkeit im Anreicherungssystem oder
2. Zum Zeitpunkt der ersten Lachgasmessung war das Lösungsgleichgewicht noch nicht eingestellt.

Die ab dem 06.02.02 zu beobachtenden Lachgasverluste hingegen sind teilweise auf kurze und sporadisch auftretende Undichtigkeiten des Lachgasanreicherungssystems zurückzuführen. Diese Undichtigkeiten traten in der Regel bei den Abdichtungen der Wurzelkompartimente zur Mittelplatte hin bei einzelnen Gefäßen auf.

Bei den Messungen innerhalb des dritten Versuchszeitraumes (31.01.02 – 07.02.02) war zwischen dem Gasmessgerät und dem Messstellenumschalter ein Naphionschlauch zur Trocknung der Proben eingebaut. Deshalb können die in diesem Versuchszeitraum erhaltenen Ergebnisse nicht auf die Transpirationsrate bezogen werden, da wegen der Probentrocknung Informationen über die Transpirationsrate der einzelnen Gefäße fehlen. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind zwar zur Detektion unterschiedlichen Verhaltens zwischen verschiedenen Behandlungen geeignet, sie lassen jedoch keine Rückschlüsse auf absolute Unterschiede im Lachgasemissionsverhalten zu.

Tab. 8.5.4: Emissionskoeffizienten, die für den Versuchsabschnitt vom 19.01.02-23.01.02 berechnet werden konnten. Es sind die Werte von fünf Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen angegeben (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	Kont. 1	Kont. 2	Mittelwert Kont	OLK1	OLK 2	OLK 3	OLK 4	OLK 5	Mittelwert OLK
19.1.02 Nacht 1 bis 7:00	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
19.1.02 Tag 1a. 7:00 bis 17:55	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
19.1.02 Tag 1b. 17:55 bis 23:00	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
20.1.02 Nacht 2 23:00bis 7:00	n. b.	n. b.	n. b.	0,192	1,171	0,037	0,166	0,475	0,383
20.1.02 Tag 2 7:00 bis 23:00	n. b.	n. b.	n. b.	0,568	0,673	0,589	0,639	0,626	0,619

Die mit dem in Kapitel 8.4.1 dargestellten Versuch gewonnenen Emissionskoeffizienten für die Behandlung mit Lachgasanreicherung und ohne Luftkissen im Wurzelraum sind in der Tabelle 8.5.4 angegeben. Da die Lachgaskonzentrationen im Wurzelraum der Kontrollgefäße (ohne Lachgasanreicherung) nicht erfasst werden konnten, wurden für diese keine Emissionskoeffizienten errechnet (n. b.).

Wie schon die Transpirationsraten (Abb. 8.4.1.1), die gemessene Lachgasemission pro Gefäß (Abb. 8.4.1.2) und die auf die Transpiration bezogene Lachgasemission (Abb. 8.4.1.3, Abb. 8.4.1.4 und Tab. 8.4.1.1) zeigen die Emissionskoeffizienten (Tab. 8.5.4) zwischen den Zeiträumen mit und denen ohne Beleuchtung deutliche Unterschiede. In der Nacht wurde im Durchschnitt ein kleinerer Emissionskoeffizient gefunden als am Tag. Der Emissionskoeffizient ist als Anteil des mit der Transpiration emittierten Lachgases an der mit der Nährlösung aufgenommenen Lachgasmenge zu interpretieren. Daraus ergab sich, dass in der Nacht im Gesamtmittel über alle Wiederholungen nur knapp 40% des mit der Wurzel potentiell aufgenommenen Lachgases über den Spross an die umgebende Atmosphäre abgegeben wurde. Am Tag wurde ein emittierter Anteil von knapp 62% gefunden. Für die Lachgaskonzentration in der angereicherten Nährlösung ist mit fortschreitender Versuchsdauer eine Abnahme zu erkennen. Unter dieser Annahme erscheint es als sehr wahrscheinlich, dass die Emissionskoeffizienten mit zunehmender Dauer des in Kap 8.4.1 dargestellten Versuches kontinuierlich angestiegen wären, weil die in Tabelle 8.4.1.1 für die Versuchsgefäße mit Lachgasanreicherung dargestellten auf die transpirierte Wassermenge bezogenen Lachgasemissionen in dem Zeitraum vom 20.01.02 – 22.01.01 verhältnismäßig konstant geblieben sind. Auf diesem Hintergrund erscheint der Zusammenhang zwischen Lachgaskonzentration im Wurzelraum von Reispflanzen und der Lachgasemission von Reispflanzen über den Spross als vage. Betrachtet man nun die auf die Transpiration bezogene Lachgasemission der Kontrollpflanzen in Tabelle 8.4.1.1 (ohne Lachgasanreicherung in der Nährlösung) so ergibt sich ein noch uneinheitlicheres Bild. Die Einzelwerte der Wiederholungen enthalten neben Werten, die auch bei den Pflanzen mit Lachgasanreicherungen gefunden wurden, ebenfalls negative Werte, die auf eine Lachgasaufnahme deuten. Insgesamt zeigten sich die

Werte der Kontrollgefäße sowohl als Einzelwerte als auch über beide Wiederholungen gemittelt innerhalb des gesamten Versuchszeitraumes als äußerst inhomogen. Die Mittelwerte über beide Kontrollgefäße zeigten keine kontinuierlichen diurnalen Unterschiede bezogen auf die Lachgasemission pro transpierte Wassermenge.

Zieht man die oben erwähnten bzw. diskutierten Ergebnisse in Betracht, so konnte aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Kontrollen im Vergleich zu den Gefäßen mit Lachgasanreicherung beobachtet werden, dass eine hohe Lachgaskonzentration im Wurzelraum von Reispflanzen einen diurnalen Rhythmus der auf die Transpirationsrate bezogenen Lachgasemission induziert (vgl. Tab. 8.4.1.1). Die Induktion des Rhythmus äußerte sich in kontinuierlich höheren Lachgasemissionen pro transpierte Wassermenge bei eingeschalteter Beleuchtung im Vergleich zu den Emissionen bei Dunkelheit bei den Gefäßen mit Lachgasanreicherung im Wurzelraum. Weiterhin konnte bei hohen Lachgaskonzentrationen im Wurzelraum die Lachgasaufnahme durch die Sprosse von Reispflanzen aus der Atmosphäre nicht mehr gemessen werden.

Tab. 8.5.5: Emissionskoeffizienten, die für den Versuchsabschnitt vom 26.01.02 – 27.01.02 berechnet wurden. Es sind die Werte von drei Gefäßen mit lachgasangereicherter Nährlösung im Wurzelraum (OLK) und zwei Gefäßen mit Lachgasanreicherung und Luftkissen im Wurzelraum (MLK) angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte über alle Wiederholungen der einzelnen unterschiedlichen Behandlungen wiedergegeben (Versuchspflanze Reis).

Zeitpunkt	Kont. 1	Kont. 2	Mittelwert Kont.	OLK 1	OLK 2	OLK 3	Mittelwert OLK	MLK 1	MLK 2	Mittelwert MLK
26.1.02 Tag 1a bis 16:48	n. b.	n. b.	n. b.	81,594	119,81	101,48	100,96	100,9	65,706	83,303
26.1.02 Tag 1b. bis 23:00	n. b.	n. b.	n. b.	1,339	1,022	0,765	0,979	1,275	1,217	1,246
27.1.02 Nacht 2 bis 7:00	n. b.	n. b.	n. b.	1,222	0,955	0,714	0,949	1,359	1,086	1,222
27.1.02 Tag 2 bis 17:07	n. b.	n. b.	n. b.	1,709	1,831	1,570	1,703	2,195	1,896	2,045

In der Tabelle 8.5.5 sind die Emissionskoeffizienten des in Kapitel 8.4.2 dargestellten zweiten Versuchszeitraumes vom 26.01.02 – 27.01.02 enthalten. Dieser Versuch wurde mit zwei Lachgasanreicherungsvarianten durchgeführt (mit und ohne Luftkissen im Wurzelraum), um die beiden Aufnahmepfade (gelöst in Wasser bzw. gasförmig in das Wurzelarenchym) zu bewerten. Dabei wurde vorausgesetzt, dass Lachgasemissionen durch Aerenchyme höher seien, wenn im Wurzelraum neben in Wasser gelöstem Lachgas ebenfalls gasförmiges Lachgas vorliegt. Auch für den hier diskutierten Versuchszeitraum (26.01.02 – 27.01.02) wurden diurnale Unterschiede für die Transpiration (Abb. 8.4.2.1 u. 8.4.2.2), die Lachgasemission pro Gefäß (Abb. 8.4.2.3 u. 8.4.2.4) und die Lachgasemission bezogen auf die Transpirationsrate (Abb. 8.4.2.5 und 8.4.2.6) gefunden. Diese Unterschiede äußerten sich in höheren Transpirationsraten und höheren Lachgasemissionen pro Gefäß am Tag als in der Nacht. Die Unterschiede bei der Lachgasemission zwischen Tag und Nacht bezogen auf die Transpirationsrate zeigen sich in einer stärkeren Oszillation (höhere Standardfehler) der Emissionswerte in der Nacht. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Lachgasemission, wie auch die Transpiration über die Stomata reguliert ist, da in der Nacht bei geringerer Stomataöffnung die Lachgas und die Wasserdampfemissionen zurückgingen. Die gefundenen Unterschiede zeigen (Abb. 8.4.2.4), dass erhöhte Lachgaskonzentrationen im Wurzelraum sowohl am Tag als auch in der Nacht zu erhöhten Lachgasemissionen durch Reispflanzen führen können. Weiterhin ermöglicht die Abbildung 8.4.2.4 den Schluss, dass im Mittel mehr Lachgas durch Reispflanzen emittiert wird, wenn neben in Wasser gelöstem Lachgas auch gasförmiges Lachgas im Wurzelraum vorliegt. Daraus kann gefolgert werden, dass von den beiden möglichen Wegen der Lachgasaufnahme im Wurzelraum (gasförmig oder in Wasser gelöst) bei Reispflanzen die gasförmige Lachgasaufnahme effektiver zu verlaufen scheint. Dies steht in Übereinstimmung mit den bei Sonnenblume (Kap 4 und 5) gemachten Beobachtungen. Damit zeigen nur die Versuche mit Gerste (Kap. 6) ein abweichendes Verhalten.

Bei einem Vergleich der Emissionskoeffizienten des zweiten Versuchszeitraumes (Tab. 8.5.5) mit denen des ersten Versuchszeitraumes (Tab. 8.5.4) fallen die deutlichen Unterschiede zwischen den Emissionskoeffizienten auf. Die

Emissionskoeffizienten in Tabelle 8.5.4 liegen im Mittel deutlich unter eins und Tag- / Nacht-Unterschiede sind deutlich ausgeprägt. Die in Tabelle 8.5.5 dargestellten Koeffizienten für die vergleichbaren Gefäße ohne Luftkissen im Wurzelraum hingegen liegen nahe oder über eins. Die gemittelten Koeffizienten der Gefäße mit Luftpolster sind während des gesamten Versuchszeitraums größer als eins. Diurnale Unterschiede sind nur gering ausgeprägt. Sie äußern sich in kleineren Emissionskoeffizienten in der Nacht als am Tag. Diese Unterschiede wurden in ähnlicher Form auch bei Gerste (Kap. 6) und Sonneblume (Kap. 4. und 5) gefunden. Die hohen Emissionskoeffizienten am „Tag 2“ könnten auf eine fehlerhafte Konzentrationsmessung für Lachgas im Anreicherungsgefäß (Ausgleichsgefäß) zurückzuführen sein, da nicht auszuschließen ist, dass wegen Undichtigkeit des Systems vor der Messung eine erhebliche Lachgasmenge verloren ging. Dadurch verringerte sich folglich der Nenner des Emissionskoeffizienten, was zu einer Erhöhung des Wertes führt.

Die niedrigeren Emissionskoeffizienten bei Dunkelheit (Nacht) könnten theoretisch auf einen vollständigen Stomataschluss in Verbindung mit einer lachgasemissionshemmenden Cuticula zurückzuführen sein (Römheld, mündliche Mitteilung (2001). Allerdings wurden auch bei Reis - wie auch bei Gerste und Sonnenblume - nachts hohe CO₂-Emissionen gemessen, so dass analog zu der in Kap. 6.5 vorgestellten Argumentation der Einfluss der Cuticula auf das N₂O-Emissionsverhalten von Reis ebenfalls zu vernachlässigen ist.

Etwas verwunderlich sind die für „Tag 1a.“ ermittelten Emissionskoeffizienten. Sie wurden für den letzten Zeitraum vor der Lachgasanreicherung berechnet. Bei konsequenter Interpretation des Emissionskoeffizienten als Anteil des emittierten Lachgases am mit dem Transpirationswasser aufgenommenen Lachgas entsteht eine Erklärungslücke, die auch bei der Berechnung des Emissionskoeffizienten für die Kontrollgefäße unter Verwendung der durchschnittlichen ambienten Lachgaskonzentration ($0,6 \cdot 10^{-3} \text{ mg N}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1}$) innerhalb aller Versuchszeiträume ebenfalls auftreten würde. Diese Lücke kann mit der Annahme, dass in der Reispflanze entweder durch den pflanzlichen Stoffwechsel oder durch Endobakterien (vgl. MCINROY & KLOEPPER, 1995) Lachgas gebildet wird, geschlossen werden. Um diese Annahme zu untermauern müssten weitere Versuche durchgeführt werden. Ein weiterer Erklärungsansatz wäre, dass Lachgas in den Reispflanzen in gelöster Form

gespeichert wird wie dies von LENS & CHALAMET (1981) für Mais vorgeschlagen wird. Damit könnten ebenfalls die im Vergleich mit dem in Kap. 8.4.1 vorgestellten Versuch höheren Emissionskoeffizienten des in Kapitel 8.4.2 (26.01.02 – 27.01.01) beschriebenen Versuchs erklärt werden. Die höheren Emissionskoeffizienten, die im zweiten Versuchszeitraum im Vergleich zum ersten Versuchszeitraum ermittelt wurden, könnten auf eine Sättigung der „flüssigen Phase“ mit Lachgas (aufgrund der langen Versuchsdauer mit hohem Lachgasangebot im Wurzelraum) in den beobachteten Versuchspflanzen zurückzuführen sein.

Eine Erklärung der in der Tabelle 8.4.1.1 zu findenden negativen Werte innerhalb der Kontrollgefäße ohne Lachgasanreicherung könnte eine Aufnahme von Lachgas durch die Sprosse von Reis sein. Die Aufnahme atmosphärischen Lachgases durch Reispflanzen wurde auch von GARCIA, (1975) experimentell nachgewiesen.

Der Einfluss von Aerenchymen (im Wurzelraum) auf den Transport von Lachgas in Reispflanzen mit anschließender Emission über die Stomata des Sprosses ist als gering einzustufen, da nachts wegen der verringerten Transpiration bei einer Beteiligung der Aerenchyme an der Lachgasemission höhere Emissionskoeffizienten und höhere auf die Transpiration bezogene Lachgasemissionen aufgetreten sein müssten als am Tag. Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang, dass die potentiell über die Aerenchyme transportierte Lachgasmenge in der Nacht eben so hoch sein müsste wie am Tag. Aufgrund der nachts niedrigeren Transpirationsrate müsste deshalb der Lachgasemissionskoeffizient nachts deutlich größer sein als am Tag. Dies ist allerdings weder bei einer Betrachtung der Werte in Tabelle 8.5.4 noch bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 8.5.5 zu erkennen. Dieses Ergebnis steht in Widerspruch zu MOSIER et al. (1990), die eine erhöhte Lachgaskonzentration über Reispflanzen im Vergleich zur Lachgaskonzentration über einer pflanzenfreien Fläche gefunden haben. Dies führten sie auf einen Lachgastransport – analog zu der herrschenden Lehrmeinung für Methan – innerhalb der Aerenchyme der Reispflanzen mit anschließender Emission durch den Spross zurück.

Da aus den in den Kapiteln 6. und 7. enthaltenen Versuchen hervorging, dass unter bestimmten Bedingungen hohe Luftfeuchtigkeit zu Verfälschungen der Lachgasmesswerte führen kann, wurde zur Verifizierung der bisher diskutierten Ergebnisse in dem in Kapitel 8.4.2 dargestellten Versuchszeitraum (31.01.02 – 07.02.02) die Messproben mit einem Naphionschlauch getrocknet. Die in den

Abbildungen 8.4.2.7 und 8.4.2.8 zeigten Ergebnisse in Verbindung mit den in Tabelle 8.5.3 enthaltenen Werte für die Anreicherungskonzentrationen zeigen eindeutig, dass die Lachgasmessungen der in diesem Kapitel dargestellten Versuche nicht durch Luftfeuchtigkeit gestört wurden.

Aus den Versuchen mit Reis wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Bei hohen Lachgaskonzentrationen im Wurzelraum von Reis lässt sich ein diurnaler Abgaberhythmus von Lachgas durch den Spross von Reispflanzen nachweisen. Dabei waren die bei Dunkelheit gemessenen Emissionen kleiner als die Emissionen die bei angeschalteter Beleuchtung gemessen wurden.
- Die Netto-Lachgasaufnahme aus der Atmosphäre, die bei Reis vereinzelt beobachtet wurde, war bei hohen Lachgaskonzentrationen in der Nährlösung nicht nachweisbar.
- Die Lachgasemission bei hohen Konzentrationen im Wurzelraum wird von der Stomataöffnung beeinflusst.
- Aerenchyme leisten im Vergleich zum transpirationsvermittelten Transport im Xylem einen nur geringen Beitrag zum Lachgastransport mit anschließender Emission durch den Spross von Reispflanzen.

Kapitel 9.

SYNOPSIS

Dieses Kapitel soll eine Synopsis (vergleichende Zusammenschau) der in den Kapiteln 3. bis 8. gewonnen Erkenntnisse im Vergleich zu den in der Literatur gefundenen Schlussfolgerungen geben.

Der in dieser Arbeit entwickelte Emissionskoeffizient (als Maß für den durch den Spross emittierten Lachgasanteil an der potentiell - durch die Wurzeln mit dem Transpirationswasser aus der Rhizosphäre - aufgenommenen Lachgasmenge) ermöglicht es (wenn Informationen über die Transpirationsrate und die Lachgaskonzentration vorliegen und die betrachteten Pflanzenarten Lachgasemissionen zeigen) unterschiedliche Versuche unabhängig von der gebildeten Biomasse und zerstörungsfrei untereinander absolut zu vergleichen. Zusätzlich ermöglicht die Kenntnis des Emissionskoeffizienten einer Pflanzenart eine schnelle Hochrechnung der Lachgasemissionen der von dieser Pflanzenart gebildeten Bestände durch die Ermittlung von zwei leicht bestimmbar Parametern: der Transpiration und der Lachgaskonzentration im Wurzelraum.

Da in der Literatur sehr unterschiedliche Einheiten zu finden sind (u. a. $\text{mg N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{Tag}^{-1}$, $\text{mg N}_2\text{O}\cdot\text{Pflanze}^{-1}$) und die geläufigen Einheiten weder Informationen über die Umgebungsbedingungen (z. B. Lachgaskonzentration im Wurzelraum) enthalten noch diese auf eine für alle Pflanzenarten gleiche Basis beziehen (z. B. transpierte Wassermenge) sind die darin enthaltenen Ergebnisse - selbst wenn die gleiche Einheit gewählt wurde - in ihren numerischen Aussagen in Bezug auf den Einfluss der Pflanzenart auf die Lachgasemission nicht vergleichbar. Aus diesem Grunde wurden in den nachfolgenden Ausführungen weder numerische Angaben noch Maßeinheiten der einzelnen Autoren übernommen. Es werden lediglich die aus den Ergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen der jeweiligen Autoren den aus den Ergebnissen dieser Arbeit abgeleiteten Schlussfolgerungen vergleichend und bewertend gegenübergestellt.

In Tabelle 9.1 sind die in der Literatur beschriebenen Schlussfolgerungen, die aus Lachgasemissionsversuchen mit Pflanzen gewonnen wurden, dargestellt.

Tab. 9.1: Zusammenstellung der Ergebnisse von Untersuchungen zu Lachgasemissionen durch Pflanzen.

Quelle	Pflanzenart	Versuchs-ort	Schlussfolgerungen
GARCIA, 1975	Reis	Labor	Lachgasaufnahme durch die Sprosse und Transport durch die Aerenchyme in den Wurzelraum.
LENSI & CHALAMET, 1981	Mais	Labor	Lachgasaufnahme durch junge Maispflanzen. Metabolisierung von ¹⁵ N markiertem Lachgas in geringem Umfang.
MOSIER et al., 1990	Reis	Labor und Feld	Erhöhte Lachgasabgabe über Reispflanzen im Vergleich zu einer unbewachsenen Oberfläche
GRUNDMANN et al., 1993	Mais	Labor	Lachgasaufnahme durch junge Maispflanzen. Metabolisierung von ¹⁵ N markiertem Lachgas in geringem Umfang. Vgl. LENSI & CHALAMET, 1981 (Es wurde der gleiche Versuch dargestellt)
DEAN & HARPER, 1986	Sojabohne (Glycine ssp.), Flügelbohne (Psophocarpus ssp.)	Labor	Lachgasproduktion in Blattstücken.
CHANG et al., 1997 u. 1998	Gerste, Raps	Labor	Über den Transpirationsstrom vermittelte Emission von bodenbürtigem N ₂ O durch den Spross
RUSCH & RENNENBERG, 1998	Schwarz-Erle	Labor	Über Aerenchyme vermittelter Lachgastransport mit anschließender Emission aus dem Stamm.
AUGUSTIN, 1999 (mündliche Mitteilung)	Rohrglanzgras	Feld	Lachgasaufnahme aus der Atmosphäre in einer natürlichen Moorvegetation.

Die Tabelle 9.2 gibt die Schlussfolgerungen, die aus den eigenen Versuchen gezogen wurden, wieder.

Tab. 9.2: Zusammenfassung der aus den eigenen Versuchen gezogenen Schlussfolgerungen bezüglich der Lachgasemissionen durch Pflanzen.

Pflanzenart	Kapitel	Schlussfolgerungen
Sonnenblume	4, 5.	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Aufnahme von gasförmigem Lachgas als von in Wasser gelöstem Lachgas durch die Wurzel. • Ausschließlich transpirationsvermittelter Lachgastransport aus den Wurzeln in den Spross mit anschließender Emission durch den Spross. • Lachgasaufnahme und eventuelle Metabolisierung durch den Spross.
Gerste	6	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Aufnahme von in Wasser gelöstem Lachgas als von gasförmigem Lachgas durch die Wurzel. • Ausschließlich transpirationsvermittelter Lachgastransport aus den Wurzeln in den Spross mit anschließender Emission durch den Spross. • Lachgasaufnahme und eventuelle Metabolisierung durch den Spross.
Mais	7	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Lachgasemission (besonders im Vergleich zwischen Kontrollen und Gefäßen mit Lachgasanreicherung im Wurzelraum) nachweisbar. • Lachgasaufnahme und eventuelle Metabolisierung durch den Spross
Reis	8	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Aufnahme von gasförmigem Lachgas als von in Wasser gelöstem Lachgas durch die Wurzel. • Vorwiegend transpirationsvermittelter Lachgastransport aus den Wurzeln in den Spross mit anschließender Emission durch den Spross. Gasförmiger Lachgastransport durch Aerenchyme spielt nur eine untergeordnete Rolle. • Lachgasaufnahme durch den Spross nur vereinzelt. • Lachgasproduktion in den Sprossen von Reispflanzen.

Vergleicht man die Aussagen, die mit den eigenen Versuchen erhalten wurden, (Tab. 9.2) mit den in der Literatur gefundenen Aussagen (Tab. 9.1), so kann festgestellt werden, dass nahezu die gesamte Spannweite der in dieser Arbeit enthaltenen Ergebnisse in der Literatur beschrieben ist. Allerdings erlaubten die Versuchsanordnungen teilweise eine kausale Zuordnung von Ursache und Wirkung nicht. Teilweise wurden die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse mit anderen Pflanzenarten erhalten als in den hier beschriebenen Versuchen (Kap. 4 – 8).

Bei den Ergebnissen mit Gerste (Kap. 6) und Sonnenblume (Kap. 4 u.) 5 ist von einer Kombination aus transpirationsvermittelter (LENSI & CHALAMET, 1981), stomatär regulierter Lachgasemission und Lachgasaufnahme durch den Spross (GARCIA, 1975; LENSİ & CHALAMET, 1981; GRUNDMANN et al., 1993; AUGUSTIN, 1999 (mündliche Mitteilung)) mit eventueller Metabolisierung auszugehen. Der Umfang einer möglichen Regulation der Lachgasaufnahme durch die Wurzel (selektive Aufnahme, erneute Abgabe eines Teils des aufgenommenen Lachgases in die Rhizosphäre etc.) konnte mit dem verwendeten Versuchsaufbau weder erfasst, weder belegt noch widerlegt werden. Die Wurzeln der unterschiedlichen Pflanzenarten scheinen sich jedoch hinsichtlich der Lachgasaufnahme durch die Wurzel bezüglich der Angebotsform (gasförmig, in Wasser gelöst) voneinander zu unterscheiden (vgl. Tab. 9.2).

Die Experimente mit Reis (Kap. 8) ergaben zum Teil sehr hohe Emissionskoeffizienten (bis zu 120, vgl. Tab. 8.5.5) für Lachgas. Für einen Versuchsabschnitt wurden Emissionskoeffizienten gefunden, die zeigten, dass die mit der Transpiration emittierte Lachgasmenge um ein Vielfaches über der Lachgaskonzentration in der Nährlösung lag (Tab. 8.5.5). Da die Messungen der Lachgasemissionen einen starken diurnalen Rhythmus mit deutlich geringeren Lachgasemissionen pro Gefäß, niedrigeren auf die Transpirationsrate bezogenen Emissionen und niedrigeren Emissionskoeffizienten in der Nacht als am Tag zeigten, ist ein verstärkter Lachgasübertritt durch die Aerenchyme, wie von MOSIER et al. (1990) vorgeschlagen, auszuschließen (vgl. Kap. 8.5). Ebenso können länger anhaltende Undichtigkeiten im angereicherten Kreislaufsystem ausgeschlossen werden. Die hohen Lachgasemissionen der Reispflanzen könnten teilweise in einer Lachgasproduktion in den Pflanzen analog zu den Ergebnissen von DEAN & HARPER (1986) begründet sein. Ein mit der verwendeten Versuchsanordnung nicht näher

quantifizierbarer Teil des emittierten Lachgases stammt jedoch mit Sicherheit aus dem Wurzelraum. Dies lässt sich aus dem Umstand schließen, dass im Versuch die Lachgasemissionen in Gefäßen, in denen Lachgas nicht nur in Wasser gelöst, sondern auch gasförmig angeboten wurde, tendenziell sowohl in der Nacht als auch am Tag höher waren, als bei Gefäßen mit rein wassergelöstem Lachgasangebot.

Das am schwierigsten zu interpretierende Ergebnis ist die Nettolachgasaufnahme. Garcia (1975) schloss aus seinen Ergebnissen mit Reis, dass Lachgas durch die Blätter aufgenommen und über die Aerenchyme in die Wurzeln und von dort in den Boden gelangt. Im Boden wird es schließlich zu N_2 denitrifiziert. LENS & CHALAMET, (1981) diskutieren zwei mögliche alternative Ursachen für die gemessene Lachgasaufnahme: einerseits die Metabolisierung und damit Entzug von N_2O aus dem System, andererseits die in Wasser gelöste Speicherung von N_2O in Vakuolen oder in dem Blatt anhaftenden Flüssigkeitsfilmen (in der Atemhöhle, dem Blattapoplasten des Blattinneren etc.). Bedenkt man, dass das gesamte Vakuolenvolumen und das Volumen der dem Blatt anhaftenden Flüssigkeitsfilme begrenzt ist, muss man zu dem Schluss kommen, dass nach einer ausreichend langen Versuchsdauer mit einer ausreichend hohen Lachgaskonzentration die Speicherkapazität der Pflanzen für Lachgas erschöpft sein wird und kein weiteres Lachgas mehr aufgenommen werden kann. Wegen dieser Zusammenhänge scheint die zweite von LENS & CHALAMET, (1981) diskutierte Alternative (Lachgaseinlagerung in der Pflanze) aufgrund der in Kapitel 7 dargestellten Ergebnisse als nicht wahrscheinlich. Da Lachgas aufgrund seiner Isostere zu Kohlendioxid (WIBERG, 1976 b, c) ähnliche chemische Eigenschaften wie CO_2 zeigt, ist eine Metabolisierung durch die Pflanze chemisch vorstellbar. „Möglicherweise spielt das kohlendioxid-isostere N_2O bei der Stickstoffassimilation der Pflanze eine ähnliche Rolle wie das CO_2 im Kreislauf des Sauerstoffs, indem der Luftstickstoff N_2 unter Mitwirkung des von den stickstoff-assimilierfähigen Pflanzen (z. B. Leguminosen) erzeugten „Leg-Hämoglobins“ primär vielleicht zu N_2O oxidiert wird, welches dann in den Stickstoffkreislauf eintritt.“(WIBERG, 1976 a, c, d, e). Weitere Experimente mit Leguminosen könnten zur Klärung dieser Hypothese beitragen.

Im Zusammenhang mit den beobachteten unterschiedlichen N_2O -Aufnahme der verschiedenen Pflanzenarten wäre zu überprüfen, ob eventuell erst pflanzenspezifische Kompensationspunkte hinsichtlich der Lachgaskonzentration in

der den Spross umgebenden Atmosphäre erreicht bzw. überschritten werden müssen, bis eine Aufnahme aus der Atmosphäre durch den Spross zu beobachten ist (in Analogie z. B. zu NH_3 ; vgl. u. a. SCHJOERRING et al. (2000)).

Als Gesamtschlussfolgerung ergibt sich eindeutig, dass Pflanzen artspezifisch Einfluss auf den durch sie vermittelten Lachgasaustausch zwischen dem Wurzelmedium (in den hier vorgestellten Versuchen Nährlösung mit und ohne Luftkissen) und der Atmosphäre nehmen. Die dabei zu beobachtenden Interaktionen im System „Pflanze – Lachgas“ reichen in unterschiedlichen Kombinationen von reiner Lachgasemission bis zu reiner Lachgasaufnahme. Deswegen müssten pflanzenspezifische Interaktionen bei Schätzungen und Modellierungen von Lachgasemissionen, die durch Pflanzenbau verursacht werden, stärker berücksichtigt werden.

Noch offene Fragen und Unsicherheiten:

- (1) Wie hoch ist bei messbarer Lachgasaufnahme der eventuell in der Pflanze gespeicherte und der eventuell assimilierte (metabolisierte) Lachgasanteil?
- (2) Wird die Emission im Wurzelraum befindlichen Lachgases über den Spross ausschließlich durch die Transpirationsrate reguliert oder sind die Wurzeln in der Lage Lachgas selektiv aufzunehmen und / oder wieder abzugeben?
- (3) Welche Mechanismen sind am Übertritt von Lachgas in die Wurzel beteiligt und welche Mechanismen haben Einfluss auf den weiteren Transport in der Pflanze?
- (4) Hat der pH-Wert des Xylemsaftes einen Einfluss auf die Lachgasaufnahme durch die Wurzel und den Weitertransport des Lachgases mit dem Transpirationsstrom in der Pflanze (in Analogie zu den Ergebnissen mit CO_2 von LEVY et al., 1999)?
- (5) Auf welchem Wege könnte Lachgas metabolisiert / produziert werden? Durch Endobakterien (vgl. MCINROY & KLOPPER, 1995) oder durch die Pflanze selbst?

- (6) Verändert sich das Verhalten von Pflanzen hinsichtlich der Lachgasemission mit ihrem Alter?
- (7) Gibt es im Zusammenhang mit der Lachgasaufnahme und einer eventuell damit einhergehenden Lachgasassimilation pflanzenspezifische Kompensationspunkte, wie sie für CO₂ schon lange bekannt sind und die für die Aufnahme und Assimilation von NH₃ ebenfalls experimentell nachgewiesen wurden (u. a. SUTTON et al. (2001), SCHJOERRING & MATTSSON (2001), SCHJOERRING et al. (2000), SHARPE & HARPER (1997), MANNHEIM et al. (1997), BUSSINK et al. (1996), HARPER et al. (1996), GRAVENHORST & BREIDING (1990), HOVE VAN et al. (1987, 1988, 1989, 1990), PARTON et al. (1988), FARQUHAR et al. (1980), FARQUHAR et al. (1979), MEYER (1973))?
- (8) Hat die Form des Stickstoffangebotes (Nitrat oder Ammonium) im Wurzelraum einen Einfluss auf die Lachgasabgabe bzw. Aufnahme durch die Sprosse von Pflanzen?
- (9) Lässt sich die in Reis beobachtete pflanzlich bedingte Lachgasemission über die Düngung oder die Züchtung verringern?

Viele der noch offenen Fragen könnten durch Versuche mit ¹⁵N markiertem Lachgas beantwortet werden.

ZUSAMMENFASSUNG

In vielen Untersuchungen wurde gezeigt, dass unter bestimmten Bedingungen Lachgas (N_2O) im Boden gebildet wird (u. a. Davidson, 1991). Teile dieses N_2O werden über Diffusionsprozesse in die Atmosphäre emittiert. Bisherige Versuche haben fast ausschließlich unbewachsene Oberflächen (Wasser- oder Boden-) oder mit Pflanzen bestandene Oberflächen (Wasser- oder Boden-) zum Gegenstand gehabt. Über Differenzrechnungen - Emission einer mit Pflanzen bewachsenen Oberfläche abzüglich der Emission einer unbewachsenen Referenzfläche - wurde versucht, den direkten Einfluss von Pflanzenbewuchs auf die N_2O -Emission zu bestimmen (Mosier et al., 1990). Diese Vorgehensweise lässt allerdings keinen Rückschluss zu, durch welchen Einfluss des Pflanzenbewuchses die N_2O -Abgabe über die Wasser- bzw. Bodenoberfläche erhöht wird (z.B. durch direkte N_2O -Abgabe durch die Pflanze). Weiterhin liefern diese Untersuchungen keine Informationen über eventuelle Transportwege durch die Pflanze. Erstmals haben Chang et al. (1997) gezeigt, dass Pflanzen N_2O abgeben können. Rückschlüsse auf die Transportwege innerhalb der Pflanze waren auch hier nicht möglich. Als Emissionswege kommen prinzipiell der Transport gelöst im Transpirationswasser und/oder der Transport als Gas über aerenchymatische Gewebe in Betracht.

Ziel der Arbeit war es, die möglichen Transportwege und -formen (über den Transpirationsstrom gelöst im Transpirationswasser oder gasförmig durch Aerenchyme) von N_2O durch Pflanzen zu untersuchen und zu bewerten.

Methodisch wurde das Ziel wie folgt realisiert: Entwicklung eines Versuchsaufbaus, der es zuließ, die mögliche N_2O -Abgabe durch Pflanzen zu quantifizieren; unterschiedliche Transportwege für die N_2O -Abgabe durch Pflanzen zu differenzieren; und Realisierung eines Versuchsaufbaus, mit dem es möglich war, unterschiedliche Einflussfaktoren für die N_2O -Abgabe zu untersuchen.

Zu Beginn wurden Versuche mit geschlossenen (ohne Luftaustausch mit der Umgebung) und kontrolliert offenen Systemen (mit Luftaustausch mit der Umgebung als Zwangsbelüftung durch Pumpen) vergleichend durchgeführt. Im geschlossenen System wurden Proben über Molekularsiebe und Vakutainer gewonnen. In diesen Proben wurde mit einem ECD (Elektroneneinfangdetektor) die Lachgaskonzentration gaschromatographisch (HP 5890) bestimmt. Zur Erfassung der Lachgasflüsse im kontrolliert offenen System wurde zusätzlich zu den oben angeführten Methoden

noch eine Onlinemessung mit einem photoakustischen Messgerät (Multigas Monitor von Innova AirTech) durchgeführt. Die Messgenauigkeit des Onlinemessgerätes wurde mit einem Gaschromatographen evaluiert (HP 5890). Zur Bestimmung der N₂O Konzentrationen war die Onlinemessung am geeignetsten, da es nur bei einer hohen zeitlichen Auflösung möglich war, Unterschiede zwischen Behandlung und Kontrolle sicher zu erfassen. Zur Durchführung der relevanten Versuche wurde ein kontrolliert offenes System verwendet, da im geschlossenen System binnen kürzester Zeit der CO₂-Vorrat aufgebraucht war. Zusätzlich war die Luft in den geschlossenen Systemen nach wenigen Minuten wassergesättigt. Dies führte zu Wachstumshemmungen bei den Pflanzen sowie zu Störungen bei der N₂O-Messung. Das kontrolliert offene System bestand aus einem jeweils wasser- und gasdichten Wurzel- und Sprosskompartiment. In das Wurzelkompartiment wurden definierte Lachgasmengen eingespritzt. Die im Sprosskompartiment gemessenen N₂O-Konzentrationen wurden Kontrollen (ohne N₂O-Anreicherung in der Nährlösung) und der zur Belüftung eingesetzten Luft gegenübergestellt. Für eine sichere Bestimmung der Lachgasabgabe durch Pflanzen war es unerlässlich, den Wurzelraum gasdicht vom Sprosskompartiment abzutrennen. Mit einer Mischung aus einer Abdruckmasse aus der Dentaltechnik (Optosil, Fa. Haereus) und einer weiteren Dichtungsmasse (Prestik AE hellgrau, Bostik GmbH) konnte dies erreicht werden. Um mögliche Einflussfaktoren auf die N₂O-Abgabe mit größtmöglicher Sicherheit zu erfassen, wurde ein Nährlösungssystem etabliert. Bei der Pflanzenkultur in Nährlösung konnten folgende Parameter genau kontrolliert werden: Nährstoffkonzentrationen, pH-Wert, Konzentration unterschiedlicher in Wasser löslicher Gase (z.B. N₂O, CO₂), das Verhältnis Luftvolumen im Wurzelraum zu Volumen des Nährmediums im Wurzelraum.

Als Versuchspflanzen dienten: Sonnenblume (*Helianthus annuus* cv. Frankasol), Gerste (*Hordeum vulgare* cv. Scarlet), Reis (*Oryza sativa* cv. 94D-22), Mais (*Zea mays* cv. Helix).

Die Versuche mit Sonnenblume (keine Aerenchyme, N₂O nur in Wasser gelöst angeboten) ergaben einen deutlichen Zusammenhang zwischen der N₂O-Angebotskonzentration in der Nährlösung, der Transpirationsrate und der N₂O-Emission in Form eines ausgeprägten Tag - Nachtrhythmuses. Bei gasförmigem N₂O-Angebot im Wurzelraum lagen die Emissionsraten höher als bei einem

ausschließlich in Wasser gelösten Angebot. Daraus könnte gefolgert werden, dass gasförmiges N_2O besser pflanzenverfügbar ist als in Wasser gelöstes.

Annähernd ähnliche Ergebnisse wurden auch innerhalb der Versuche mit Gerste erzielt, wobei die höchsten Lachgasemissionen bei rein wässrigem Lachgasangebot gemessen wurden.

Die Überprüfung der möglichen Abgabe von N_2O gasförmig über Aerenchyme, wurde mit Reis durchgeführt. Auch bei Reis wurde ein ausgeprägter Tag - Nachtrhythmus bei der N_2O -Emission gefunden. Dies führte zu dem Schluss, dass Aerenchyme nur einen geringen Beitrag zur N_2O -Emission aus dem Wurzelraum leisten.

Da die N_2O -Abgabe bei den drei oben aufgeführten Pflanzenarten nachts deutlich geringer war als tags, konnte geschlossen werden, dass das N_2O über den Transpirationsstrom aus dem Wurzelraum in das Sprosskompartiment transportiert wurde.

Die Untersuchungen mit Mais ergaben sowohl in den mit N_2O angereicherten Varianten als auch in den Kontrollvarianten unabhängig vom Angebot (in wässriger Lösung oder gasförmig) überraschenderweise eine Netto- N_2O -Aufnahme. Dies führte zu der Annahme, dass das N_2O als Stickstoffquelle metabolisiert werden kann.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass der wesentliche Transportweg für N_2O offensichtlich der Transpirationsstrom und nicht das „Ausgasen“ (über Aerenchyme) ist.

ABSTRACT

Many studies have shown that laughing gas (N_2O) can be produced in the soil under certain conditions. Part of this N_2O can be emitted into the atmosphere by diffusion. Research conducted up to now almost always dealt with surfaces (water or soil) with or without vegetation. The attempt was to determine the influence of plants on N_2O emission by a simple comparison of the emissions measured on unplanted surfaces with the N_2O emissions measured on planted surfaces. This practice did not give an answer to the question which parameter (e.g. direct N_2O emission through a plant) of the vegetation have an influence on the higher emissions measured on surfaces with vegetation in comparison to lower emissions measured on surfaces without plants. Furthermore, it was not possible to draw conclusions about different possible pathways of N_2O through the plant by means of such experiments. Chang et al. (1997) were the first to show that plants are able to emit N_2O . However, it was not possible to draw any conclusions on the way of transition of N_2O through the plant from this study, either. In principle there are two possibilities for a transition of N_2O through the plant that can be considered: N_2O dissolved in water and transported with the transpiration water flow or gaseous N_2O through aerenchyma.

The aim of this work was to explore and to rank the different ways and forms of transition of N_2O through plants (dissolved in water and transported with the transpiration or gaseous through aerenchyma).

To achieve this goal an experimental set-up had to be realized that allowed the determination of possible N_2O emissions by plants, the determination of different ways of transition of N_2O through the plant and the determination of different influencing factors (e.g. N_2O concentration) on the N_2O emissions.

In the beginning experiments with closed chambers and with "controlled opened chambers" were conducted in comparison to each other. In the experiments with closed chambers samples were drawn by means of molecular sieves and vacutainers. N_2O concentrations of the samples were measured with a GC (gas chromatograph type HP 5890) equipped with an ECD (electron capture detector). Besides the two methods mentioned above in order to determine the N_2O concentrations within the experiments with the "controlled opened chambers" a third method was used for N_2O measurement by means of a photo acoustic online

measuring machine. The accuracy of the photo acoustic measurement was evaluated with the GC. For the questions of interest the photo acoustic measurement showed to be the best to determine differences of N₂O emissions between different experimental treatments.

The experiments that were taken in consideration were conducted in a “controlled opened system” because in closed chambers CO₂ concentration decreased rapidly. Additionally, the air in the closed chambers became saturated in water vapour within a few minutes. These two factors lead to inhibited growth of the plants and to undesired influences on the N₂O measurements. The “controlled opened system” consisted of a root and a shoot compartment. Both compartments were separated airtight from each other and from the surroundings. The root compartments were enriched with a definite amount of N₂O. The N₂O concentrations measured in the shoot compartments of the systems with N₂O enrichment in the root compartment were compared with measurements of systems without N₂O enrichment and measurements of ambient air. The necessity to divide the root compartment from the shoot compartment airtight was realised with a material on the basis of silicone that is usually used to make prints of teeth (Optosil, from *Haereus*) and a sealing mass (Prestik AE hellgrau, from Bostik GmbH). To determine the different factors potentially influencing the N₂O emission through plants a hydroponical culture system was established that allowed controlling the following factors: concentration of nutrients, pH-factor, concentration of different water soluble gases (e. g. N₂O, CO₂) and the ratio between water and gas filled space in the root compartment.

As experimental plants sunflower (*Helianthus annuus* cv. Frankasol), barley (*Hordeum vulgare* cv. Scarlet), rice (*Oryza sativa* cv. 94D-22) and corn (*Zea mays* cv. Helix) were used.

For the experiment with sunflower (no aerenchyma, N₂O dissolved in water available only) a relationship between N₂O concentration in the root compartment, the emitted amount of N₂O by the shoots and the intensity of transpiration in a diurnal pattern was found. In systems with gaseous availability of N₂O in the root compartment the observed emissions were higher than in systems with availability of N₂O dissolved only in water. From this it could be concluded, that gaseous N₂O is better available for plants than N₂O dissolved in water.

Similar results were obtained from experiments with barley. The only difference was that the highest N₂O emissions were observed in systems with availability of N₂O dissolved in water only.

The possible N₂O emission through aerenchyma was checked with rice plants. In these experiments a pronounced diurnal pattern of the N₂O emissions was also found. This lead to the conclusion that aerenchyma only have a small influence on the N₂O emissions out of the root compartment through rice plants.

Because the N₂O emission in the three experiments described above followed the diurnal pattern of the transpiration, it was concluded that N₂O was transported with the transpiration water flow from the root (compartment) to the shoot (compartment).

The experiments with corn showed for all treatments (control and availability of N₂O in gaseous form or dissolved in water) a net N₂O depletion in the shoot compartment for night (darkness) and day (light) respectively, thus leading to the conclusion that N₂O can be metabolised and used as a nitrogen source.

All in all the experiments showed that the main way of transition of N₂O through plants is water dissolved with the transpiration water flow and not gaseous (through aerenchyma).

LITERATURVERZEICHNIS

- AYLWARD G.H., 1986: Datensammlung Chemie in SI-Einheiten. Physik-Verlag, VCH, Weinheim, S. 74.
- AZAM F, C. MÜLLER, A. WEISKE, G. BENCKISER, J.C.G. OTTOW, 2002: Nitrification and denitrification as source of atmospheric nitrous oxide – role of oxidizable carbon and applied nitrogen. *Biol Fertil Soils* (2002) 35, S 54-61.
- BENKISER G., K. HAIDER & D. SAUERBECK, 1986: Field measurements of gaseous nitrogen losses from Alfisol planted with sugar-beets. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149, S. 249-261.
- BRAUN C., 1994: Denitrifikationsbedingte Stickstoffverluste einer Acker-Catena im Kraichgau (Baden-Württemberg). In: *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*. Hrsg.: U. Babel, W.R. Fischer, K. Roth und K. Stahr. Universität Hohenheim, 16, ISSN 0942-0754, S. 9-10.
- BUSSINK D.W., L.A. HARPER & W.J. CORRÉ, 1996: Ammonia Transport in a Temperate Grassland: II. Diurnal Fluctuations in Response to Weather and Management Conditions. *Agron J.* 88, 621-626
- BUTTERBACH-BAHL, K. (1993): Mechanismen der Produktion von Methan in Reisfeldern: Abhängigkeit von Felddüngung und angebaute Varietät. *Wiss.-Verl. Maraun*, 1993, ISBN 3-927548-53-7.
- CHANG C., H.H. JANZEN, C.M. CHO und E.M. NAKONECHNY, 1997: Nitrous oxide emission from barley and canola plants. *Proceedings of the 7th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions*. Cologne, Germany, April 21-23, 1997. S. 207-213.
- CHANG C., H.H. JANZEN, C.M. CHO und E.M. NAKONECHNY, 1998: Nitrous Oxide Emission through Plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 35-38.
- CICERONE R.J & J.D. SHETER, 1981: Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion. *J. Geophys. Res.* 86, p.7203 -7209
- CRUTZEN P. J. & T. E. GRAEDEL, 1986: The role of atmospheric chemistry in environment-development interactions. In CLARK, W. C. and R.A. MUNN (Hrsg.): *Sustainable development of the biosphere*. Laxenburg, Austria: Cambridge University Press, S. 213-250.
- DAVIDSON E.A., 1991: Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In Rogers, J.E. & W.B. Whitman (eds.): *Microbial production and consumption of greenhouse gases: Methane, nitrogen oxides, and halomethanes*.

- Amer. Soc. Microbiol., Washington, 219-235.
- DEAN J. V. & J. E. HARPER, 1986: Nitric Oxide and Nitrous Oxide Production by Soybean and Winged Bean during the *in Vivo* Nitrate Reductase Assay. *Plant Physiol.* 82, 718-723.
- ENQUETEKOMMISSION DES 12. DEUTSCHEN BUNDESTAGES, 1995: Mehr Zukunft für die Erde. Economica Verlag, Bonn, 1995, 1540p.
- FAHEY D. W., 1994: Atmospheric processes responsible for the observed changes in ozone: polar ozone. In: WMO (world meteorological organisation (Hrsg.): Scientific assessment of ozone depletion, 1994, 3.1.
- FAO & IFA, 2001a: Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. First Vision, published by FAO and IFA. Rome, ISBN: 92-5-104689-1, p. 6.
- FAO & IFA, 2001b: Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. First Vision, published by FAO and IFA. Rome, ISBN: 92-5-104689-1, p. 21-27.
- FARQUHAR G.D., R. WETSELAAR & P.M. FIRTH, 1979: Ammonia volatilisation from senescing leaves of maize. *Science* 203, 1258-1275.
- FARQUHAR G.D., P.M. FIRTH, R. WETSELAAR & B. WIER 1980: On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: determination of the ammonia compensation point. *Plant Physiol.* 66, 710-714.
- GARCIA J.-L., 1975: Effet rhizosphère du riz sur la dénitrification. *Soil Biol. Biochem.* 7, 139-141.
- GRAVENHORST G. & H. BREIDING, 1990: NH₃ transfer between the atmosphere and coniferous trees. In: *Field Measurements and Interpretation of Species Derived from NO_x, NH₃ and VOC Emissions in Europe*. Ed. by S. Beilke and M. Millan. Air Pollution Research Report 25, CEC, Luxembourg, pp. 118-146.
- GRUNDMANN G.L., R. LENSİ & A. CHALAMET, 1993: Delayed NH₃ and N₂O uptake by maize leaves. *New Phytol.* 124, 259-263.
- HACK J., 1999 b: N₂O-Emissionen und denitrifikationsbedingte Stickstoffverluste landwirtschaftlich genutzter Böden im Elsaß unter Berücksichtigung von Boden und Witterungsfaktoren sowie der nitratreduzierenden und nitrifizierenden Mikroflora. In *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*. Hrsg.: E. Kandeler, M. Kaupenjohann, J.C. Munch und K. Stahr. Universität Hohenheim, ISSN 0942-0754, 50, S. 51-59.
- HACK J., 1999: N₂O-Emissionen und denitrifikationsbedingte Stickstoffverluste

- landwirtschaftlich genutzter Böden im Elsaß unter Berücksichtigung von Boden und Witterungsfaktoren sowie der nitratreduzierenden und nitrifizierenden Mikroflora. In: Hohenheimer Bodenkundliche Hefte. Hrsg.: E. Kandeler, M. Kaupenjohann, J.C. Munch und K. Stahr. Universität Hohenheim, ISSN 0942-0754, 50, S. 3.
- HARPER L.A., D.W. BUSSINK, H.G. VAN DER MEER & W.J. CORRÉ, 1996: Ammonia Transport in a Temperate Grassland: I. Seasonal Transport in Relation to Soil Fertility and Crop Management. *Agron. J.* 88, 614-621.
- HOVE VAN L.W.A., A.J. KOOPS, E.H. ADEMA, W.J. VREDENBERG & G.A. PIETERS, 1987: Analysis of the uptake of atmospheric ammonia by leaves of *Phaseolus vulgaris* L.. *Atmos. Environ.* 21, 1759-1763.
- HOVE VAN L.W.A., E.H. ADEMA & W.J. VREDENBERG, 1988: The uptake of ammonia by leaves. In: *Air Pollution and Ecosystems*, Ed. by P. Mathy, CEC/D. Riedel, Brussels / Dordrecht pp. 734-738.
- HOVE VAN L.W.A., E.H. ADEMA, W.J. VREDENBERG & G.A. PIETERS, 1989: A study of the adsorption of NH₃ and SO₂ on leaf surfaces. *Atmos. Environ.* 23, 1479-1486.
- HOVE VAN L.W.A., W.J. VREDENBERG & E.H. ADEMA, 1990: The effect of wind velocity, air temperature and humidity on NH₃ and SO₂ transfer into Bean-leaves (*Phaseolus vulgaris* L.). *Atmos. Environ.* 24, 1263-1270.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 1995: *Climate change 1995: The Science of Climate Change*. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2001 a: *Technical Summary*. A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail. Co-ordinating Lead Authors: D.L. Albritton, L.G. Meira Filho. <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>, p. 38.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2001 b: *Technical Summary*. A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail. Co-ordinating Lead Authors: D.L. Albritton, L.G. Meira Filho. <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>, p. 42.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2001 c: *Technical Summary*. A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail. Co-ordinating Lead Authors: D.L. Albritton, L.G. Meira Filho. <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>, p. 47.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2002: *Climate Change and*

- Biodiversity. Edited by H. Gitay, A. Suárez, R.T. Watson and D.J. Dokken. ISBN: 92-9169-104-7. <http://www.ipcc.ch/pub/tpbiodiv.pdf>, p. 8.
- KAISER E.-A., F. EILAND, J.C. GERMON, M.A. GISPERT, O. HEINEMEYER, C. HENAU, A.M. LIND, M. MAAG, E. SAGUER, O. VAN CLEEMPUT, A. VERMOESEN & C. WEBSTER, 1996: What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils? *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 159, S. 541-547.
- KNOWLES, R. 1981: Denitrifikation. In: Paul E.A. & J.N. Ladd (Eds.): *Soil Biochemistry*. M. Dekker Inc., New York, 8, p. 323-356.
- LAPITAN R.L., R. WANNINKHOF & A.R. MOSIER, 1999: Methods for stable gas flux determination in aquatic and terrestrial systems. In A.F. Bouwman, ed.: *Approaches to scaling of trace gas fluxes in ecosystems*. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, p. 31-66.
- LENSI R. & A. CHALAMET, 1981: Absorption de l'oxyde nitreux par les parties aériennes du maïs. *Plant and Soil* 59, 91-98.
- LEVY P.E., P. MEIR, S.J. ALLEN & P.G. JARVIS, 1999: The effect of aqueous transport of CO₂ in xylem sap on gas exchange in woody plants. *Tree Physiology* 19, 53-58.
- MANNHEIM T., J. BRASCHKAT & H. MARSCHNER, 1997: Ammoniakemissionen aus alternden Pflanzen und bei der Zersetzung von Ernterückständen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 160, 125-132.
- MATTSSON M., S. HUSTED & J. K. SCHJOERRING, 1998: Influence of nitrogen nutrition and metabolism on ammonia volatilisation in plants. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 35-40.
- MCINROY J.A. & J.W. KLOPPER, 1995: Survey of indigenous bacterial endophytes from cotton and sweet corn. *Plant and Soil* 173, 337-342.
- MEYER M.W., 1973: Absorption and release of ammonia from and to the atmosphere by plants. Ph.D. thesis, University of Maryland, College Park, MD.
- MOSIER A.R., S.K. MOHANTY, A. BHADRACHALAM und S.P. CHAKRAVORTI, 1990: Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants. *Biol. Fertil. Crop Sci.* 29, 726-731.
- MORGAN J.A. & W.J. PARTON, 1989: Characteristics of ammonia volatilisation from spring wheat. *Agron. J.* 80, 419-425.
- PARTON W.J., J.A. MORGAN, J.M. ALTENHOFEN & L.A. HARPER, 1988: Ammonia volatilisation from spring wheat plants. *Agron. J.* 80, 419-425.
- PENNOCK D.C., V. KESSEL, R.E. FARRELL & R.A. SUTHERLAND, 1992: Landscapescale

- variations in denitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, p. 770-776.
- RUSCH H. & H. RENNENBERG, 1998: Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaert.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere. *Plant and Soil*, 2001, p. 1-7.
- RUSSOW R., H.-U. NEUE, I. WOLF AND CH. PLATH, 2002: Humans as a source of N₂O – Evidence from breath air analysis and ¹⁵N tracer experiments. In VAN HAM, J. et al. (Eds.): *Non CO₂ Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control Options and Policy Aspects. Proceedings of the Third International Symposium, Maastricht, Netherlands, 21-23 January, 2002*. Millpress Science Publishers, Rotterdam, Netherlands (2002), 155-156.
- RYDEN, J.C., L.J. LUND & D.D. FOCHT, 1978: Direct in-field measurement of nitrous oxide flux from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, p 731-737.
- SCHMIDT U., 1998: Einfluß von Bewirtschaftungsmaßnahmen und Umweltfaktoren auf Lachgas (N₂O)-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Lößböden. In: *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*. Hrsg.: W.R. Fischer, E. Kandeler, M. Kaupenjohann und K. Stahr. Universität Hohenheim, ISSN 0942-0754, 45, S. 20-22.
- SCHÜTZ H., W. SEILER & R. CONRAD, 1989: Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. *Biogeochem* 7, p. 33-53.
- SEILER W., A. HOLZAPFEL-PSCHORN, R. CONRAD & D. SCHARITE, 1984: Methane emission from rice paddies. *J. Atmos Chem* 1, p. 241-268.
- SHARPE R.R. & L.A. HARPER, 1997: Apparent Atmospheric Nitrogen Loss from Hydroponically Grown Corn. *Agron. J.* 89, 605-609.
- SCHJOERRING J. K., S. HUSTED, G. MÄCK, K. H. NIELSEN, J. FINNEMANN & M. MATTSSON, 2000: Physiological regulation of plant-atmosphere ammonia exchange. *Plant and soil* 221, 95-102.
- SCHJOERRING J. K. & M. MATTSSON, 2001: Quantification of ammonia exchange between agricultural cropland and the atmosphere: Measurements over two complete growth cycles of oilseed rape, wheat, barley and pea. *Plant and Soil* 228, 105-115.
- STEFANSON R.C., 1972: Soil denitrification in sealed soil-plant systems. I. Effect of plants, soil water content and soil organic matter content. *Plant and Soil* 37, 113-127.
- SUTTON M.A., C. MILFORD, E. NEMITZ, M.R. THEOBALD, P.W. HILL, D. FOWLER, J.K. SCHJOERRING, M.E. MATTSSON, K.H. NIELSEN, S. HUSTED, J.W. ERISMAN, R. OTJES, A. HENSEN, J. MOSQUERA, P. CEELIER, B. LOUBET, M. DAVID, S. GENERMONT, A. NEFTEL,

- A. BLATTER, B. HERRMANN, S.K. JONES, L. HORVATH, E.C. FÜHRER, K. MANTZANAS, Z. KOUKOURA, M. GALLAGHER, P. WILLIAMS, M. FLYNN & M. RIEDO, 2001: Biosphere-atmosphere interactions of ammonia with grassland: Experimental strategy and results from a new European initiative. *Plant and Soil* 228, p131-145.
- TIEDJE J.M., 1990: Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. In: Zehnder A.J.B. (Ed.): *Biology of anaerobic microorganisms*. Wiley and Sons, New York, p. 179-244.
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, 1994: Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg. Bestandsaufnahme und Leitfaden der Landesregierung zur Senkung der Treibhausgas-Emissionen. UM-12-94, Stuttgart, S. 117.
- UPPAL K.S., BANERJEE N.K., GOSWAMI N.N. & A.R. MOSIER, 1990: Use of encapsulated calcium carbide to reduce denitrification losses in flooded rice from urea fertilizer as studied by direct ¹⁵N measurements technique. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 60, 165 – 176.
- WEIER K.L., J.W. DORAN, J.F. POWER & D.T. WALTERS, 1993: Denitrification and the dinitrogen/ nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, p. 66-72.
- WIBERG E., 1976 a.: In Holleman-Wiberg: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 81.-90. Auflage, de Gruyter, Berlin, ISBN 3-11-005962-2, S. 82
- WIBERG E., 1976 b.: In Holleman-Wiberg: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 81.-90. Auflage, de Gruyter, Berlin, ISBN 3-11-005962-2, S. 383
- WIBERG E., 1976 c.: In Holleman-Wiberg: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 81.-90. Auflage, de Gruyter, Berlin, ISBN 3-11-005962-2, S. 394
- WIBERG E., 1976 d.: In Holleman-Wiberg: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 81.-90. Auflage, de Gruyter, Berlin, ISBN 3-11-005962-2, S.519
- WIBERG E., 1976 e.: In Holleman-Wiberg: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 81.-90. Auflage, de Gruyter, Berlin, ISBN 3-11-005962-2, S.919
- WILLIAMS E.J., G.L. HUTCHINSON & F.C. FEHSENFELD, 1992: NO_x and N₂O emissions from soil. *Global Biogeochemical Cycles* 6, p. 351-388.

Herzlichen Dank.

Meinen Eltern für die bedingungslose Unterstützung in allen Aspekten, ihre Geduld, die moralische Aufbauarbeit und für alles was sie mir mit auf den Weg gegeben haben.

Frau Dr. Barbara Leick für den Aufbau einer kleinen, erfolgsnotwendigen Arbeitsgruppe „klimarelevante Gase“ innerhalb des Institutes, das Interesse an der Arbeit, die Messung der Proben am GC, die Beaufsichtigung meiner Versuche bei unvermeidlicher Abwesenheit und für die moralische Aufbauarbeit.

Frau Gisela Moll für die moralische Unterstützung und den Trost vor allem auch nach nicht nachvollziehbaren Ereignissen.

Frau A. Bardoll-Scorl für die angenehme fruchtbare Zusammenarbeit innerhalb des Graduiertenkollegs und für die gewährte Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit notwendig war.

Frau Mögle für die selbstverständlich wirkende Unterstützung der Stipendiaten im Hintergrund.

Herrn Prof. Dr. Drs. h.c. J. Zeddies für die Übernahme der Aufgabe des dritten Prüfers und für die Förderung.

Herrn Prof. Dr. W. Claupein für die Übernahme der Aufgaben des Mitberichterstatters und dafür, dass die Prüfung innerhalb des Instituts 360 abgehalten werden konnte.

Der DFG für die Finanzierung.