

**Emissionen gasförmiger
Stickstoff-Verbindungen
(NH₃ und N₂O)
aus Pflanzen in Abhängigkeit
von der N-Versorgung
und pflanzenartspezifischen
Stoffwechseleigenschaften**

Annette Kulozik-Erben

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
der Justus-Liebig-Universität Giessen

Prof. Dr. Sven Schubert

**Emissionen gasförmiger
Stickstoff-Verbindungen (NH₃ und N₂O)
aus Pflanzen in Abhängigkeit von
der N-Versorgung und pflanzenartspezifischen
Stoffwechseleigenschaften**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften

beim Fachbereich 09

- Agrarwissenschaften, Ökotoxologie und Umweltmanagement -

der Justus-Liebig-Universität Giessen

eingereicht von Annette Kulozik-Erben

aus Dieburg

Gießen 2007

Inhaltsverzeichnis		Seite
1.	EINLEITUNG	1
2.	MATERIAL UND METHODEN	
2.1.	Methoden zur Erfassung der Ammoniakverluste	8
2.1.1.	Windtunnelmethode	
2.1.1.1.	Beschreibung und Funktionsweise der Windtunnelmethode (Theoretischer Hintergrund)	
2.1.1.2.	Erfassung meteorologischer Daten	11
2.1.2.	Haubengefäßmethode	11
2.1.2.1.	Beschreibung und Funktionsweise der Haubengefäßmethode	
2.1.3.	Messung der Ammoniakkonzentration der Luft und chemische Analyse	13
2.2.	Methode zum Nachweis von Lachgasflüssen zwischen Pflanzen und umgebender Atmosphäre	14
2.2.1.	Beschreibung und Funktionsweise des zur Messung von Lachgaskonzentrationsveränderungen eingesetzten Haubengefäßes	14
2.2.2.	Messung der Lachgaskonzentration der Luft	15
2.2.3.	Analyse der Gasproben	16
2.3.	Analytische Methoden und Bestimmungen	16
2.3.1.	Ernte der Pflanzen und Probenaufbereitung	
2.3.1.1.	Trocknung und Gefriertrocknung	
2.3.1.2.	Heißwasser-Extraktion	
2.3.1.3.	Herstellung von Frischpflanzenhomogenisat	
2.3.1.4.	Gewinnung von Apoplastenflüssigkeit (interzelluläre Waschflüssigkeit)	
2.3.2.	Gesamtstickstoffbestimmung im pflanzlichen Gewebe	17
2.3.3.	Bestimmung der freien Ammonium-Ionen	
2.3.4.	Gesamtaminosäurebestimmung	
2.3.5.	Alkalitätsbestimmung	
2.3.6.	Stickstoffbestimmung im Boden (N_{\min})	
2.4.	Statistische Auswertung	17
2.5.	Gefäßversuche zur Erfassung von NH_3-Emissionsverlusten aus Sommerweizen bei unterschiedlicher Stickstoff-Angebotsmenge	
2.5.1.	EXPERIMENT 1: Quarzsandkultur-N-Bilanzierungsversuch - Windtunnelversuche -	18
2.5.2.	EXPERIMENT 2: Mineralbodenversuche - Windtunnelversuche -	22
2.5.3.	EXPERIMENT 3: Nährlösungskulturversuche - Windtunnelversuche -	26
2.6.	Gefäßversuche zur Erfassung von NH_3-Emissionsverlusten aus Pflanzen bei unterschiedlicher Stickstoff-Angebotsform (NO_3^--N und NH_4^+-N)	
2.6.1.	EXPERIMENT 4: Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen - Windtunnelversuche - - Haubengefäßversuche -	29
2.7.	Gefäßversuche zur Erfassung von NH_3-Emissionsverlusten in Abhängig- keit von dem Verhältnis an Nähranionen zu Nährkationen	

2.7.1.	EXPERIMENT 5:	Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen - Windtunnelversuche - - Haubengefäßversuche -	32
2.8.	Gefäßversuche zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Pflanzen in Abhängigkeit von artspezifischen Stoffwechseleigenschaften		
2.8.1.	Vergleichende Untersuchungen mit Sommerweizen und Ackerbohnen		
2.8.1.1.	EXPERIMENT 6:	Mineralbodenversuch unter Einsatz der Windtunnelmethode	33
2.8.1.2.	EXPERIMENT 7:	Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Haubengefäßmethode	36
2.8.2.	N-Ernährung und NH₃-Freisetzung bei Ackerbohne		
2.8.2.1.	EXPERIMENT 8:	Nährlösungskulturversuch: Angebot von NO ₃ ⁻ -N und NH ₄ ⁺ -N - Haubengefäßversuche -	37
2.8.2.2.	EXPERIMENT 9:	Nährlösungskulturversuch: mineralische und symbiotische N-Ernährung - Haubengefäßversuche -	38
2.8.3.	Vergleichende Untersuchungen mit Sommerweizen und Körnermais		
2.8.3.1.	EXPERIMENT 10:	Mineralbodenversuch unter Einsatz der Windtunnelmethode	39
2.8.3.2.	EXPERIMENT 11:	Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Windtunnelmethode	40
2.8.3.3.	EXPERIMENT 12:	Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Haubengefäß-Methode	40
2.9.	Gefäßversuch zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Pflanzen und Pflanzenbeständen		
2.9.1.	EXPERIMENT 13:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei offengehaltener und abgedeckter Substratoberfläche - Haubengefäßversuche -	41
2.10.	Gefäßversuch zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Pflanzen unter Wasserstress		
2.10.1.	EXPERIMENT 14:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei optimaler und unzureichender Wasserversorgung - Haubengefäßversuche -	43
2.11.	Gefäßversuch zur Erfassung von Distickstoffmonoxid-Konzentrationsveränderungen (N₂O-Flüsse) zwischen Pflanzen und der sie umgebenden Atmosphäre		
2.11.1.	EXPERIMENT 15:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen - Haubengefäßversuche -	44
3.	ERGEBNISSE		
3.1.	Auswertung der folgenden Experimente nach		
		• Wachstumsbeobachtungen	
		• Ertrag und N_t-Gehalt	
		• NH₃-Emissionen	
		• Alkalität in der pflanzlichen Asche	
		• Gehalt an NH₄⁺-Ionen und löslichen Aminosäuren	

3.1.1.	EXP. 1:	Quarzsand-Bilanzierungsversuch • unter Einsatz der Windtunnelmethode	47
3.1.2.	EXP. 2:	Mineralbodenversuche mit Sommerweizen bei unterschiedlicher N-Angebotsmenge • unter Einsatz der Windtunnelmethode	52
3.1.3.	EXP. 3:	Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen bei unterschiedlicher N-Angebotsmenge • unter Einsatz der Windtunnelmethode	56
3.1.4.	EXP. 4:	Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen bei unterschiedlicher N-Angebotsform (bei Angebot von NO_3^- -N und NH_4^+ -N) • unter Einsatz der Windtunnelmethode • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	66
3.1.5.	EXP. 5:	Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen in Abhängigkeit von dem Verhältnis an Nähranionen und Nährkationen • unter Einsatz der Windtunnelmethode • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	79
3.1.6.	EXP. 6:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen und Ackerbohnen • unter Einsatz der Windtunnelmethode	89
3.1.7.	EXP. 7:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen und Ackerbohnen • unter Einsatz der Windtunnelmethode	93
3.1.8.	EXP. 8 u. 9:	Nährlösungskulturversuch mit Ackerbohnen bei mineralischer (NO_3^- -N und NH_4^+ -N) und symbiontischer N-Ernährung • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	95
3.1.9.	EXP. 10:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen und Körnermais • unter Einsatz der Windtunnelmethode	101
3.1.10.	EXP. 11:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen und Körnermais • unter Einsatz der Windtunnelmethode	101
3.1.11.	EXP. 12:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen und Körnermais • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	101
3.1.12.	EXP. 13:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei offen gehaltener und abgedeckter Substratoberfläche • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	107
3.1.13.	EXP. 14:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei optimaler und unzureichender Wasserversorgung • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	112
3.2.	EXP. 15:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen zur Erfassung von N_2O -Konzentrationsveränderungen • unter Einsatz der Haubengefäßmethode	116
4.	Diskussion		122
5.	Zusammenfassung		152
6.	Literaturverzeichnis		154

1. EINLEITUNG

Seit über hundert Jahren emittieren menschliche Aktivitäten in steigendem Maße Kohlendioxid, Methan und andere Treibhausgase und verursachen dadurch einen verstärkten *Treibhauseffekt*. Darin besteht das Wesen des Klimaproblems unserer Zeit. Da bereits die Auswirkungen einer Klimaveränderung merklich erkennbar sind, werden fundierte Kenntnisse über die Entstehung, das Verbleiben sowie mögliche Reaktionen der verantwortlichen Treibhausgase von immer größerer Bedeutung. Gleichzeitig sind konkrete Ziele über die Reduzierung dieser Gase dringend erforderlich. Ein erhöhter Treibhauseffekt kann zusammen mit Rückkoppelungen innerhalb des Klimasystems zu einer zunehmend spürbaren mittleren globalen Erwärmung und einem regional sehr unterschiedlichen Klimawandel führen.

Neben dem Anstieg der globalen Mitteltemperatur als Folge der Klimaveränderung wird im Besonderen über die Verschiebung der Niederschläge diskutiert (IPPC, 1992; Enquete-Kommission, 1994). So wird eine erhebliche Intensivierung des Wasserkreislaufes infolge des Anstieges der mittleren Verdunstung und des mittleren Niederschlages mit bedeutendem Einfluss auf Wasserverfügbarkeit und Wasserknappheit erwartet (Enquete-Kommission, 1994). Darüber hinaus wird durch die Schrumpfung der Gletscher von einem beachtlichen Anstieg des Meeresspiegels ausgegangen (Peltier & Tushingham, 1989; Enquete-Kommission, 1994). Der Energieverbrauch ist mit 50 % am Gesamtvolumen maßgeblich für den Ausstoß von Treibhausgasen verantwortlich. Dabei führen energiefördernde und -verbrauchende Prozesse vor allem zu einer Freisetzung von CO_2 , aber auch CH_4 und O_3 werden ausgestoßen. O_3 wird durch die Vorläufersubstanzen NO_x , CO und NMVOC^1) gebildet. Die Chemieproduktion und deren Einsatz nehmen einen Anteil von 20 %, die Landwirtschaft und die Vernichtung der Tropenwälder einen Anteil von jeweils etwa 15 % am Gesamtvolumen der freigesetzten Treibhausgase ein. Während in der chemischen Produktion und Anwendung insbesondere FCKWs und Halogene entstehen, wird bei der Vernichtung der Wälder hauptsächlich CO_2 , aber auch N_2O , CH_4 und CO emittiert. In der Landwirtschaft treten CH_4 -Ausgasungen durch Rinderhaltung und Nassreisenanbau sowie N_2O -Ausgasungen aus Böden insbesondere durch Düngung auf. Darüber hinaus trägt die Landwirtschaft durch den Verbrauch fossiler Energieträger vor allem bei der Herstellung von Mineräldüngern, als Treibstoff und durch den Transport von Futtermitteln zur CO_2 -Emission bei (Enquete-Kommission, 1994). Mülldeponien, Kohlebergbau sowie Abwasser-, Erdöl- und Erdgassysteme stellen weitere bedeutende anthropogene Quellen der CH_4 -Freisetzung dar (IPPC, 1992).

Die Verfügbarkeit von Stickstoff stellt eine zentrale, regulativ wirkende Rolle für pflanzliches Wachstum dar. N-haltige Verbindungen werden infolge verschiedener Auf- und Abbauprozesse von organischem Material (Umwandlung und Transformation) ständig zwischen den Bereichen *Boden-Pflanzen-Tierwelt* verschoben. Dabei werden auch unterschiedliche gasförmige N-Verbindungen gebildet, die in die Atmosphäre gelangen können. So wird bei der Mineralisierung durch die mikrobielle Umsetzung von organischem Material im Boden NH_4^+ produziert. In einem weiteren Reaktionsschritt, der Nitrifikation, oxidieren nitrifizierende Bakterien (*Nitrosomonas* und *Nitrobacter*) NH_4^+ über NO_2^- zu NO_3^- . Durch bakterielle Umwandlung kann NO_3^- erneut reduziert werden (Denitrifikation). Dabei können die Produkte Stickstoffmonoxid (NO), Lachgas (N_2O) und schließlich molekularer Stickstoff (N_2) entstehen. Jede dieser gasförmigen N-Verbindungen kann aus dem Boden heraus diffundieren und in die Atmosphäre gelangen (Beese, 1994).

Stickstoff wird von den Pflanzen überwiegend in anorganischer Form als Nitrat (NO_3^-) oder Ammonium (NH_4^+) durch die Wurzel aus dem Boden aufgenommen. In der Bodenlösung überwiegt NO_3^- , lediglich auf sauren, sorptionsschwachen Böden können nennenswerte NH_4^+ -Konzentrationen in der Bodenlösung vorliegen. Daher stellt die NO_3^- -Form im Allgemeinen die bedeutendere Aufnahme- und Transportform der Pflanzen dar. Demgegenüber gilt das

¹⁾ NMVOC = flüchtige organische Verbindungen [außer Methan]

NH_4^+ -Ion als die *geeigneterere* Stoffwechselform. So wird das aufgenommene NO_3^- -N vor dem Einbau in organische Moleküle über Nitrit (NO_2^-) zu NH_4^+ reduziert. Die Reduktion von NO_3^- zu NO_2^- verläuft im Cytosol durch die Nitratreduktase. NO_2^- wird nachfolgend im Chloroplasten durch die Nitritreduktase zu NH_4^+ reduziert. Daran schließt sich die NH_4^+ -Assimilation an, bei der NH_4^+ in organische Bindung überführt wird. Dieser Reaktionsvorgang erfolgt über ein Enzymsystem, bei dem die Glutaminsynthetase und Glutaminsynthase (GS/GOGAT) eine entscheidende Rolle spielen. NH_4^+ wird durch Glutaminsynthetase an Glutamat gebunden, wobei Glutamin als Zwischenprodukt auftritt. Diese Reaktion ist ATP-abhängig. Das entstandene Glutamin wird unter Einsatz des Enzyms Glutamatsynthase und durch den Verbrauch von reduziertem Ferredoxin mit 2-Oxoglutarat zu zwei Molekülen Glutamat umgesetzt. Dieser Prozess wird als REDUKTIVE AMINIERUNG bezeichnet. In der Bilanz entsteht ein Molekül Glutamat, welches bei der sogenannten TRANSAMINIERUNG als Aminogruppendonor für verschiedene 2-Oxosäuren dienen kann. Der Ablauf der TRANSAMINIERUNG erfolgt im und außerhalb des Chloroplasten (Mengel, 1991). Neben dem GS/GOGAT-Enzymsystem existiert im Hinblick auf die Assimilation von NH_4^+ ein weiteres Enzym, die Glutamatdehydrogenase, die aufgrund ihres großen K_m -Wertes (Michaelis-Konstante) nur eine geringe Bedeutung für die NH_4^+ -Assimilation hat.

Pflanzen synthetisieren aus anorganischen chemischen Bausteinen komplexere organische Moleküle, wie Eiweiße, Fette, Stärke und anderes mehr. Sie produzieren auf diese Weise sogenannte pflanzliche Biomasse. Dabei stellen die Eiweiße als N-haltige Verbindungen, zu denen auch die Nukleinsäuren zählen, eine besonders wichtige Fraktion dar. Der Anteil des Stickstoffs in der pflanzlichen Biomasse (TS), der überwiegend in organischen Molekülen gebunden vorliegt, beträgt etwa 1-3 Gewichtsprozent (Mengel, 1991).

Biochemisch gesehen stellt die Pflanze eine Produktionsanlage dar, in der sich ein ständiger Auf- und Zusammenbau organischer Moleküle vollzieht. Gleichzeitig werden bereits gebildete molekulare Verbindungen erneut in elementare Bausteine zerlegt. Dabei richtet sich der Auf- und Abbau der verschiedenen Stoffwechselprodukte nach dem gegenwärtigen Bedarf der Pflanze. Trotz der essentiellen Rolle des Stickstoffs für den pflanzlichen Stoffwechsel werden von lebenden Pflanzen gasförmige N-Verbindungen abgegeben. Dabei emittieren Pflanzen Stickstoff überwiegend in reduzierter Form, als Ammoniak und Amine. Wie neuere Untersuchungen zeigen, werden aber auch oxidierte N-Verbindungen, wie Stickstoffoxide (NO_x), auch Distickstoffoxid (N_2O), von Pflanzen emittiert (Rockel, 1993; Chang et al., 1997).

Im Gegensatz zum Distickstoffoxid (N_2O) zählen weder Ammoniak (NH_3) noch die Stickoxide Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zu den direkt klimawirksamen Spurengasen (EK, 1994). Vielmehr beeinflussen NH_3 und NO_x als indirekt klimarelevante Gase den Auf- und Abbau der direkt klimawirksamen Gase. NH_3 kann aber auch als Absorbent von infraroter Strahlung fungieren, doch ist die Auswirkung auf die Erderwärmung (Treibhauseffekt) infolge seiner nur kurzzeitigen Verweildauer in der Atmosphäre von sehr geringer Bedeutung (Schjoerring et al., 1991). Ferner trägt NH_3 zur Eutrophierung natürlicher und naturnaher Ökosysteme bei und verstärkt die Freisetzung von NO_x und N_2O (Ulrich & Puhe, 1994). Zudem wird die Kohlenstoffaufnahme (CO_2 und CH_4) geschädigter Waldökosysteme reduziert (EK, 1994).

Die NH_3 -Emissionen aus landwirtschaftlichen Betriebssystemen werden in die Teilbereiche Tierhaltung, Anwendung von Mineraldüngern, Klärschlammdüngung sowie Nutzpflanzen gegliedert. Dabei spielen die Tierhaltung mit der Gewinnung, der Lagerung und der Ausbringung von Flüssig- und Festmist sowie die Weidehaltung bei der NH_3 -Freisetzung die wohl bedeutendste Rolle. Aber auch der Einsatz von auf NH_4^+ basierenden Mineraldüngern verursacht neben der Klärschlammdüngung merkliche NH_3 -Emissionen (Döhler, 1991). Dagegen stellen Pflanzenbestände und Ernterückstände weitaus geringere NH_3 -Emissions-

quellen dar (Mannheim, 1996). Allerdings existieren zwischen den Versuchsergebnissen verschiedener Arbeiten erhebliche Diskrepanzen in Bezug auf die Höhe der absoluten NH_3 -Emissionsverluste aus Pflanzen. Diese Diskrepanzen beruhen auf der Anwendung unterschiedlicher Messtechniken zur Erfassung der NH_3 -Konzentrationsveränderungen. So gilt es insbesondere zwischen direkter und indirekter Messmethode zu unterscheiden. Während bei der direkten Messmethode genau die Menge an NH_3 -N als Emissionsverluste angerechnet wird, die analytisch erfasst wurde, wird bei der indirekten Messmethode über N-Bilanzierungsberechnungen - meist unter Einsatz von markiertem ^{15}N - der gesamte aus dem Versuchssystem *entwichene* bzw. nicht *wieder auffindbare* N-Anteil den NH_3 -N-Emissionsverlusten zugeordnet (Mannheim, 1996).

Die Höhe der NH_3 -Emissionen aus Pflanzen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Insbesondere die N-VERSORGUNG hat direkte Auswirkungen auf das NH_3 -Emissionsverhalten der Pflanzen. Dabei spielt neben der N-Angebotsmenge die über das Nährmedium angebotene Form des mineralischen Stickstoffs eine elementare Rolle (Harper et al., 1987; Schjoerring et al., 1993; 1998). Ferner treten in Abhängigkeit von der Pflanzenart Unterschiede bei der NH_3 -Freisetzung auf, die auf PFLANZENARTSPEZIFISCHE STOFFWECHSELPROZESSE zurückzuführen sind (Mannheim, 1996; Schjoerring & Mattsson, 2001). Darüber hinaus ist das PHYSIOLOGISCHE ALTER der Pflanzen (Entwicklungsstatus) für das NH_3 -Emissionsverhalten von entscheidender Bedeutung (O'Deen, 1989; Parton et al., 1988; Morgan & Parton, 1989; Schjoerring et al., 1993; Schjoerring & Mattsson, 2001).

Zudem nehmen klimatische Faktoren wie LUFTTEMPERATUR, WASSERVERSORGUNG, RELATIVE LUFTFEUCHTE sowie die LICHTINTENSITÄT meist über den Einfluss auf die Stomatobewegung auch indirekten Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen (Stutte & Weiland, 1978; Farquhar et al., 1980; Mansfield, 1985; Morgan, 1988; Schjoerring et al., 1989; van Hove et al., 1989; Morgan & Parton, In: Schjoerring, 1991; Jairo et al., 1994).

Neben der NH_3 -Freisetzung sind Pflanzen ebenso in der Lage, NH_3 aus ihrer Umgebungsluft aufzunehmen (Harper et al., 1987; Langford & Fehsenfeld, 1992; Sutton et al., 1995; Herrmann et al., 2001). Dabei stellt der NH_3 -Gasaustausch zwischen Pflanze und Atmosphäre einen Stofffluss dar, dessen Rate und Richtung vom Verhältnis des NH_3 -Partialdrucks der Atmosphäre und des NH_3 -Partialdrucks im Blattinneren abhängt (Langford & Fehsenfeld, 1992; Schjoerring et al., 1993; Sutton et al., 1993). Ist der NH_3 -Partialdruck im Blattinneren größer als der NH_3 -Partialdruck der Atmosphäre, kommt es zu einer NH_3 -Abgabe aus Pflanzen. Umgekehrt wird eine NH_3 -Aufnahme von Pflanzen dann auftreten, wenn der NH_3 -Partialdruck im Blattinneren kleiner ist als der NH_3 -Partialdruck in der Atmosphäre. Befinden sich beide Partialdrücke im Gleichgewichtszustand, spricht man vom sogenannten NH_3 -KOMPENSATIONSPUNKT (Farquhar et al., 1980; Husted & Schjoerring, 1995, Schjoerring et al., 1998, Husted et al., 2000; Hermann et al., 2001; 2002).

Verschiedene pflanzliche Stoffwechselaktivitäten, die in Verbindung mit NH_3 -Freisetzungs- und NH_3 -Assimilationsreaktionen stehen, beeinflussen den NH_3 -Partialdruck im Blattinneren (Schjoerring, 1991). Der Vorgang der TRANSAMINIERUNG, bei der die Aminogruppe verschiedener Aminosäuren auf Ketosäuren übertragen werden, spielt bei der Synthese zahlreicher Aminosäuren eine wichtige Rolle (Mengel, 1991; Mohr & Schopfer, 1992). Infolge des ständigen Auf- und Umbaus von Proteinen laufen verstärkt TRANSAMINIERUNGSREAKTIONEN ab, wodurch es zu einer Veränderung des NH_3 -Partialdrucks im Blattinneren kommt.

In alternden Pflanzen, in sogenanntem seneszentem Gewebe, erfolgt ein fortschreitender Abbau von Proteinen (Proteolyse während der SENESZENZ), wodurch es ebenfalls zur Bildung von NH_3 kommt (Hooker et al., 1980; O'Deen & Porter, 1986; Harper et al., 1987; Schjoerring et al., 1998). Ferner stellen die NH_4^+ -AUFNAHME über die Wurzel sowie die NITRAT-NITRIT-REDUKTION des von der Wurzel aufgenommenen NO_3^- weitere, den NH_3 -

Partialdruck im Blattinneren beeinflussende Prozesse dar (Schjoerring, 1991; 1998). Pflanzenartspezifische Stoffwechselfunktionen wie die N₂-FIXIERUNG über die Nitrogenase bei Leguminosen sowie die PHOTORESPIRATION - bei C₃-Pflanzenarten deutlich stärker ausgeprägt als bei C₄-Pflanzenarten - führen ebenfalls zur Bildung und Freisetzung von NH₃ im pflanzlichen Gewebe (Wallsgrave et al., 1983; Schjoerring, 1991; Schjoerring et al., 2000). Im Allgemeinen wird das frei werdende oder neu gebildete NH₃ umgehend über das GS/GOGAT-Enzymsystem assimiliert und damit an organische Moleküle gebunden (Woo et al., 1987; Schjoerring et al., 2000). Ein Ungleichgewicht zwischen NH₃-freisetzenden Stoffwechselfvorgängen und NH₃-Assimilationsreaktionen führt zu einer Veränderung des NH₃-Partialdrucks im Blattinneren. Wird zum Beispiel mehr NH₃ im Blattinneren gebildet als assimiliert, steigt der NH₃-Partialdruck innerhalb der Pflanze. Wird dabei der NH₃-Kompensationspunkt überschritten und eine NH₃-Partialdruckdifferenz im System PFLANZE-ATMOSPHERE verursacht, emittiert die Pflanze NH₃ (Schjoerring et al., 1993; Husted & Schjoerring, 1996).

Der Gasaustausch zwischen Blatt und Atmosphäre bei terrestrischen Pflanzen erfolgt über die Stomata (Schjoerring et al., 1991). Ein kutikulärer Gasaustausch für NH₃ wird zwar nicht ausgeschlossen, jedoch als äußerst gering und dementsprechend bedeutungslos gewertet (Van Hove et al., 1987). Die Stomata stellen die Verbindung zwischen dem Interzellulärsystem des Mesophylls und der Außenatmosphäre dar. Durch sie hindurch vollziehen sich der für die Photosynthese und Atmung notwendige Gasaustausch sowie die Transpiration. Jede Spaltöffnung besteht aus zwei chlorophyllhaltigen Schließzellen, zwischen denen ein verschließbarer Spalt frei bleibt. Unter einer Spaltöffnung liegt jeweils ein großer Interzellularraum, die Atemhöhle. Durch Turgorschwankungen verändern die Schließzellen ihre Gestalt und regulieren auf diese Weise die Spaltenweite. Der CO₂-Bedarf des Blattes, die Wasserversorgung, die Lichtintensität, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte sowie chemische Faktoren wie die Akkumulation von Kaliumsalzen in den Schließzellen stellen regulativ wirkende Größen für die Stomataöffnung dar. Für den stomatären Gasaustausch - ein Diffusionsprozess - spielt die stomatäre Leitfähigkeit eine entscheidende Rolle (Bruckner, 1996). Neben einer hohen Lichteinstrahlung und einer guten Wasserversorgung führt eine hohe N-Versorgung der Pflanzen zum Anstieg der stomatären Leitfähigkeit und damit zum Öffnen der Stomata. Entsprechend steigt auch der NH₃-Efflux (Schjoerring et al., 1991; 1998). Dahingegen setzen heiße und trockene Bedingungen die stomatäre Leitfähigkeit herab und induzieren dadurch das Schließen der Stomata. Neben der stomatären Leitfähigkeit stellt die Grenzschichtleitfähigkeit, eine Funktion aus aerodynamischen Blatteigenschaften, Windgeschwindigkeit und Turbulenz eine wichtige Größe beim Gasaustausch zwischen Pflanze und Atmosphäre dar (Schjoerring et al., 1991).

ZIELSETZUNG

Im Vordergrund der Arbeit stand die Frage:

Wie groß ist der Beitrag der NH₃-Emissionen aus Pflanzen an den Gesamt-NH₃-Emissionen und wie sind darausfolgend die NH₃-Emissionen aus Pflanzen zu bewerten?

Unter Einsatz einer direkten und einer indirekten Methode sollte die Höhe der NH₃-Freisetzung unter Berücksichtigung der Ertragsleistung der Versuchspflanzen erfasst werden. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollten zur Klärung der Frage nach dem Grund für die Abweichungen bisheriger Versuchsergebnisse über NH₃-Emissionen aus Pflanzen beitragen. Darüber hinaus diene die Arbeit der Einschätzung und Bewertung der für die NH₃-Freisetzung entscheidenden Stoffwechselfunktionen und -prozesse. Insbesondere die N-Ernährung, die physiologische Entwicklung der Pflanzen sowie bestimmte pflanzenartspezifische

Stoffwechseleigenschaften stehen in direktem Bezug zur NH_3 -Abgabe und stellen daher wichtige Untersuchungsschwerpunkte der Arbeit dar.

Im Hinblick auf die Vielzahl anstehender Untersuchungen lag ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit in der messmethodischen Weiterentwicklung eines vereinfachten Versuchssystems zur Erfassung von NH_3 -Emissionen aus Pflanzen, bei dem der messtechnische Aufwand verringert und die Messgenauigkeit optimiert werden sollte. Als methodisch-wissenschaftliche Grundlage diente die Windtunnel-Messanlage. Außerdem sollte ein Versuchssystem für die Erfassung von N_2O -Konzentrationsveränderungen zwischen Pflanze und Atmosphäre erarbeitet werden.

Es wurden vier Fragen formuliert, die einer Erweiterung der Kenntnisse über die Freisetzung von NH_3 -N aus Pflanzen dienen und zur Klärung der Frage nach der Freisetzung von N_2O aus Pflanzen beitragen sollen.

1. Welchen Einfluss hat die N-Versorgung - zum einen über die N-Angebotsmenge, zum anderen über die N-Angebotsform (NO_3^- -N und NH_4^+ -N) - auf die Höhe der NH_3 -Emissionen aus Pflanzen unter Berücksichtigung des pflanzlichen Entwicklungsstadiums?

Unter Einsatz der Windtunnel- und der neu entwickelten Haubengefäßmethode sollen grundlegende Kenntnisse über die NH_3 -Flüsse zwischen Pflanzen und der sie umgebenden atmosphärischen Außenluft gewonnen und vertieft werden. Neben der Ertragsanalyse soll die Bestimmung verschiedener Stoffwechselprodukte, die in Zusammenhang mit der NH_3 -Freisetzung stehen, erfolgen.

2. Kann der pflanzliche Stoffwechsel über ein gezieltes Angebot an Nähranionen und Nährkationen dahingehend beeinflusst werden, dass eindeutige Auswirkungen auf das NH_3 -Emissionsverhalten der Versuchspflanzen messbar werden?

Ziel dieser Untersuchungen war, über das Nährmedium auf das intrazelluläre Kationen-Anionen-Verhältnis und damit auf die H^+ -Konzentration und den Gehalt an organischen Säuren der Pflanzen Einfluss zu nehmen.

Die Aufnahme von Kationen wird durch die Protonenabgabe (H^+ -Abgabe) über die ATPase-Aktivität angetrieben. Die nötigen Protonen gehen aus der Aufspaltung von H_2O hervor. Die dabei außerdem freigesetzten OH^- -Ionen haben einen Anstieg des pH-Wertes im Cytoplasma zur Folge, dem entgegengewirkt werden muss. Es wird daher angenommen, dass bei Angebot einer auf Kationen basierenden Nährstoffversorgung - sulfatbetonte Nährlösung - zum Zwecke der pH-Wert-Regulation im Zellinneren (Symplast) verstärkt organische Säuren gebildet werden. Organische Säuren wie die Glutamin- und die α -Ketoglutar Säure sind an der Assimilation von NH_3 beteiligt. Eine Erhöhung des Gehaltes dieser beiden Säuren könnte eine Reduzierung der NH_3 -Emissionsverluste zur Folge haben. Dabei wird eine nicht erschöpfende Kapazität der für die NH_3 -Assimilation erforderlichen Enzymaktivität vorausgesetzt. Umgekehrt wären bei Angebot einer auf Anionen basierenden Nährstoffversorgung erhöhte NH_3 -Emissionen zu erwarten.

3. Gibt es im Hinblick auf den NH_3 -Gasaustausch zwischen Pflanzen und der sie umgebenden Atmosphäre artspezifische Unterschiede?

Unterscheiden sich C_3 - von C_4 -PFLANZEN und GRAMINEEN von LEGUMINOSEN in Bezug auf die Höhe ihrer NH_3 -Emissionen? Ist für das eventuell unterschiedliche NH_3 -Emissionsverhalten der jeweiligen Pflanzenart eine bestimmte artspezifische Stoffwechselreaktion verantwortlich?

Bei zahlreichen photosynthetisch aktiven Pflanzen ist unter gewissen Bedingungen (hoher O_2 -, geringer CO_2 -Partialdruck im Zellinneren) im Licht - zusätzlich zur sogenannten Dunkelatmung - eine Aufnahme von molekularem Sauerstoff (O_2) unter gleichzeitiger Abgabe von Kohlendioxid (CO_2) zu beobachten (Zelitch, 1979). Dieser lichtabhängige Gaswechsel wird als PHOTORESPIRATION (Lichtatmung) bezeichnet. Die Photorespiration wird von verschiedenen Außenfaktoren beeinflusst. Hohe Sonneneinstrahlung und optimale Temperaturen fördern die Photosynthese und bewirken damit einen verstärkten CO_2 -Verbrauch und eine erhöhte photolytische Produktion an O_2 . Das begünstigt die Photorespiration.

CO_2 und O_2 konkurrieren als Substrate um dasselbe Enzym, die RUBISCO, welche jedoch eine deutlich geringere Affinität für O_2 als für CO_2 besitzt (Schopfer, 1992). Die RUBISCO hat demzufolge eine Doppelfunktion. Sie kann als Oxygenase und als Carboxylase katalytisch wirksam sein. Bei hohen O_2 -Partialdrücken wird in den Chloroplasten Ribulose-1,5-bisphosphat, das im wesentlichen als CO_2 -Akzeptor in der Dunkelreaktion fungiert, zu Phosphoglycolat und Phosphoglycerat oxidativ gespalten. Es folgt der Glycolatreaktionsweg, der die wichtigste Reaktionsfolge der Photorespiration darstellt. Die Nettobilanz des Glycolatreaktionsweges, auf den an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden kann, zeigt, dass an zwei Stellen O_2 aufgenommen wird (Oxygenase- und Oxidationsreaktion) und CO_2 und NH_3 freigesetzt werden (Mengel, 1991). Der Glycolatreaktionsweg hat damit einen Abbau von organisch gebundenem C und N zur Folge. Die Freisetzung von NH_3 erfolgt während der Oxidation von zwei Molekülen Glycin in ein Molekül Serin innerhalb der Mitochondrien. Das freigesetzte NH_3 passiert auf dem Weg in die Chloroplasten, dem Ort seiner Rückgewinnung (*Refixierung*), die inneren Membranen der Mitochondrien und der Chloroplasten. Dabei ist bislang nicht eindeutig geklärt, ob dieser Vorgang durch einfache Diffusion von NH_3 über die Membranen oder zum Beispiel durch einen spezifischen NH_4^+ -Kanal erfolgt. Da das pflanzliche Wachstum häufig durch die N-Versorgung begrenzt wird, ist es für die Ökonomie der Pflanzen entscheidend, dass das im Photorespirationsweg mit sehr hoher Rate freigesetzte NH_4^+ erneut vollständig refixiert wird. Diese Refixierung im Chloroplasten erfolgt durch die Glutaminsynthetase und läuft verschiedenen Autoren zufolge mit hoher Effizienz ab (Yu & Wo, 1991; Schopfer, 1992; Heldt, 1996). Dabei wird NH_4^+ unter ATP-Verbrauch auf Glutamat übertragen und Glutamin synthetisiert. Diese Reaktion erfolgt durch das gleiche Enzymsystem, das auch die assimilatorische Nitratreduktion katalysiert. Dabei liegt in Bezug auf die Enzymaktivität die NH_4^+ -Refixierungsrate bei der Photorespiration um ein Vielfaches höher als die NH_4^+ -Fixierungsrate bei der Nitratassimilation (Schopfer, 1992; Heldt, 1996).

Die Rate der Photorespiration bestimmt in entscheidendem Maße den CO_2 -Kompensationspunkt einer Pflanze. Eine hohe Photorespirationsrate bedeutet, dass eine starke CO_2 -Abgabe im Licht erfolgt. Diese Situation ist typisch für viele C_3 -Pflanzen, die ausschließlich CO_2 über den Calvin-Zyklus fixieren. Dahingegen ist für C_4 -Pflanzen infolge einer äußerst effektiven CO_2 -Bindung in der Regel eine niedrige Photorespirationsrate charakteristisch. Die Ursache für den sehr effektiven CO_2 -Bindungsmechanismus bei C_4 - gegenüber C_3 -Pflanzen geht auf die unterschiedliche Blattanatomie der beiden Pflanzenarten zurück. Anstelle der, im allgemeinen für C_3 -Pflanzen üblichen, schichtweisen Anordnung im Palisaden- und Schwammparenchym werden die Leitbündelstränge der C_4 -Pflanzen kranzförmig von den Bündelscheidenzellen umgeben, die ihrerseits von den Mesophyllzellen umschlossen werden. Während in den Mesophyllzellen das aufgenommene CO_2 primär fixiert und angereichert wird, erfolgt in den Bündelscheidenzellen die Überführung von CO_2 in organische Bindung via Calvin-Zyklus. Infolge der vorgeschalteten Anhäufung und Speicherung von CO_2 in

den Mesophyllzellen liegt nach erfolgtem Transport und Wiederfreisetzung in den Chloroplasten der Bündelscheidezellen ein optimales CO_2 -Angebot vor, das die Carboxylierung von Ribulose-1,5-bisphosphat durch RUBISCO fördert und gleichzeitig deren Oxygenaseaktivität unterdrückt (Heldt, 1996).

Vergleichende Untersuchungen über die NH_3 -Abgabe bei Sommerweizen als C_3 -Pflanzenart und Körnermais als C_4 -Pflanzenart sollen der Bewertung der Photorespiration als einen entscheidenden NH_3 -freisetzenden Stoffwechselprozess (Frantz et al., 1982; Givan et al., 1988) dienen.

Ferner gilt zu untersuchen, ob sich LEGUMINOSEN mit ihrer Fähigkeit, in Symbiose mit Knöllchenbakterien über die Nitrogenase Luftstickstoff zu fixieren, bezüglich ihres NH_3 -Emissionsverhaltens gegenüber GRAMINEEN unterscheiden.

Nur Bakterien - darunter auch Cyanobakterien - sind in der Lage, aus dem Stickstoff der Luft NH_3 zu bilden (Heldt, 1996). Es ist bekannt, dass bei symbiontischen Mikroorganismen das Enzym Nitrogenase den komplexen Prozess der N_2 -Fixierung katalysiert. Dabei wird der aufgenommene molekulare Stickstoff (N_2) an das Enzym gebunden, bis zu $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ reduziert und anschließend freigesetzt (Nultsch, 1986). Die weitere Verarbeitung des von den Bacteroiden produzierten $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ obliegt weitgehend der Wirtszelle. So gelangt das NH_4^+ vermutlich über einen spezifischen Kanal in das Cytoplasma der Wirtszelle, wo es in organische Bindung überführt wird. In den Wurzelknöllchen verschiedener Leguminosenarten kommt es allerdings bereits in den Symbiontenzellen zur Weiterverarbeitung von NH_4^+ . Glutaminsynthetase, im Cytosol der Symbiontenzellen, katalysiert die Anlagerung von NH_4^+ an Glutamat. Als Alternative dazu kann das NH_4^+ durch Asparagin-Synthetase an Aspartat gebunden werden. Das entstandene Asparagin agiert in gleicher Weise wie das Glutamin als Trägermolekül für den reduzierten Stickstoff. Beide Amide werden in Xylem-Elemente des knöllchen-eigenen Leitgewebes überführt (Richter, 1998). Bei der Regulation der N-Bindung spielt NH_4^+ eine wichtige Rolle. So kommt die Syntheseaktivität der Nitrogenase bei Anwesenheit von NH_4^+ zum Erliegen (Repression) und wird nach Verbrauch von NH_4^+ in der Zelle erneut fortgesetzt (Schubert, 1995; Schubert & Yan, 1996).

Um die Stellung des Prozesses der N_2 -Fixierung über die Nitrogenase an der NH_3 -Freisetzung genauer bewerten zu können, werden vergleichende Untersuchungen mit Sommerweizen und Ackerbohne durchgeführt. Zusätzlich wird eine Gegenüberstellung symbiontisch und mineralisch ernährter Ackerbohnenpflanzen erfolgen, durch welche die Nitrogenaseaktivität differenzierter beurteilt werden kann.

4. Emittieren Pflanzen das Spurengas N_2O ? Welchen Einfluss hat die N-Ernährung der Pflanzen auf eventuelle N_2O -Emissionen? Lassen sich N_2O -Konzentrationsveränderungen mit Hilfe der dafür entwickelten Haubengefäße nachweisen?

Unter Einsatz der Haubengefäße werden nach dem CLOSED CHAMBER-Prinzip (Mosier, 1989) N_2O -Konzentrationsveränderungen bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Form des angebotenen mineralischen Stickstoffs untersucht.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Methoden zur Erfassung der Ammoniakverluste

Zur Erfassung der NH_3 -Emissionsverluste aus Pflanzen und Pflanzenbeständen wurde zum einen die Windtunnelmethode nach Braschkat (1996) und Mannheim (1996), zum anderen die eigens entwickelte Haubengefäßmethode eingesetzt. Mit Hilfe der Windtunnelmethode konnten die Emissionsmessungen unter praxisnahen, aber dennoch kontrollierten Versuchsbedingungen während einzelner Entwicklungsphasen und über die gesamte Vegetationszeit an den zu untersuchenden Pflanzen erfolgen. Demgegenüber diente die Haubengefäßmethode dazu, mit geringerem versuchstechnischem Aufwand eine größere Anzahl an Wiederholungsversuchen mit kurzen Untersuchungszeiträumen durchzuführen. Ferner war es durch den Einsatz der Haubengefäßmethode möglich, auch einzelne Versuchspflanzen sowie sehr junges Pflanzenmaterial mit nur geringer Frischmasse in entsprechend frühen Entwicklungsstadien zu untersuchen. Einige Fragestellungen konnten durch die Anwendung und Gegenüberstellung beider Methoden präziser erarbeitet werden. Weiterhin ließen sich die Ergebnisdaten genauer absichern.

2.1.1 Windtunnelmethode

Die Windtunnelmethode ist eine direkte Methode zur Erfassung von NH_3 -Konzentrationsveränderungen, die auf der Berechnung des horizontalen Massenflusses von NH_3 beruht und sich als Produkt aus der Windgeschwindigkeit und der Konzentration an NH_3 errechnet.

2.1.1.1 Beschreibung und Funktionsweise der Windtunnelmethode (theoretischer Hintergrund)

Abbildung 1 stellt eine schematische Darstellung des Windtunnels dar. In Strömungsrichtung betrachtet, setzt er sich aus dem Lufteinlass, der Beruhigungsstrecke mit Strömungsgleichrichtern, der Versuchsfläche, dem statischen Mischelement mit zwei Axialventilatoren und dem Luftauslass zusammen. Mit Ausnahme der Versuchsfläche bestehen alle Bauteile aus Aluminiumblechen. Der Bodenkasten der Versuchsfläche wurde aus PVC-Material, die sich darüber befindliche transparente Abdeckung aus lichtdurchlässigem Plexiglas gefertigt. In Abhängigkeit von der Pflanzenhöhe kann die lichte Höhe durch das Einsetzen von transparenten Zwischenkästen aus Plexiglas variiert werden. Am Ende der Beruhigungsstrecke befindet sich ein thermisches Anemometer, welches die Strömungsgeschwindigkeit der Luft innerhalb des Windtunnels erfasst. Die Berechnung der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit erfordert infolge sogenannter inhomogener Strömungsprofile, die durch die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnelquerschnitt zustande kommen, das Erarbeiten eines sogenannten Referenzpunktes. Eine genaue Dokumentation dieses Sachverhaltes ist in der Dissertation von Braschkat (1993) nachzulesen.

Das unmittelbar hinter der Versuchsfläche montierte statische Mischelement sorgt für eine Durchmischung der Luftschichten und verhindert dadurch einen vertikalen NH_3 -/ NH_4^+ -Konzentrationsgradienten. Der Luftraum über der Versuchsfläche ist von der Umgebungsluft getrennt. Die Axialventilatoren erzeugen im Tunnelinneren (von Lufteinlass in Richtung Luftauslass) einen Luftstrom. Dieser wird über die Versuchsfläche geleitet und so mit dem von den Versuchspflanzen emittierten NH_3 beladen.

Die Windtunnelanlage, bestehend aus zwei separaten Windtunneln, deren Steuerung über einen gemeinsamen Regelkreis erfolgt, befand sich stationär im nicht überdachten Außenbereich der Vegetationshalle des Institutes für Pflanzenernährung in Hohenheim. Infolge der Längsteilung im Bereich B und C (Abb. 1) standen pro Windtunnel zwei Versuchsflächen mit je 1,5 m Länge und 0,25 m Breite zur Verfügung. Folglich umfasste die Gesamtanlage insgesamt vier Versuchsflächen. Bei der Untersuchung von zwei verschiedenen Versuchsvarianten waren somit zwei zeitgleiche Wiederholungen möglich.

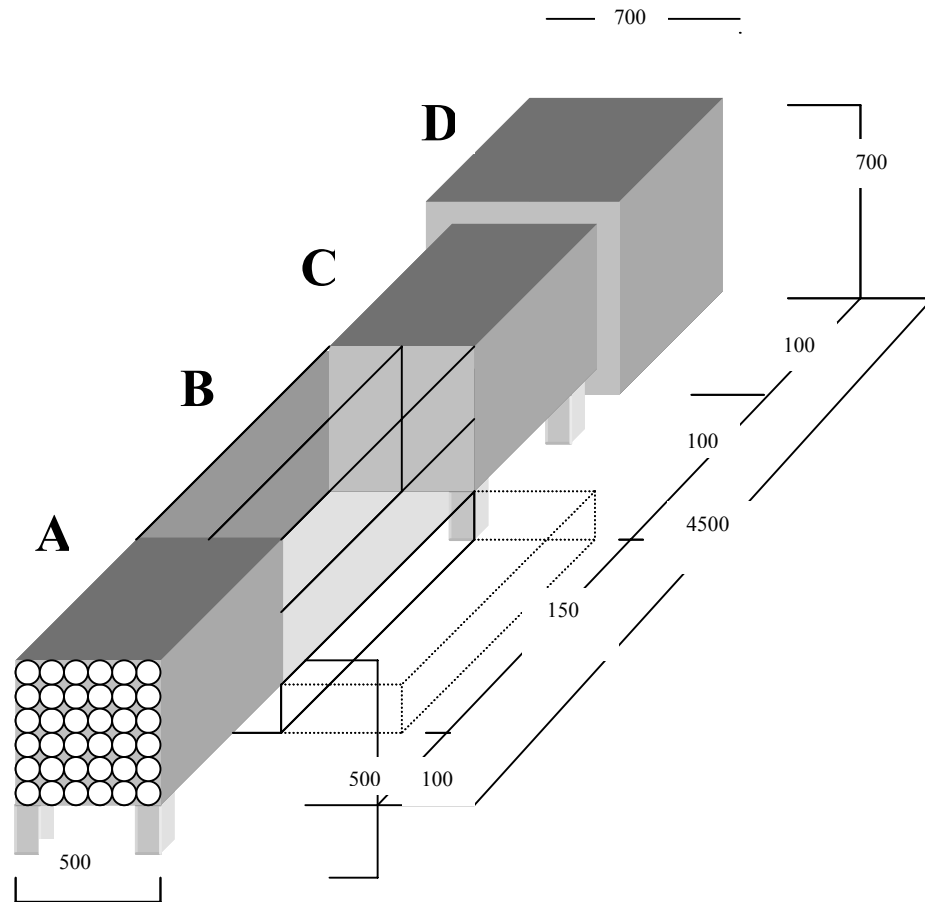


Abb. 1: Schematische Darstellung des Windtunnels. A: Lufteinlass mit Strömungsgleichrichtern, B: Versuchsfläche, C: Statischer Mischer, D: Luftauslass mit Axialventilator

VERSUCHSGEFÄßE INNERHALB DES WINDTUNNELS

In den Bodenkästen der Versuchsfläche wurden Einzelgefäße in Folge platziert. In Abhängigkeit von dem Kultursubstrat kamen viereckige oder zylinderförmige Einzelgefäße zum Einsatz. Die viereckigen Gefäße, die bei Versuchen mit festem Substrat (Quarzsandkultur- und Mineralbodenversuche) verwendet wurden, hatten eine Grundfläche von 0,24 m Länge und 0,24 m Breite. Damit konnten pro Windtunnelhälfte genau sechs Einzelgefäße in Reihe angeordnet werden. Die einzelnen Gefäße schlossen dabei so dicht aneinander an, dass eine *homogene* Versuchsfläche vorlag.

Im Falle von Nährlösungskulturen wurden der Stabilität wegen sechs Liter-Eimer mit einem Durchmesser der Grundfläche von 0,22 m aus schwarzem PVC-Material als Einzelversuchsgefäße eingesetzt. Aufgrund der kreisförmigen Oberfläche konnten hier die einzelnen, sechs hintereinander angeordneten Gefäße nicht optimal gegeneinander abschließen. Jedes Einzelgefäß war mit einem Deckel aus PVC-Material ausgestattet, der zehn gleichmäßig verteilte Bohröffnungen, mit einem Durchmesser von 1 cm, aufwies. Diese Öffnungen dienten der Fixierung der Versuchspflanzen. Eine Gummidichtung im Randbereich der Deckelunterseite gewährleistete eine Abdichtung des Nährmediums nach oben und sorgte ferner für Stabilität bei der Befestigung des Deckels am Gefäß. Die Lochöffnungen wurden nach dem Einsetzen der Versuchspflanzen mit Hilfe einer Knetmasse abgedichtet. Dabei wurde das Knetmaterial

um den pflanzlichen Spross (Hypokotyl) herum fixiert und anschließend gegen die Bohröffnung angedrückt. Am oberen Rand des Versuchsgefäßes befand sich zusätzlich eine kleine Öffnung, durch welche über einen feinen Schlauch die Belüftung der Nährlösung erfolgte.

FUNKTIONSWEISE DER WINDTUNNELMETHODE

Im Inneren eines Windtunnels (Abb. 1) wird ein Luftstrom über der Versuchsfläche erzeugt, der die Windgeschwindigkeit darstellt und als Transportmittel des zu messenden Ammoniaks dient. Die von der Versuchsfläche beziehungsweise den dort platzierten Versuchspflanzen ausgehende NH_3 -Emission wird aus dem Produkt des Luftstroms und der darin enthaltenen NH_3 -Konzentration berechnet. Der Luftstrom seinerseits wird aus der Tunnelquerschnittsfläche und der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Dabei lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelinneren sowohl an die Windgeschwindigkeit der Umgebung (vorherrschende Außenwindgeschwindigkeit) anpassen als auch manuell einstellen. Das Maximum der einzustellenden Strömungsgeschwindigkeit beträgt $3,5 \text{ m s}^{-1}$, das Minimum $0,3 \text{ m s}^{-1}$. Demzufolge kann das Luftvolumen über der Messfläche ca. 12 (bei $0,3 \text{ m s}^{-1}$) bis 126 min^{-1} (bei $3,5 \text{ m s}^{-1}$) ausgetauscht werden. Die Höhe dieser sogenannten Luftaustauschrate wird über die Leistung der zwei Axialventilatoren (Abb. 1) eingestellt.

Bei Windstille wird die Mindest-Strömungsgeschwindigkeit aufrechterhalten, um ein mögliches *Zurückdiffundieren* von NH_3 in den Tunneleingang zu verhindern. In Erwartung relativ geringer NH_3 -Emissionsverluste aus Pflanzen wurde bei allen Untersuchungen die geringste Windgeschwindigkeit und folglich die geringste Luftaustauschrate gewählt.

VOR- UND NACHTEILE DER WINDTUNNELMETHODE

Mit der Windtunnelmethode ist es möglich, von den Versuchspflanzen emittiertes NH_3 unter praxisnahen Bedingungen zu erfassen, ohne die mikroklimatischen Gegebenheiten über der Versuchsfläche zu ändern. Lichteinstrahlung, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit innerhalb des Windtunnels bleiben unbeeinflusst. Trotz der Anpassung an die naturnahen Verhältnisse findet die Versuchsdurchführung unter kontrollierten Bedingungen statt. Die Anzahl von insgesamt vier zur Verfügung stehenden Versuchsflächen machen vergleichende Untersuchungen mit Varianten und Wiederholungen möglich. Darüber hinaus sind infolge der relativ großen Versuchsfläche von $0,375 \text{ m}^2$ Untersuchungen mit *Pflanzenbeständen* durchführbar. Der Flächen- und messtechnische Aufwand ist dabei noch relativ gering.

Allerdings können aufgrund der Abdeckung der Versuchsfläche keine realistischen NH_3 -Emissionen bei Niederschlägen gemessen werden. Ferner ist aus arbeitstechnischer Sicht die Durchführung des Nährlösungswechsels bei Wasserkulturversuchen sehr schwierig.

KALIBRIERUNG DER WINDTUNNELMETHODE ÜBER DIE WIEDERFINDUNGSRATE EINER DEFINIERTER MENGE EINGELEITETEM NH_3

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit wurde die Windtunnelanlage vor der Durchführung des ersten Versuches kalibriert. Unter Verwendung einer Gasmischstation wurde am Boden der Versuchsfläche im Windtunnel eine definierte Menge an NH_3 als Eichgas in den Luftstrom eingeleitet. Dabei wurden verschiedene Parameter wie die Strömungs- beziehungsweise Windgeschwindigkeit, die Versuchsdauer sowie die Konzentration des eingeleiteten NH_3 -Gases variiert. Die Wiederfindungsrate lag im Mittel bei 89,5 % bei einer Standardabweichung von 6,8 %. Braschkat (1996) fand dagegen Wiederfindungsraten von 93,6 % bis 110,3 %, was einem Mittelwert aller Messergebnisse von 101,9 % bei einer Standardabweichung von 6 % entspricht. Worauf diese Diskrepanz zwischen den Ergebnissen von Braschkat und denen der eigenen Untersuchungen zurückzuführen war, konnte trotz der Durchführung mehrerer Versuchswiederholungen nicht geklärt werden. Zu Beginn eines neuen Versuchsjahres erfolgte eine neue Kalibrierung der eingesetzten Messeinrichtung. Dabei lagen die Wiederfindungsraten in keinem Jahr über 95 %.

2.1.1.2. Erfassung meteorologischer Daten

Zeitgleich mit den NH_3 -Emissionsmessungen wurden bei allen Einzelversuchen und in jeder Windtunnelhälfte separat die meteorologischen Daten Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Nettoeinstrahlung gemessen und als Stundenmittelwerte gespeichert. Zusätzlich wurden die Außenwindgeschwindigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft innerhalb des Windtunnels erfasst und gespeichert. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Software entwickelt. Näheres dazu ist der Dissertation von Mannheim (1996) zu entnehmen.

2.1.2 Haubengefäßmethode

In Anlehnung an die Windtunnelmethode wurde ein vereinfachtes Messsystem entwickelt, das aus einzelnen Haubengefäßen (Messkammern) bestand. Es diente dem Ziel, NH_3 -Emissionsmessungen aus einzelnen Pflanzen mit nur wenig Frischmasse durchzuführen. Auch sehr junge Pflanzen können bei Verwendung der entsprechenden Gefäßgröße mit geringem Haubenvolumen als Versuchsmaterial eingesetzt werden. Die Haubengefäße bieten zudem die Möglichkeit, durch das zeitige Erreichen einer nachweisbaren NH_3 -Konzentrationsveränderung (infolge des geringen Messhaubenvolumens) Untersuchungen mit kurzer Versuchsdauer durchzuführen. Dadurch war es wiederum möglich, eine größere Anzahl an aufeinanderfolgenden Untersuchungen durchzuführen und entsprechend mehr Versuchsvarianten miteinzubeziehen. Außerdem konnte die Versuchsdurchführung in mehrfacher, zeitgleicher Wiederholung erfolgen. Dabei war der mess- und arbeitstechnische Aufwand deutlich geringer als bei der Windtunnelmethode.

Ferner diente der Einsatz der Haubengefäßmethode der Kontrolle und Absicherung der mit Hilfe der Windtunnelmethode ermittelten Versuchsergebnisse.

2.1.2.1 Beschreibung und Funktionsweise des zur NH_3 -Verlusterfassung eingesetzten Haubengefäßes

Das einzelne Haubengefäß besteht aus einem Untergefäß, in dem sich das Nährmedium befindet und einer aus Plexiglas bestehenden, aufsetzbaren Haube. Dazwischen liegt ein herausnehmbarer Zwischenboden, der über die Fläche gleichmäßig angeordnete Bohrlöcher aufweist ('Lochteller'). Dieser trennt das Untergefäß und den Haubenaufsatz durch eingelassene Gummiringe im Randbereich luftdicht voneinander ab. Untergefäß und Zwischenboden sind aus PVC-Material gefertigt. Neben der Unterteilung des Gefäßes dient der Zwischenboden mit seinen Bohröffnungen der Verankerung und der Fixierung der Versuchspflanzen. Einzelpflanzen werden in die Bohröffnungen eingesetzt und am Hypokotyl, dem Übergang zwischen Wurzel und Spross, mit einer Knetmasse fixiert. Auf diese Weise wird das Bohrloch rundherum abdichtet. Ein Gasaustausch zwischen Nährmedium (Wurzelbereich) und Haubenvolumen (Haubeninnenluft) wird vollständig unterbunden.

Es wurden zwei verschiedene Gefäßgrößen angefertigt. Gefäßtyp A weist einen Durchmesser von 0,24 m, Gefäßtyp B von 0,15 m auf. Die Höhe beträgt bei beiden Gefäßen 0,3 m. Die Haubenaufsätze sind 0,4 m hoch. Für den Gefäßtyp B wurden zusätzliche Haubenaufsätze angefertigt, die eine Gesamthöhe von 0,8 m aufweisen, sich aber durch einen verschiebbaren Zwischeneinsatz verändern lassen.

FUNKTIONSWEISE DES HAUBENGEFÄßSYSTEMS

Das Messprinzip der Haubenmethode gleicht dem der Windtunnelmethode. Ein künstlich erzeugter Luftstrom wird nach der Befrachtung mit NH_3 durch einen Emittenten (Pflanzen) beprobt. Dabei wird wie bei der Windtunnelmethode durch den Einsatz einer Vakuum-Kompressor-Pumpe aus dem oberen Bereich der Haube kontinuierlich Probenluft entnommen und durch eine Säurefalle geleitet, die das in der Probenluft enthaltene NH_3 absorbiert. Die Säurefalle besteht - wie im Falle der Windtunnelmethode 2.1.3. - aus einer mit 0,0125 M Schwefelsäure gefüllten Gaswaschflasche mit Filtereinsatz. Zum Ausgleich wird durch eine weitere Pumpe

NH_3 -gereinigte Frischluft in den unteren Bereich der Haube in gleicher Menge zurückgeführt. Zum Zwecke der Klimatisierung innerhalb der Haube wird die Frischluft auf 18°C heruntergekühlt. Dabei wird der Luftstrom über ein Schlauchsystem durch ein Wasserbad geleitet, welches mit Hilfe eines Kältetauchers heruntergekühlt wird. Zur Vermeidung einer möglichen Vereisung wird das Kühlaggregat mit einer Zeitschaltuhr gesteuert und dem Wasserbad Ethanol zugesetzt.

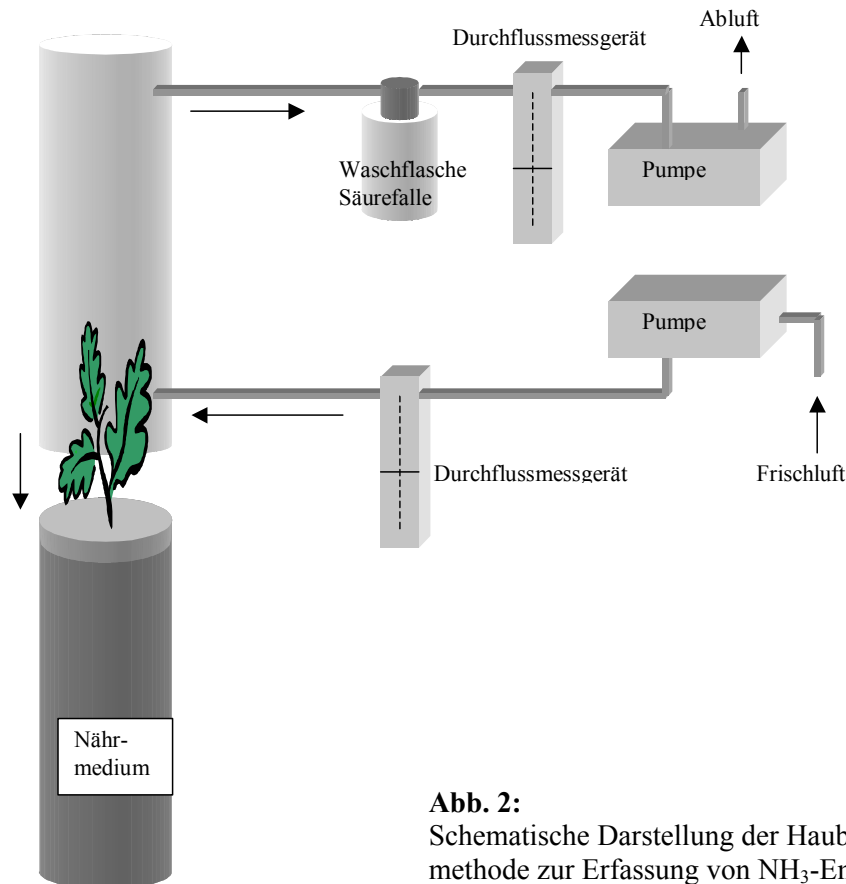


Abb. 2:
Schematische Darstellung der Haubengefäßmethode zur Erfassung von NH_3 -Emissionen

Täglich wurden Lufttemperatur und relative Luftfeuchte manuell überprüft. Der Luftdurchsatz wurde mit einem Schwebekörper-Durchflussmessgerät auf eine konstante Durchflussrate eingestellt, deren Genauigkeit ebenfalls täglich überprüft wurde. Die Hauben blieben während der gesamten Versuchsdauer geschlossen.

Bei Zufuhr von NH_3 -gereinigter Frischluft wird die NH_3 -Abgabe der Pflanzen gefördert. Der NH_3 -Partialdruck im Blattinneren, dem stomatären Raum des pflanzlichen Blattes (Nefel et al., 1997), liegt demzufolge über dem NH_3 -Partialdruck der die Pflanze umgebenden (Atmosphären-) Luft. Das führt zu einer Erhöhung der NH_3 -Emissionsrate. Diese Möglichkeit der Einflussnahme ist im Hinblick auf die Erarbeitung grundlegender Erkenntnisse über stoffwechselbedingte Reaktionen in Bezug auf die Entstehung von NH_3 von großer Bedeutung. Verschiedene Fragestellungen lassen sich dadurch präziser beantworten. Allerdings stellen die auf diese Weise erhobenen Messergebnisse über absolute NH_3 -Emissionen relative Werte dar, die grundsätzlich nur für den Vergleich verschiedener Versuchsvarianten untereinander herange-

zogen werden können. Variantenbedingte Unterschiede kommen bei einer vergleichenden Gegenüberstellung - insbesondere sehr junger Versuchspflanzen mit geringer NH_3 -Abgabe - bei dieser Art der Funktion des Haubengefäßsystems stärker zum Ausdruck.

Wird die eingeleitete Frischluft vor dem Passieren in das Haubeninnere nicht von NH_3 gereinigt, unterbleibt eine gezielte Einflussnahme auf den NH_3 -Flux zwischen Pflanze und der sie umgebenden (Atmosphären-) Luft. In diesem Falle muss zusätzlich die NH_3 -Hintergrundkonzentration bestimmt werden, deren Wert bei der späteren Auswertung von dem Messwert der beprobten Haubeninnenluft subtrahiert wird. Diese Art der Funktion des Haubengefäßsystems zur Erfassung von NH_3 entspricht genau der des Windtunnel-Prinzips.

Ferner kann bei der Haubengefäßmethode ein Luftkreislaufsystem geschaltet werden, bei dem die Haubeninnenluft fortlaufend zirkuliert. So wird die aus den Hauben abgeführte Probenluft nach dem Passieren der Säurefalle erneut in die Hauben zurückgeleitet. Da bei dieser Art der NH_3 -Emissionsmessung eine Zirkulation von *verbrauchter* Luft stattfindet, können die Untersuchungen nur über einen kurzen Versuchszeitraum erfolgen. Dabei werden die Gesamt- NH_3 -Emissionsverluste ohne Intervallschaltung erfasst. Bedingt durch die hohe Temperaturentwicklung innerhalb der Hauben ist die abgeführte Luft erwärmt und - infolge der Transpiration der Pflanzen - mit Wasserdampf angereichert. Aus diesem Grund wird die zirkulierende Luft permanent gekühlt. Dazu wird die Abluft nach dem Passieren der Säurefalle durch eine in einem Kühlbad stehende Waschflasche geleitet und anschließend erneut in die Haube zurückgeführt. Das Herunterkühlen der erwärmten Luft bewirkt ein Auskondensieren der Luftfeuchte. Die dabei in der Waschflasche gewonnene Lösung kann nach Ablauf der Messdauer quantitativ genau erfasst und analysiert werden.

In Anlehnung an die Kalibrierung des Windtunnels wurde auch die Haubengefäßmethode auf ihre Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit hin geprüft. Dabei wurde erneut mit Hilfe der Gasmischstation NH_3 eingeleitet. Hier streuten die Wiederfindungsraten zwischen 94,7 und 98,4 % (Mittelwert aus 12 Wiederholungen: 95,8 %, bei einer Standardabweichung von 6,2 %).

2.1.3. Messung der NH_3 -Konzentration der Luft und chemische Analyse

MESSUNG DER NH_3 -KONZENTRATION

Zur Erfassung der NH_3 -Emissionen wurde im Falle der Windtunnelmethode die NH_3 -Konzentrationsdifferenz im Luftstrom zwischen Lufteinlass und Luftauslass des Windkanals bestimmt. Dazu wurde direkt hinter dem Strömungsgleichrichter im Ansaugbereich des Windtunnels, und somit vor dem Passieren der Versuchsfläche, kontinuierlich Probeluft in zweifacher Wiederholung entnommen. Die hier gemessene NH_3 -Konzentration stellte die Hintergrundkonzentration in der Luft dar. Die Probeluft wurde nach dem Passieren der Versuchsfläche an vier Punkten im Tunnelquerschnitt in ebenfalls zweifacher Wiederholung entnommen.

Abzüglich der Hintergrundkonzentration und unter Einbeziehung des Luftvolumenstromes wird - bei der Windtunnel- und bei der Haubengefäßmethode gleichermaßen - das von den Versuchspflanzen emittierte NH_3 als momentaner Netto- NH_3 -Massenfluss ermittelt.

Der zur Beprobung erforderliche Luftstrom wurde durch den Einsatz einer Membranpumpe (Vakuum-Kompressor-Pumpe) erzeugt. Die genaue Funktionsweise der Windtunnelmethode einschließlich der NH_3 -Konzentrationsmessung ist in den Dissertationen von Braschkat (1993) und Mannheim (1993) beschrieben.

CHEMISCHE ANALYSE

Zur Bestimmung der NH_3 -Konzentration wurde ein nasschemisches Verfahren mit Schwefelsäure als Absorptionslösung verwendet. Dazu wurde die entnommene Probeluft durch ein Schwebekörper-Durchflussmessgerät (Flowmeter, Fa. Fischer & Porter) in eine mit 80 ml 0,0125 M Schwefelsäure gefüllte Gaswaschflasche mit Glasfiltereinsatz geleitet. Mit Hilfe des Durchflussmessgerätes wurde der Luftstrom auf eine konstante Durchflussrate von 5 l min^{-1}

eingestellt. Temperaturabhängige Schwankungen des Durchflusses wurden manuell nachkorrigiert und später bei der Berechnung der NH_3 -Emissionsverluste berücksichtigt.

Das im Luftstrom enthaltene NH_3 wurde in der Schwefelsäure absorbiert. Veränderungen des Probevolumens in der Gaswaschflasche infolge Kondensation oder Verdampfung während der Dauer des Messintervalls wurden durch einheitliches Auffüllen mit Schwefelsäure auf 100 ml ausgeglichen. Nach erfolgtem Durchmischen der Probenlösung wurden 30 ml in Schraubdeckelflaschen für die spätere Analyse abgefüllt und kühl gelagert.

Der NH_4^+ -Gehalt der Absorptionslösung wurde in einem Technikon-Autoanalyser II nach der Technikon-Methodenvorschrift (1984) photometrisch bestimmt. Das NH_4^+ -Ion wurde im alkalischen Milieu mit Salicylat, Hypochlorid und Nitroprussid unter Bildung eines Farbkomplexes gebunden.

2.2. Methode zum Nachweis von Lachgasflüssen zwischen Pflanzen und umgebender Atmosphäre (Nachweis der Lachgasfreisetzung)

Bei einem Nachweis von geringen Gasflüssen, wie bei der Erfassung möglicher Konzentrationsveränderungen von Lachgas (N_2O) zwischen Pflanzen und der sie umgebenden Atmosphäre, ist ein Messsystem mit hohen Luftdurchflussraten - wie im Falle der Windtunnelmethode - nicht einsetzbar. Insbesondere aus diesem Grund wurde das Haubengefäßsystem entwickelt. Dabei war ein Einsatz dieser Versuchstechnik zur Erfassung von NH_3 -Emissionen vorerst zweitrangig. Die Vorteile dieser Methode gegenüber dem Windtunnelsystem bei der Messung von NH_3 -Flüssen führten allerdings schnell zu einer entsprechenden Erweiterung ihres Einsatzes.

Die Bestimmung von N_2O erfordert ein geschlossenes Messsystem, bei dem sich das zu messende Gas akkumulieren kann. So wurde ein Messverfahren nach der sogenannten CLOSED CHAMBER-Methode (Mosier, 1989) entwickelt. Im Prinzip entspricht diese Methode der zuletzt beschriebenen Funktionsweise des Haubengefäßsystems (2.1.2.1.) zur Erfassung von NH_3 -Emissionsverlusten, bei der kein Luftaustausch zwischen dem Haubeninneren und der äußeren Atmosphärenluft stattfindet.

2.2.1. Beschreibung und Funktionsweise des für die Bestimmung von Lachgaskonzentrationsveränderungen eingesetzten Haubengefäßes

Die unter 2.1.2. beschriebenen Haubengefäße wurden primär für die Erfassung von N_2O -Flüssen angefertigt. Dabei musste gewährleistet sein, dass das Innere der Haube, die eigentliche Messkammer, nach allen Seiten eine absolute Gasundurchlässigkeit aufwies. Zum Nährmedium (Gefäßunterteil) hin wurde der pflanzliche Spross durch mehrfach angelegte Schichten einer knetartigen Dichtungsmasse abgedichtet. Eine weitere wichtige messtechnische Voraussetzung war die verlustfreie Gasentnahme während der Beprobung.

Bei der sogenannten CLOSED CHAMBER-Methode (Mosier, 1989) wird die Versuchsfläche zur vollständigen Unterbindung des Luftaustausches mit der Außenatmosphäre unter Einsatz von Messkammern (Hauben) über einen bestimmten Zeitraum nach oben hin 'geschlossen'. Während dieser Zeit erfolgt im Allgemeinen eine Akkumulierung des zu messenden Gases. Direkt nach Ablauf der Akkumulationszeit wird die Haubeninnenluft beprobt.

Um einem zu starken Anstieg der Temperatur und der relativen Luftfeuchte entgegen zu wirken, wurde die Haubeninnenluft klimatisiert. Dabei wurde mit Hilfe einer Membranpumpe die Luft aus dem oberen Bereich der Haube entnommen, durch Passieren eines Kühlbades heruntergekühlt und erneut zurückgeleitet. Auf diese Weise erfolgte eine fortwährende Zirkulation der zu beprobenden Haubeninnenluft. Zweimal täglich wurden Lufttemperatur und relative Luftfeuchte innerhalb der Hauben manuell überprüft.

Die Versuche konnten, je nach Auswahl der zur Verfügung stehenden Gefäße, in zwei- oder vierfacher Wiederholung durchgeführt werden. Zur statistischen Absicherung der Untersuchungsergebnisse wurden zeitlich versetzte Wiederholungsversuche durchgeführt.

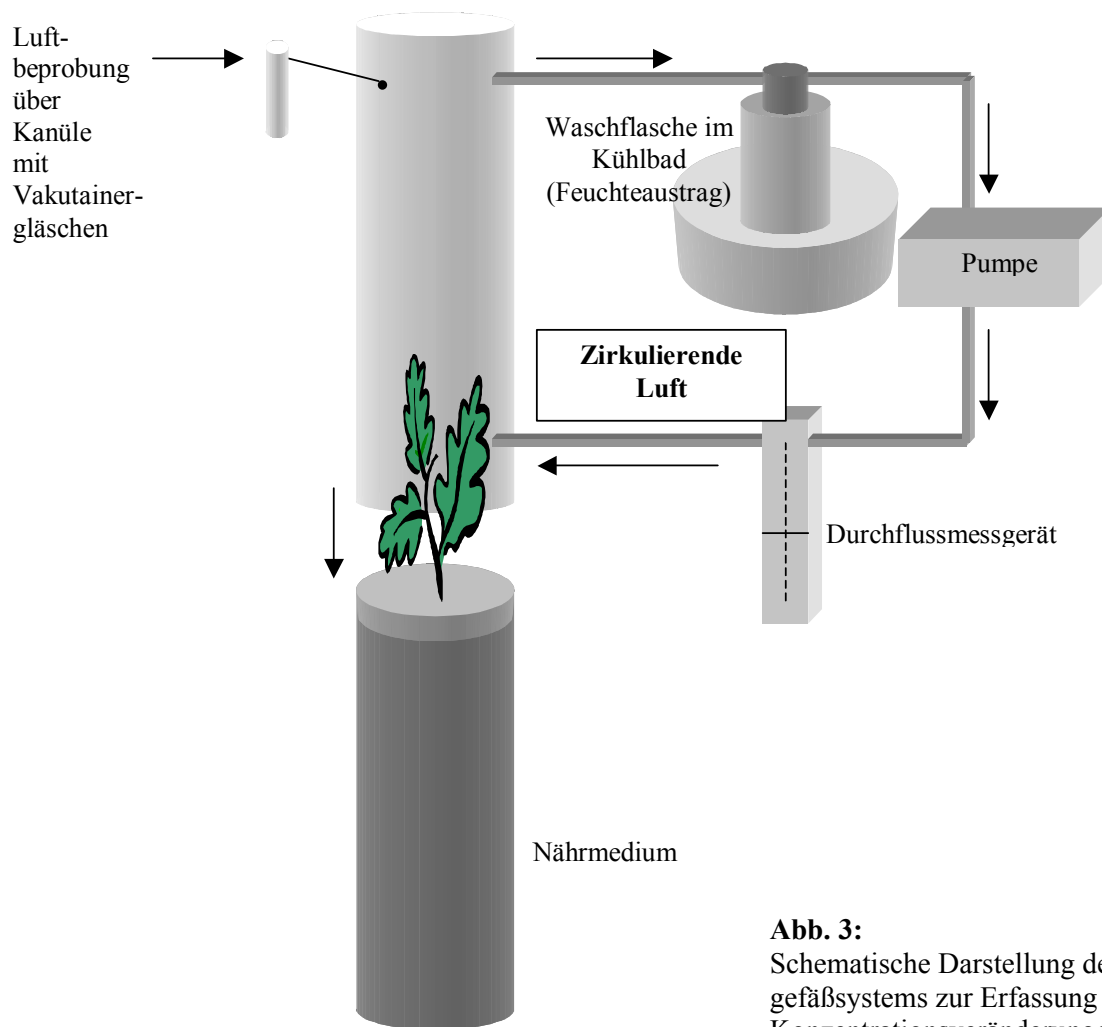


Abb. 3:
Schematische Darstellung des Haubengefäßsystems zur Erfassung von N_2O -Konzentrationsveränderungen

2.2.2. Messung der Lachgaskonzentration der Luft

Die N_2O -Probennahme erfolgte manuell mit zuvor evakuierten und mit Septen gasdicht verschlossenen Probeflaschen (22 ml-Vials). Unmittelbar nach Ablauf der Akkumulationszeit wurden in zweifacher Wiederholung Proben der Haubeninnenluft gezogen. Dazu wurde mittels einer Kanüle durch eine entsprechende Vorrichtung im Luftzirkulationssystem in das Innere der Haube eingestochen. Durch Einstechen der vorbereiteten Probeflasche am anderen Ende der Kanüle wurde die Luftprobe entnommen.

Die Bestimmung der N_2O -Hintergrundkonzentration erfolgte zu Beginn und nach Ablauf der Akkumulationszeit. Dabei wurde die äußere, die Hauben umgebende Atmosphärenluft in derselben Vorgehensweise beprobt. Die Erfassung der N_2O -Hintergrundkonzentration war für die Auswertung der N_2O -Konzentrationsveränderungen innerhalb der Hauben wichtigste Voraussetzung.

Der N_2O -Gasfluss lässt sich mit Hilfe einer linearen Regression aus dem Konzentrationsanstieg - oder der Konzentrationsabnahme - und dem Zeitraum der Akkumulationsdauer unter Berücksichtigung des Haubenvolumens und der Haubengrundfläche berechnen.

2.2.3. Analyse der Gasproben

Die Gasproben wurden am Gaschromatographen (HP 5890) unter Einsatz eines Elektroneneinfangdetektors (ECD) analysiert (Leick, 2004).

2.3. Analytische Methoden und Bestimmungen

2.3.1. Ernte der Pflanzen und Probenaufbereitung

Nach der Ernte erfolgte die Bestimmung des Frischgewichtes der Pflanzen. In Abhängigkeit von dem Entwicklungsstatus der Pflanzen zu Versuchsende wurde bei Weizen der oberirdische Gesamtspross im Ganzen oder unterteilt in 'Ähren' und 'ährenloser Restspross' gewogen und auf den Gesamt-N-Gehalt (2.3.2.), die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen (2.3.3.), die Konzentration an löslichen Aminosäuren (2.3.4.) sowie den Carboxylgehalt (Alkalität) (2.3.5.) analysiert.

2.3.1.1. Trocknung und Gefrier Trocknung

Zur Bestimmung der Trockenmasse wurde das pflanzliche Material bei 65°C im Umluft-trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die während der Versuchsdauer abgefallenen und gesammelten Blätter wurden ebenfalls getrocknet. Das getrocknete Pflanzenmaterial wurde staubfein vermahlen und in kleinen Tüten aufbewahrt.

Bei der Gefrier Trocknung wurde frisches Sprossmaterial klein geschnitten, in flüssigem Stickstoff schockgefroren und im Gefrierschrank bei -22°C aufbewahrt.

2.3.1.2. Heißwasser-Extraktion

Für die Wasserextraktgewinnung wurde eine bestimmte Menge TM in Kölbchen eingewogen, mit H_2O dest. versetzt und im Schüttelbad bei 100°C für zwei Stunden extrahiert. Nach dem Abkühlen auf Zimmertemperatur wurden die Kölbchen aufgefüllt, geschüttelt und über stickstofffreie Faltenfilter filtriert. Die Extrakte wurden entweder sofort eingesetzt oder im Gefrierschrank bei -22°C aufbewahrt. Zur Bestimmung löslicher Aminosäuren wurde die Wasserextraktion 30 min bei 60°C im Schüttelwasserbad durchgeführt.

2.3.1.3. Herstellung von Frischpflanzenhomogenat

Zur Gewinnung von Frischpflanzenhomogenat wurde frisches, grob zerkleinertes Sprossmaterial in 5 %-iger Phosphorsäure gemörsert und anschließend bei einer Zentrifugalbeschleunigung von 9000 g für 15 min zentrifugiert. Der Überstand diente als Probe.

2.3.1.4. Gewinnung von Apoplastenflüssigkeit

Die interzelluläre Waschflüssigkeit (IWF) wurde aus frischem Blattmaterial gewonnen. Dazu wurden Weizenblätter bei ca. 0,5 kPa vakuumfiltriert. Um nur den Anteil an wasserlöslichen Ionen zu erhalten, wurde als Infiltrationslösung bidestilliertes Wasser verwendet. Im Anschluss an das Infiltrieren wurden die Blätter vorsichtig abgetrocknet und auf die Hälfte geknickt. Mit der Schnittfläche nach oben angeordnet wurden sie anschließend in einer PE-Spritze zentrifugiert. Die optimalen Bedingungen zur Gewinnung von interzellulärer Waschflüssigkeit waren 15 min Infiltrationszeit, 15 min Belüftungszeit, 20 min Zentrifugationsdauer und 1000 g Zentrifugalbeschleunigung. Die symplastische Verunreinigung wurde mit Hilfe des Marker-Enzyms Malat-Dehydrogenase (MDH) bestimmt. Dabei wurden in Halbmikroküvetten 25 μl NADH (3 mM), 50 μl Probe und 375 μl Tris-Puffer (50 mM, pH 9,5) pipettiert und vermischt. Die Messung erfolgte am Spektralphotometer. Durch Zugabe von 300 μl Oxalacetat (1 mM, in Tris-Puffer gelöst) wurde die Reaktion gestartet und die Extinktionsabnahme gemessen.

2.3.2. Gesamtstickstoffbestimmung im pflanzlichen Gewebe

Der Gesamtstickstoffgehalt wurde mit einem Makro-N (Heraeus) bestimmt.

2.3.3. Bestimmung der freien Ammonium-Ionen

Die Bestimmung der NH_4^+ -Konzentrationen wurde zum einen im Wasserextrakt an einem Dreikanalautoanalyser (Technicon), zum anderen im Frischpflanzenhomogenat unter Einsatz eines Enzymtests vorgenommen.

Der photometrische Nachweis des NH_4^+ -Ions bei einer Wellenlänge von 660 nm basiert auf der Komplexbildung zwischen NH_4^+ , Salicylat und freiem Chlor in Gegenwart von Nitroprussid. Die Farbintensität dieses grünen Komplexes ist das Maß für die NH_4^+ -Konzentration.

2.3.4. Gesamtaminosäurebestimmung

Die Bestimmung der löslichen Aminosäuren erfolgte nach der Ninhydrin-Methode von ROSEN (1957). Durch Reaktion mit Ninhydrin entsteht ein tieferer Farbkomplex, dessen Intensität im Vergleich zu einer Leucin-Eichreihe bei 570 nm photometrisch bestimmt wird. Für die Bestimmung wurde 0,5 ml Lösung aus der Wasserextraktion eingesetzt.

2.3.5. Alkalitätsbestimmung

Der Carboxylgehalt wurde nach der Methode von JUNGK (1968) in der pflanzlichen Asche bestimmt. Das Prinzip beruht darauf, dass organische Metallsalze bei der Veraschung in Carbonate überführt werden. Säurezugabe verursacht den Zerfall dieser Carbonate, so dass durch Rücktitration mit Lauge der freie Carbonatgehalt der Lösung ermittelt wird, welcher der Menge an organischen Anionen, Carbonaten und Bicarbonaten entspricht.

2.3.6. Stickstoffbestimmung im Sandkultursubstrat (N_{\min})

Nach mehrmaligem Durchspülen des Quarzsandes zu Versuchsende wurden 100 g des Materials mit 250 ml 0,025n CaCl_2 -Lösung extrahiert (Schütteldauer 1 Std.). Die Messung von Ammonium und Nitrat erfolgte im Filtrat am Autoanalyser (Technicon Autoanalyser II).

2.4. Statistische Auswertung

Die Möglichkeit der statistischen Auswertung bei den Windtunnelversuchen war infolge der begrenzten Anzahl von Versuchsflächen mit maximal zwei direkten Messwiederholungen stark eingeschränkt. Hier wurden daher nur Mittelwerte und Standardfehler errechnet.

Die statistische Auswertung der Haubengefäßversuche erfolgte nach dem Modell einer randomisierten Blockanlage mit dem Programm von SAS. Die Daten wurden auf Normalverteilung und Homogenität der Varianzen geprüft. In Fällen, in denen keine Normalverteilung gegeben war, wurden die Daten transformiert und anschließend verrechnet.

Multiple Mittelwertvergleiche wurden mit Hilfe des Tukey-Tests bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % überprüft.

Die Ertragsfaktoren wurden mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % überprüft.

Bei der Auswertung und Darstellung der Daten wurden die Programme Excel (Microsoft) und Sigma Plot (Jandel Scientific) verwendet.

2.5. Gefäßversuche zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Sommerweizen bei unterschiedlicher Stickstoff-Angebotsmenge

Die folgenden Versuche dienen dem Ziel, die NH₃-Emissionen bei Sommerweizen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen zu untersuchen. Dabei kam neben der Windtunnelmethode auch die Haubengefäßmethode zur Erfassung von NH₃-Konzentrationsveränderungen zum Einsatz. Ferner erfolgten die Untersuchungen mit verschiedenen Kulturmedien. Dabei wurde zwischen Quarzsand-, Mineralboden- und Nährlösungskulturen unterschieden.

2.5.1. Experiment 1: Quarzsandkulturversuch

Ziel dieses Versuches war es, im Hinblick auf die unterschiedlichen Untersuchungsergebnisse aus der Literatur die NH₃-Emissionen aus Sommerweizen über die gesamte Vegetationszeit hinweg zu erfassen und die Menge des eingesetzten Gesamt-Stickstoffs zu Versuchsende zu bilanzieren. Zusätzlich sollte die N-Angebotsmenge variiert werden.

Die Durchführung des Versuches, der sich in zwei aufeinanderfolgende, aber vollkommen eigenständige Einzelversuche (B1/B2) unterteilte, erfolgte von März bis Oktober 1996. Mit Hilfe der Windtunnelmethode wurden die NH₃-Emissionen der Versuchspflanzen während nahezu jeder Entwicklungsphase erfasst.

VERSUCHSPFLANZEN

Als Versuchspflanzen wurde Sommerweizen, *Triticum aestivum* L. cv. Remus, eingesetzt. Dabei richtete sich die Sortenwahl nach der pflanzlichen Wuchshöhe beziehungsweise der zu erwartenden Strohlänge. Eine nur begrenzte Höhenverstellbarkeit der Versuchsflächenabdeckung im Windtunnel bestimmte in besonderem Maße die Sortenwahl. So war der Einsatz einer kurzstrohigen Sorte Voraussetzung für die bis zur Reife der Pflanzen andauernden Untersuchungen. In allen später aufgeführten Untersuchungen mit Sommerweizen kam ebenfalls diese Sorte zum Einsatz.

Der Gesamtversuch B1/B2 (Tab.1) beinhaltete die drei Stickstoff-Versorgungsvarianten N1 für *suboptimale*, N2 für *optimale* und N3 für *N-überversorgte* Pflanzen. Die N2-Variante übernahm dabei die Funktion der Kontroll-Variante. In der ersten Untersuchung (B1) wurde zwischen den beiden Varianten N1 und N2, in der zweiten Untersuchung (B2) zwischen den Varianten N2 und N3 unterschieden.

Zusätzlich wurde in beiden Einzelversuchen eine Bilanzierung des eingesetzten Stickstoffs durchgeführt. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten zur Durchführung des Quarzsandkultur-Bilanzierungsversuches zusammengestellt.

Tab. 1: Versuchsdaten zu Experiment 1: Quarzsand-Bilanzierungsversuch mit Sommerweizen (Windtunnelversuche mit zwei Wiederholungen)

Sommerweizen N1 / N2 / N3	Versuchs- zeitraum	Mess- dauer [d]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Zt. d. Messungen
1. Teilversuch: B 1: N1 / N2	März bis Juni 1996	116	28-144	Ende der Bestockung bis Vollreife
2. Teilversuch: B 2: N2 / N3	Juli bis Okt. 1996	122	27-149	Ende der Bestockung bis Vollreife

* bezogen auf Tage nach Aussaat

VERSUCHSGEFÄß

Die Durchführung einer N-Bilanzierung erforderte einen besonderen Aufbau der Versuchsgefäße. Gleichzeitig wurde die Gestaltung der Gefäße von versuchs- und messtechnischen Anforderungen im Windtunnel bestimmt.

Das einzelne Gefäß bestand aus zwei identischen Vierkant-Behältern, die ineinander gesetzt wurden. Das obere der beiden Behältnisse wurde im Bodenbereich an den vier Ecken aufgebohrt, um einen Abfluss von Sickerlösung zu gewährleisten. Um zu verhindern, dass Substratmaterial und Pflanzenwurzeln durch die Bohröffnungen gelangen, wurden diese mit Gaze-Auflagen versehen. Das untere Behältnis diente zum Auffangen von Sickerlösung. Über einen feinen PVC-Schlauch am Boden des Untergefäßes wurde mit Hilfe einer Vakuumpumpe durchgesickerte Flüssigkeit in einen Glaskolben gesaugt. Eine leichte Schrägstellung des Gefäßes gewährleistete die vollständige Entnahme der Sickerlösung. Nach der quantitativen Erfassung wurde die Flüssigkeit erneut auf die Substratoberfläche im oberen Gefäß gegossen. Damit war ein vereinfachtes Wasser- und Nährstoffkreislaufsystem geschaffen.

Während der Messungen im Windtunnel erfolgte die Wasser- und Nährlösungsversorgung der Pflanzen über ein speziell angelegtes Bewässerungs- und Drainagesystem. Hierzu wurden im oberen Bereich der Messflächenabdeckung des Windtunnels (Plexiglasaufsatz) kleine Öffnungen gebohrt und dünne Schläuche aus schwarzem PVC hindurchgeführt. Für jedes einzelne Versuchsgefäß wurde ein separater Versorgungsschlauch angebracht, der jeweils bis zur Substratoberfläche reichte und dort durch eingebaute, perforierte Verteilerstücke gitterförmig auf der gesamten Substratoberfläche ausgelegt war. Dadurch wurde eine gleichmäßige Wasser- und Nährstoffversorgung der Versuchspflanzen gewährleistet.

Das Absaugen der Sickerlösung erfolgte während der Messungen über ein entsprechendes Entwässerungssystem. Durch Bohrlöcher im unteren, seitlichen Bereich der Messflächenabdeckung (Plexiglasaufsatz) wurde der zum Absaugen benötigte Schlauch, welcher der oben beschriebenen Entnahme der Sickerlösung diente, aus dem Windtunnel herausgeführt. Jedes einzelne Versuchsgefäß war mit dieser Vorrichtung ausgestattet.

Maximal drei Tage zirkulierte die durchgesickerte Nährlösung innerhalb des beschriebenen Kreislaufsystems. Danach erfolgte die Zufuhr einer frischen Lösung und ein Durchspülen von Schläuchen und Glaskolben mit entionisiertem Wasser. Die ausgetragene Sickerlösung wurde quantitativ erfasst und auf ihren Stickstoffgehalt hin analysiert.

Diese aufwendige Gestaltung der Versuchsgefäße war erforderlich, da ein Öffnen des Windtunnels während der Messungen nicht erfolgen durfte.

SUBSTRAT

Als Kultursubstrat wurde Quarzsand eingesetzt. Die Verwendung eines Gemisches verschiedener Korngrößen hatte positiven Einfluss auf den Luft- und Wasserhaushalt. Der Feinsandanteil verhinderte ein zu schnelles Durchlaufen der zugeführten Nährlösung. Die gröbere Sandkörnung ermöglichte eine effektive Drainagewirkung. Eine im Bodenbereich des Versuchsgefäßes angelegte Drainschicht aus sehr grobem Quarzsand gewährleistete ein vollständiges Abfließen von Sickerlösung. So konnte Staunässe nahezu ausgeschlossen werden. Gerade im Hinblick auf die anstehende N-Bilanzierung galt der Vermeidung von anaeroben Verhältnissen größtes Interesse. Nur durch das Verhindern reduzierender Bedingungen im Boden lassen sich mögliche Denitrifikationsverluste weitgehend unterbinden.

Neben der günstigen Porengrößenverteilung bot das Quarzsandgemisch in Bezug auf die Durchführung der N-Bilanzierung einen besonderen Vorzug. *Bodenbiologische Umsetzungsprozesse*, wie sie in einem Mineralboden mit organischer Substanz bei Anwesenheit entsprechender Mikroorganismen-Populationen erfolgen, waren in reinen Quarzsand-Kulturen nicht zu erwarten.

Für das pflanzliche Wachstum stellt ein Quarzsandkultursubstrat allerdings keine optimalen Bedingungen dar. Daher wurde im Vorfeld über die Auswahl weiterer Kulturmedien nachgedacht und die Verwendbarkeit verschiedener Substrate getestet.

Perlite - eine Art Gesteinsschaum, der durch Erhitzung vulkanischen Gesteins (Liparit) entstanden ist - bietet einen ausgeglichenen Wasser- und Lufthaushalt. Aus arbeitstechnischer Sicht ist das nährstoffarme Material aufgrund seiner geringen Dichte bei der Durchführung von Windtunnelversuchen sehr vorteilhaft. In Vorversuchen wurde daher die Eignung von Perlite als Substrat für die anstehenden Untersuchungen geprüft. Dabei galt zu klären, ob sich zugeführtes NH_4^+ - in Form einer Nährlösungsgabe - vollständig durch Auswaschung zurückgewinnen ließe. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass ein erheblicher Anteil des eingesetzten Ammoniums trotz mehrfachen Durchspülens nicht zurückgewonnen werden konnte. Es wurde vermutet, dass NH_4^+ in den durch thermischen Aufschluss entstandenen sehr feinen Hohlräumen des Perlite-Materials sorbiert wurde. Demzufolge erwies sich das Material für die anstehenden Untersuchungen als ungeeignet.

NÄHRSTOFFVERSORGUNG: DÜNGUNG

Die Nährstoffversorgung erfolgte über die Zufuhr einer Düngerlösung. Der Stickstoff wurde in Form von Nitrat (NO_3^- -N) verabreicht. Es wurde zwischen den drei N-Angebotsvarianten N1, N2 und N3 unterschieden. Dabei wurden insgesamt 2,5 g (N1), 5,0 g (N2) und 6,5 g (N3) NO_3^- -N pro 14 kg Quarzsand gedüngt. Die Stickstoff-Angebotskonzentrationen lagen bei 5, 10 und 13 mM, entsprechend den Versuchsvarianten N1, N2 und N3. In Tabelle 2 ist die Zusammensetzung der in diesem Versuch eingesetzten Nährlösung aufgeführt. Die angegebene Konzentration der einzelnen Nährelemente stellt die Endkonzentration der Düngerlösung dar.

Tab. 2: Zusammensetzung der Nährlösung des Quarzsand-Bilanzierungsversuches

Makro-Nährstoff	Nährsalz	Konzentration Nährlösung [M]	Mikro-Nährstoff	Nährsalz	Konzentration Nährlösung [M]
Kalium	K_2SO_4	$3,5 \cdot 10^{-3}$	Mangan	MnSO_4	$2,5 \cdot 10^{-6}$
	KCl	$5,0 \cdot 10^{-3}$	Zink	ZnSO_4	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Stickstoff (Calcium)	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	Kupfer	CuSO_4	10^{-6}
		$10,0 \cdot 10^{-3}$	Molybdat	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$
		$13,0 \cdot 10^{-3}$	Eisen	FeEDTA	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Magnesium	MgSO_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$			
Phosphor	KH_2PO_4	$5,0 \cdot 10^{-3}$			

Die Zufuhr der Düngerlösung erfolgte mehrmals täglich. Dabei richtete sich die Menge und Konzentration der Lösung nach dem Entwicklungsstadium der Pflanzen sowie nach den Witterungsbedingungen (Sonneneinstrahlung und Wärmeentwicklung). Insbesondere zu Versuchsbeginn und gegen Ende der Vegetationszeit wurde zusätzlich entionisiertes Wasser gegossen. Zur Gewährleistung einer bestmöglichen Versorgung der Pflanzen wurde die durchgesickerte Lösung 2-3 mal am Tag entnommen und erneut zugeführt. Um einer Algenbildung und einer zu starken Entwicklung von Mikroorganismen entgegen zu wirken, erfolgte nach jeweils drei Tagen die Entnahme der Sickerlösung und die Reinigung von Auffanggefäß und Schläuchen.

PFLANZENANZUCHT

Durch Zugabe einer bestimmten Menge an entionisiertem Wasser wurde die Quarzsandmischung vor Aussaat angefeuchtet. Durchgesickertes Wasser wurde erneut von oben auf die Substratoberfläche gegossen. Auf diese Weise wurde der Sand für den anstehenden Keimvorgang des Samens ausreichend feucht gehalten. Die Einstellung einer bestimmten Bodenfeuchte

über die Bestimmung der maximalen Feldkapazität kann, im Gegensatz zu einem Mineralboden, bei einer reinen Quarzsandkultur infolge der hohen Drainagewirkung nicht erfolgen.

Vor der Aussaat wurde der Weizensamen zwölf Stunden lang in belüfteter, gesättigter CaSO_4 -Lösung vorgequollen. Diese Vorbehandlung des Saatgutes erfolgte ebenfalls bei allen später dargestellten Mineralbodenkulturversuchen. Im Anschluss daran wurden die Körner auf der Oberfläche des Quarzsandes im Versuchsgefäß gleichmäßig ausgelegt und mit einer feinen Auflage gröberer Quarzsandmaterials abgedeckt. Pro Versuchsgefäß wurden 50 Saatkörner verteilt. Vierzehn Tage später erfolgte eine Reduzierung der jungen Keimpflänzchen auf 25 Stück pro Gefäß.

Der infolge Evaporation und Transpiration entstandene Wasserverlust im Versuchsgefäß wurde täglich gravimetrisch erfasst. Durch Zugabe der entsprechenden Wassermenge wurde die Differenz zum Sollwert ausgeglichen.

Zehn Tage nach Aussaat erhielten die Pflanzen die erste Düngerlösung, die auf 1:3 verdünnt worden war. Eine anschließende Wasserzufuhr diente der Verhinderung möglicher Salzschäden im Wurzelbereich. Die aufgefangene Sickerlösung wurde erneut verabreicht.

Die Durchführung der Pflanzenanzucht erfolgte unter kontrollierten Bedingungen in der Vegetationshalle mit 16/8 h Licht/Dunkel-Rhythmus, bei 25/22°C Lufttemperatur und 60-70 % relativer Luftfeuchtigkeit. Das natürliche Licht wurde durch eine Zusatzbelichtung mit einer photosynthetisch aktiven Strahlung von $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in Pflanzenhöhe für 16 Stunden am Tag ergänzt.

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

Zwei Tage vor Messbeginn wurden die Versuchsgefäße in den Bodenkästen der Windtunnelanlage platziert. In beiden Einzelversuchen befanden sich die Versuchspflanzen zu diesem Zeitpunkt am Ende der Bestockungsphase (EC Stadium: 28).

Aus den extra für Analysenzwecke angesetzten Versuchsgefäßen, die während der gesamten Versuchsdauer in der Vegetationshalle standen, wurden einzelne Pflanzenproben entnommen und auf ihren N-Gehalt (N-Konzentration im oberirdischen Gesamtspross) hin überprüft. Im Hinblick auf das zu untersuchende NH_3 -Emissionsverhalten der Pflanzen war diese Erhebung von entscheidender Bedeutung.

Die Gesamtdauer der NH_3 -Messungen im Windtunnel betrug bei Teilversuch 1 (B1) 116 Tage und bei Teilversuch 2 (B2) 122 Tage (Tab. 1). Die Messintervalle wurden aus arbeitstechnischen Gründen auf genau 24 h eingestellt. Folglich entsprachen die einzelnen Messergebnisse Tageswerten.

Wie vermutet - und bereits in anderen Arbeiten beschrieben (Schjoerring et al., 1991) -, erfolgt der NH_3 -Gasaustausch zwischen Pflanze und der sie umgebenden Luft überwiegend auf stomatärem Wege. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde über wenige Tage hinweg ein Tag-Nacht-Takt geschaltet. Dabei wurden die Messintervalle auf 12 h Tag und 12 h Nacht eingestellt. Wie die Ergebnisse (nicht dargestellt) zeigten, traten nur tagsüber NH_3 -Konzentrationsveränderungen (Emissionen) auf. Bei der Auswertung der Gesamt- NH_3 -Emissionsverluste aller Versuche dieser Arbeit wurden die Tages- und Nachtmesswerte summiert.

Nach Ablauf der Untersuchungen wurden die voll ausgereiften Pflanzen geerntet. Dabei wurde jedes einzelne Versuchsgefäß separat ausgewertet. Zunächst wurde das gesamte oberirdische Sprossmaterial am Hypokotyl abgetrennt und gewogen. Anschließend wurde die Ähre entfernt und ebenfalls gewogen. Beide Fraktionen - Ähre und ährenloser Spross - wurden bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und zur Bestimmung des Trockengewichtes erneut gewogen. Ein Teil des Materials wurde für Analysenzwecke in einer Scheibenschwingmühle staubfein gemahlen.

Die Wurzeln wurden aus dem Sand über einem Sieb ausgewaschen. Das bei diesem Vorgang angefallene Wasser wurde quantitativ genau erfasst und die N-Konzentration darin bestimmt. Dabei erwies sich der Quarzsand erneut als sehr vorteilhaft, da sich die Wurzeln in ihrer Ge-

samtheit sehr gut herauslösten und sich anhaftende Sandkörner leicht entfernen ließen. Es wurden Frisch- und Trockengewicht bestimmt sowie die N-Konzentration in der Trockenmasse gemessen.

Der im Gefäß verbliebene Quarzsand wurde mehrfach mit entionisiertem Wasser durchgespült und anschließend über einem feinmaschigen Sieb gewaschen, um den gesamten Reststickstoff zu erfassen. Zuletzt erfolgte die Durchführung einer N_{\min} -Analyse.

Am Technikon-Autoanalyser wurden die N-Konzentrationen der pflanzlichen Proben sowie aller mit Dünger-N 'verunreinigten' Lösungen getrennt nach den Fraktionen Nitrat-, Ammonium- und organischer Stickstoff bestimmt.

STICKSTOFFBILANZIERUNG

Bei der N-Bilanzierung wurde der Verbleib des eingesetzten Dünger-N überprüft. Dabei wurde die gesamte, über die Vegetationszeit in Einzelgaben verabreichte N-Düngermenge summiert und als N-Input vermerkt.

Der in Nährlösung verabreichte Stickstoff ließ sich in verschiedenen Fraktionen wiederfinden. Der überwiegende Anteil wurde von den Pflanzen aufgenommen und in PFLANZLICHE BIOMASSE *eingebaut*. Ferner befanden sich in der SICKERLÖSUNG und im Nährmedium (SUBSTRAT) bestimmte Mengen an Dünger-N. Die N-Verluste in Form von NH_3 -EMISSIONEN aus Pflanzen stammten ebenfalls aus dem N-Düngerdepot. Die Summe dieser Teilbereiche ergaben den sogenannten N-Output, der bei der N-Bilanzierung dem N-Input gegenübergestellt wurde.

Zwischen den beiden Fraktionen SICKERLÖSUNG und SUBSTRAT konnte keine klare Trennung erfolgen. Außerdem ergab die N_{\min} -Analyse des gewaschenen Quarzsandes nur geringe Konzentrationen an verbliebenem Reststickstoff. Daher wurden beide Fraktionen zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet.

Nach dem Errechnen des N-Outputs erfolgte für jede Versuchsvariante die vergleichende Gegenüberstellung mit dem N-Input.

2.5.2. Experiment 2: Mineralbodenversuche

Die folgenden Versuche dienten der Ergänzung und Absicherung bisheriger Untersuchungsergebnisse über den Einfluss der N-Angebotsmenge auf die Höhe der NH_3 -Emissionsverluste bei Sommerweizen. Durch den Einsatz von Mineralboden als Kulturmedium sollte der *Bezug zur Praxisnähe* verbessert werden. Ferner hatten diese Versuche zum Ziel, als Vergleichsbasis für die Bewertung der NH_3 -Emissionsverluste des vorangestellten Quarzsandkulturversuches zu dienen. So sollte durch eine vergleichende Gegenüberstellung der NH_3 -Emissionsdaten beider Experimente Aufschluss über den Einfluss des Kulturmediums gewonnen werden.

Der Versuch setzte sich aus zwei voneinander unabhängigen Einzelversuchen zusammen. Die Erfassung der NH_3 -Emissionsverluste erfolgte mit Hilfe der Windtunnelmethode.

VERSUCHSPFLANZEN

Als Versuchspflanze wurde erneut Sommerweizen, *Triticum aestivum* L. cv. Remus, eingesetzt. Es wurde zwischen zwei Stickstoff-Versorgungsstufen unterschieden. Bei der N1-Variante waren die Versuchspflanzen *suboptimal*, bei der N2-Variante *optimal* mit Stickstoff versorgt.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Angaben zur Durchführung der beiden Einzelversuche aufgeführt. Infolge der hohen Anzahl durchzuführender Versuche war es erforderlich, die Dauer der NH_3 -Messungen im Windtunnel zeitlich zu begrenzen. Für die vergleichende Gegenüberstellung der NH_3 -Emissionsdaten aus verschiedenen Versuchen ist die Übereinstimmung der Länge des Messzeitraumes nicht erforderlich. Entscheidend ist vielmehr die Bezugnahme der erhobenen Messdaten auf das Alter bzw. auf eine definierte Entwicklungsphase der Versuchspflanzen.

Tab. 3: Versuchsdaten zu Experiment 2: Sommerweizen in Mineralboden (Windtunnelversuche)

Varianten: N1 / N2		Versuchs- Zeitraum	Mess- zeitraum [Datum]	Mess- dauer [d]	Pflanzenalter* ¹ z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Zt. d. Messungen
MB1 1. AS* ²	N1 / N2	03.06.97- 07.09.97	01.07.97- 31.08.97	62	28-93	Bestockung/Schossbeginn bis Milch-/Teigreife
MB1 2. AS* ²	N1 / N2	12.08.97- 20.09.97	31.08.97- 20.09.97	20	19-39	Bestockungsphase bis Schossphase

*¹ bezogen auf Tage nach Aussaat*² 1. AS = 1. Aussaatgeneration
2. AS = 2. Aussaatgeneration

VERSUCHSGEFÄßE UND SUBSTRAT

Als Grundvoraussetzung für den Einsatz von Mineralboden als Kultursubstrat bei der Untersuchung von NH_3 -Emissionsverlusten aus Pflanzen mussten Versuchsbedingungen geschaffen werden, die eine aus dem Boden stammende NH_3 -Ausgasung möglichst verhinderten. Dabei musste primär dem Auftreten reduzierender Verhältnisse im Boden entgegengewirkt werden. Über die Gestaltung der Versuchsgefäße - insbesondere des Be- und Entwässerungssystems - sowie über die Auswahl des Mineralbodentyps und der Stickstoff-Düngerform wurden entsprechende Bedingungen geschaffen.

Erneut kamen als Versuchsgefäße die Vierkant-Behälter zum Einsatz. Im Vergleich zu dem Quarzsandkulturversuch (Exp. 1) wurde bei Verwendung von Mineralboden der gesamte Gefäßboden perforiert, wodurch ein optimales Abfließen von Sickerwasser in das entsprechende Auffanggefäß möglich war. Mit einem Volumen von über 14 l war die Größe der Versuchsgefäße ausreichend, um den Wassergehalt im Boden über einen Zeitraum von bis zu 6 h ohne größere Schwankungen halten zu können. Die Einstellung des Wassergehaltes im Boden erfolgte bis zur maximalen Wasserkapazität. Als maximale Wasserkapazität (WK-max.) wird nach Schlichting und Blume (1966) bei gestörten Bodenproben die Menge an Wasser bezeichnet, die bei normalem Atmosphärendruck gegen die Schwerkraft gehalten wird. Der Wassergehalt des Bodens wird in Prozent der WK-max. angegeben.

Eine direkte Überprüfung des Bodenwassergehaltes der im Windtunnel platzierten Versuchsgefäße war während der Untersuchungen nicht möglich. Daher wurden bei allen, auch später aufgeführten Versuchen mit Mineralboden zusätzlich Versuchsgefäße angesetzt, die während der gesamten Versuchsdauer in unmittelbarer Umgebung, aber außerhalb des Windtunnels platziert waren und der gravimetrischen Erfassung des durch Transpiration und Evaporation entstandenen Wasserverlustes (Ist-Wert) während der Windtunnelmessungen dienten. Durch Zufuhr der entsprechenden Wassermenge wurde die Differenz zum Sollwert ausgeglichen. In Abhängigkeit von der Wärmeentwicklung durch Sonneneinstrahlung erfolgte dieser Vorgang ein- bis dreimal am Tag. Dabei kam das bereits im Quarzsandkulturversuch verwendete Be- und Entwässerungssystem erneut zum Einsatz.

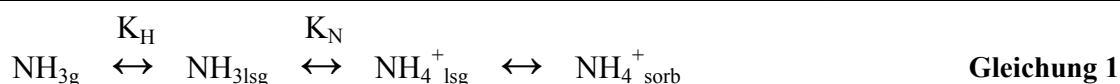
SUBSTRAT

Als Versuchsboden wurde ein stickstoffarmer schluffiger Sandboden mit einem pH-Wert von circa 4,5 aus Erlangen-Höchststadt eingesetzt. Der aus dem Sandgehalt resultierende hohe Grobporenanteil bewirkte einen ausgewogenen Luft- und Wasserhaushalt im Boden, was für die Vermeidung anaerober (reduzierender) Verhältnisse entscheidend war. So konnten bei sachgemäßer Bewässerung Denitrifikationsprozesse und dadurch verursachte NO_2 - und N_2 -Ausgasungen aus dem Boden verhindert werden. In Tabelle 4 sind die wichtigsten physikalischen und chemischen Eigenschaften des eingesetzten Mineralbodens aufgeführt.

Tab. 4: Kenndaten des Versuchsbodens 'Schluffiger Sandboden aus Erlangen'

Physikalische Parameter		Nährstoffgehalte	
Sand	80 %	P (CAL)	35 mg kg ⁻¹
Schluff	15 %	K (CAL)	45 mg kg ⁻¹
Ton	5 %	Mg (CAL)	40 mg kg ⁻¹
organische Substanz	2,2 %	pH (CaCl ₂)	4,5
WK-max	20,6 %	CaCO ₃	0 %

Der Versuchsboden war gekennzeichnet durch einen relativ niedrigen pH-Wert, der für die Entwicklung der Versuchspflanzen als ungünstig bis schädlich eingestuft wurde. Daher wurde der Boden-pH-Wert durch Aufkalken angehoben. Dazu wurden acht Wochen vor Aussaat 0,01% CaCO₃ [0,1 g kg⁻¹ Boden] unter den lufttrockenen Boden gemengt. Die pH-Wert-Anhebung war eine entwicklungsfördernde Maßnahme und diente dem optimalen Wachstum der Versuchspflanzen. Gleichzeitig aber musste die Entstehung von NH₃ im Boden, welche vom pH-Wert entscheidend beeinflusst wird (Court et al., 1964), unterbunden werden. Wie in Gleichung 1 dargestellt, liegt ammoniakalischer Stickstoff in wässriger Lösung in verschiedenen Fraktionen vor.



NH_{3g} stellt die Konzentration des gasförmig, und NH_{3lsg} die Konzentration des gelösten, in Wasser vorliegenden NH₃ dar. K_H (Henry-Konstante) bestimmt das Konzentrationsverhältnis zwischen NH_{3lsg} und NH_{3g}. K_N (Dissoziationskonstante) beschreibt das Verhältnis der Konzentrationen von NH₄⁺ und OH⁻ zu NH_{3lsg} (Mannheim, 1996). NH₄⁺_{lsg} ist die Konzentration des in Wasser gelösten, NH₄⁺_{sorb} die Konzentration des an Austauschoberflächen von Bodenkolloiden sorbierten NH₄⁺. Damit ist die Konzentration von NH_{3g} direkt proportional zu NH_{3lsg} und abhängig vom NH₄⁺-Gehalt der Lösung (Gl. 1). Das Verhältnis von NH₄⁺ und NH₃ in wässriger Lösung bei konstanter Temperatur ist vom pH-Wert abhängig. Oberhalb pH 7 nimmt der Anteil von NH_{3lsg} deutlich zu (Court et al., 1964). Hier können verstärkt Verluste von gasförmigem NH₃ auftreten. Daher erfolgte die Anhebung des pH-Wertes im Boden nur auf ein schwach saures Niveau (pH 5,1-5,4).

NÄHRSTOFFVERSORUNG: DÜNGUNG

Die Grunddüngung erfolgte in zwei Gaben. Zwei Drittel der Gesamtdüngermenge wurde vor dem Befüllen der Versuchsgefäße in Form gelöster Nährsalze unter den lufttrockenen, aufgekalkten Boden gemengt. Die Zugabe des weiteren Drittels erfolgte drei Wochen nach Aussaat der Pflanzen durch Applikation direkt auf die Substratoberfläche. Damit wurde eine bedarfsgerechte und nachhaltige Nährstoffversorgung der Pflanzen gewährleistet. Gegenüber der N2-Variante mit insgesamt 0,3 g N pro kg Boden erhielt die N1-Variante 0,1 g N pro kg Boden. Bei beiden Varianten wurde der Stickstoff in Form von Nitratstickstoff (NO₃⁻-N) verabreicht. In Tabelle 5 sind die eingesetzten Nährstoffmengen und -formen wiedergegeben. Im Vergleich zu dem Quarzsandkulturversuch, bei welchem die Nährstoffe durch den Austrag der Sickerlösung und die erneute Rückführung gewissermaßen zirkulierten, stand den Pflanzen bei den

Mineralbodenversuchen das gesamte Nährstoff-Reservoir kontinuierlich zur Verfügung. Dementsprechend lagen die Gesamtdüngermengen hier auf einem deutlich geringeren Niveau. Bei der Befüllung der Versuchsgefäße wurde zuerst eine Schicht aus groben Quarzsand angelegt, um die Drainagewirkung sicherzustellen und ein Verstopfen des perforierten Gefäßbodens mit feinem Bodenmaterial zu verhindern. Das Mineralbodenmaterial wurde schichtweise in die Gefäße gegeben und auf eine Lagerungsdichte von $1,4 \text{ g cm}^{-1}$ verfestigt. Durch Zugabe von entionisiertem Wasser wurde eine Bodenfeuchte von circa 60 % WK-max. eingestellt. Im Anschluss daran folgte eine vierwöchige Ruhephase des Versuchsbodens.

Tab. 5: (Experiment 2): Düngermengen für Sommerweizen in g oder mg Reinnährstoff pro kg Boden

Makro-Nährstoffe	Nährstoff-Form	[g kg ⁻¹ Boden]	Mikro-Nährstoffe	Nährstoff-Form	[mg kg ⁻¹ Boden]
N	KNO ₃	0,1 / 0,30	B	H ₃ BO ₃	0,3
P	K ₂ HPO ₄	0,1	Cu	CuSO ₄	1,0
K	KNO ₃ / K ₂ HPO ₄	0,2	Mn	MnSO ₄	10,0
Mg	MgSO ₄	0,2	Zn	ZnSO ₄	1,0
Ca (Kalkung)	0,1	CaCO ₃	Mo	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0,3
			Co	CoCl ₂	0,3
			Fe	Sequestren (6 % Fe ^{III})	120

PFLANZENANZUCHT

Bei allen Windtunnelversuchen mit Sommerweizenkulturen im Mineralboden erfolgte die Anzucht der Versuchspflanzen in gleicher Weise. 50 vorgequollene Saatkörner wurden gleichmäßig auf der Substratoberfläche der vorbereiteten Gefäße ausgelegt und mit Bodenmaterial und Quarzsand abgedeckt. Dabei hatte die Sandschicht die Funktion, Evaporationsverluste zu reduzieren. Unmittelbar nach Aussaat erfolgte durch Aufgießen mit entionisiertem Wasser eine Erhöhung der Bodenfeuchte auf 70 % WK-max. Das Wasserdefizit, das durch Evaporation und Transpiration entstanden war, wurde täglich gravimetrisch erfasst und durch Aufgießen ausgeglichen.

Vierzehn Tage nach Aussaat erfolgte eine Verminderung der Pflanzenanzahl auf 25 Pflanzen pro Versuchsgefäß. Die Versuchsgefäße waren ab dem Zeitpunkt der Befüllung bis zu Beginn der Windtunnelmessungen als vollständig randomisierte Versuchsanlage in der Vegetationshalle des Institutes platziert.

Nach Ablauf der Untersuchungen wurden die Pflanzen geerntet und die Bodenfeuchte überprüft. Dazu wurden die Bodenproben bei 105°C getrocknet. Eine Gegenüberstellung einzelner Versuchsgefäße sollte Aufschluss über eventuelle Ungenauigkeiten bei der Wasserversorgung geben.

Bei der Bestimmung der Ertragsparameter wurden jeweils zwei Einzelgefäße einer Versuchsvariante zusammen ausgewertet. Zunächst wurde das Frischgewicht des gesamten Sprossmaterials, anschließend das der abgetrennten Ähren separat bestimmt. Nach erfolgter Trocknung der Frischsubstanz bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz wurden die Trockensubstanz-Gehalte (TS) ermittelt. Im Anschluss daran wurde das getrocknete Pflanzenmaterial - getrennt nach Ähre und übrigem Spross - mit einer Scheibenschwingmühle staubfein gemahlen und für später durchzuführende Analysen in einem Exikator gelagert. Diese Vorgehensweise war in allen weiteren Versuchen dieselbe. Bei nicht ausgereiften Pflanzen wurde der oberirdische Gesamtspross erfasst und ausgewertet.

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

Bereits 24 h vor Beginn der NH_3 -Messungen wurden die Versuchsgefäße zur Akklimatisierung der Pflanzen im Windtunnel platziert. Die Durchführung der Windtunnelmessungen der beiden Einzelversuche war direkt hintereinander geschaltet. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Versuchsdaten aufgeführt.

GEFÄßVERSUCH 1 - 1. AUSSAAT

Zu Beginn der Messungen in der ersten Juliwoche 1997 begannen die Pflanzen der N1-Variante bereits zu Schossen (EC-Stadium 31). Die Pflanzen der N2-Variante befanden sich zu diesem Zeitpunkt noch in der Bestockungsphase (EC-Stadium 28). Die Erfassung der NH_3 -Emissionsverluste erfolgte kontinuierlich über den gesamten, 62 Tage umfassenden Untersuchungszeitraum. Zu Versuchsende standen die Pflanzen der N2-Variante noch in der Phase der Milchreife, während die Pflanzen der N1-Variante den Übergang zwischen der Teig- und der Vollreife erreicht hatten.

GEFÄßVERSUCH 1 - 2. AUSSAAT

Auch die Versuchspflanzen der 2. Aussaat hatten zu Beginn der Windtunnelmessungen das Stadium des Schossens erreicht. Dabei wiesen die Pflanzen der N1-Variante im Vergleich zu den Pflanzen der N2-Variante erneut eine etwas fortgeschrittenere Entwicklung auf, was sich insbesondere in der Wuchshöhe darstellte. Gleichzeitig waren die Pflanzen der N1-Variante gegenüber den Pflanzen der N2-Variante durch einen schwächeren Gesamthabitus gekennzeichnet. Der Engpass bei der Belegung des Windtunnels hatte zur Folge, dass hier die NH_3 -Messungen über einen Zeitraum von nur drei Wochen erfolgen konnten.

2.5.3. Experiment 3: Nährlösungskulturversuche

Die folgenden Nährlösungskulturversuche dienten dem Ziel, weitere Ergebnisdaten über die Höhe von NH_3 -Emissionsverlusten aus Sommerweizen in Abhängigkeit vom N-Versorgungsgrad der Pflanzen bereitzustellen. Gleichzeitig sollten die bereits durchgeführten Untersuchungen mit Quarzsand- und Mineralbodenkulturen ergänzt und deren Ergebnisse überprüft werden.

Ein Vorteil von in Nährlösung kultivierten Pflanzen gegenüber Kulturen in Mineralboden ist die größere Einflussnahme auf die Entwicklung junger Versuchspflanzen. Ein bedarfsgerechtes Angebot an Nährelementen sowie eine frühzeitige Selektion stellen die besonderen Vorzüge dar. So war bei Verwendung von Nährlösungskulturen auch der Einsatz sehr junger Versuchspflanzen möglich. Pflanzenbestände in Nährlösung entsprechen allerdings keinen natur- und praxisnahen Kultursystemen. Daher stellen die Versuchsergebnisse über die NH_3 -Emissionen nur relative Werte dar, deren Beurteilung unter diesem Vorbehalt erfolgen muss.

Die Erfassung der NH_3 -Emissionen aus Pflanzen erfolgte wie im vorangestellten Experiment mit der Windtunnelmethode. Vor der Planung und der Ausarbeitung einer Versuchsreihe musste zunächst die Eignung von Nährlösungskulturen für die Windtunnelmessungen geprüft werden. Insbesondere die Durchführung des während der Messungen erforderlichen Nährlösungswechsels gestaltete sich aus arbeitstechnischer Sicht als extrem aufwendig. So war für diesen Arbeitsvorgang ein Demontieren des Windtunnels erforderlich und folglich eine längere Unterbrechung der Messungen unumgänglich. Ferner mussten bei der Auswahl der Versuchsgefäße sowie bei der Gestaltung und Anordnung des Belüftungssystems bestimmte Kriterien berücksichtigt werden.

PFLANZENANZUCHT

Sommerweizen wurde unabhängig von der jeweiligen Versuchsfrage bei allen Untersuchungen mit Nährlösungskulturen in gleicher Vorgehensweise angezogen. Das unbehandelte, zertifizierte Saatgut wurde zur Verhinderung pilzlicher Infektionen vor Aussaat mit einer Trockenbeize behandelt. Die Keimung des Samens erfolgte mit Hilfe der 'Filterpapiertechnik'. Dabei wurden einzelne Saatkörner im oberen Randbereich einer vorweg hergestellten, sterilisierten

Filterpapiertasche ausgelegt und mit einer gesättigten Calciumsulfat-Lösung angefeuchtet. Durch beidseitiges Andrücken und das Übereinanderlegen mehrerer Filterpapiertaschen sollte ein Verrutschen der Saatkörner verhindert werden. Die gefüllten, dicht zusammengehaltenen Filterpapiertaschen wurden in einer abdeckbaren Kunststoffbox gerade stehend platziert und für zwei Tage in einem Wärmeschrank bei 27°C aufbewahrt. Anschließend wurde die Abdeckung entfernt und die Box für weitere zwei Tage in einer Klimakammer aufgestellt. Danach erfolgte das Umsetzen der jungen Keimpflanzen in die Versuchsgefäße.

Bei den Windtunnelversuchen kamen die unter 2.1.1.1. beschriebenen 6-Liter-Gefäße zum Einsatz. Mit einem Schaumstoffstreifen wurden jeweils zwei Keimlinge zusammen umwickelt und in einer der Bohröffnungen des Gefäß-Deckels fixiert. Pro Versuchsgefäß wurden zunächst zwanzig Pflanzen kultiviert. Im Anschluss daran wurden die Gefäße als vollständig randomisierte Versuchsanlage in der Vegetationshalle platziert.

Bei der Haubengefäßmethode wurden die empfindsamen Keimlinge in den Bohröffnungen des Zwischeneinsatzes der Versuchsgefäße (2.1.2.1.) mit Hilfe einer Knetmasse fixiert. Dabei wurden pro Bohröffnung ebenfalls zwei Keimlinge eingesetzt. Es wurde der Gefäßtyp A mit insgesamt sechs Einzelgefäßen gewählt, so dass bei den zwei zu untersuchenden Stickstoff-Versorgungsvarianten drei zeitgleiche Wiederholungen möglich waren.

Bei beiden Versuchssystemen (Methoden) erfolgte zehn Tage nach dem Umsetzen eine Reduktion der Pflanzenanzahl auf 10 Pflanzen pro Versuchsgefäß.

NÄHRSTOFFVERSORGUNG: ZUSAMMENSETZUNG DER STANDARDNÄHRLÖSUNG

Die Versorgung mit Nährstoffen erfolgte über eine Standardnährlösung für monokotyle Pflanzenarten. Der Stickstoff wurde in Form von Nitrat (NO_3^- -N) angeboten. In Tabelle 6 ist die Zusammensetzung dieser Standardnährlösung aufgeführt, die bei der Anzucht von Weizenpflanzen aller Nährlösungskulturversuche eingesetzt wurde. Die Angaben beziehen sich dabei auf die Endkonzentration des Nährmediums.

Die Konzentration der eingesetzten Nährlösung wurde dem Alter der Pflanzen angepasst. Sie war bei allen Wasserkulturversuchen anfänglich auf $\frac{1}{5}$ verdünnt und wurde innerhalb von zwei Wochen stufenweise auf die Endkonzentration angehoben.

VERSUCHSVARIANTEN

Es wurde zwischen zwei N-Versorgungsstufen (N1/N2) unterschieden. Dabei lag die N-Angebotsmenge der Pflanzen der N2-Variante im optimalen Bereich. So hatten die Pflanzen dieser Variante gleichzeitig Kontrollfunktion. Die N-Konzentration entsprach mit 2 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ der N-Konzentration der Standardnährlösung (Tab. 6). Die N-Angebotsmenge der N1-Variante wurde auf die Hälfte reduziert. Entsprechend lag die N-Konzentration hier bei 1 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Damit waren die Pflanzen dieser Versuchsvariante in Bezug auf die N-Versorgung unterversorgt.

Nach Ablauf der Anzucht- und Vorkulturphase (10 Tage nach Aussaat) erfolgte die Einstellung der Versuchsvarianten. Bis dahin waren alle Versuchspflanzen gleich versorgt. Der pH-Wert in der Nährlösung wurde manuell kontrolliert und bei Bedarf nachkorrigiert. Der Wechsel der Nährlösung erfolgte zunächst täglich, später nach jeweils drei Tagen.

In Übereinstimmung mit den Mineralbodenversuchen wurden bei allen Nährlösungsversuchen zusätzlich drei Gefäße pro Versuchsvariante angesetzt, die während des gesamten Versuchszeitraumes in der Vegetationshalle platziert waren und deren Pflanzen für Analysenzwecke eingesetzt wurden. Ein Teil der Pflanzenproben diente zur Gewinnung eines Frischpflanzenhomogenats, ein anderer Teil zur Herstellung pflanzlicher Trockenmasse. Die weitere Probenaufbereitung sowie die Durchführung der Analysen zur Bestimmung verschiedener Stoffwechselprodukte erfolgten zu einem späteren Zeitpunkt analog zu den Mineralbodenversuchen.

Tab. 6: Zusammensetzung der Standardnährlösung für monokotyle Pflanzenarten*

Makro-Nährstoff	Nährsalz	Konzentration (Nährlösung) [mM]	Mikro-Nährstoff	Nährsalz	Konzentration (Nährlösung) [μ M]
N	Ca(NO ₃) ₂	2,0	Fe	FeEDTA	50
P	KH ₂ PO ₄	0,1	Mn	MnSO ₄	6
K	K ₂ SO ₄	1,4	Zn	ZnSO ₄	1
K	KCl	0,1	Cu	CuSO ₄	1
Mg	MgSO ₄	0,5	B	H ₃ BO ₃	4

* verwendet bei den Varianten: 'Sommerweizen-N2' (Exp. 3), 'Sommerweizen-NO₃⁻-N' (Exp. 4) und 'Körnermais' (Exp. 11 u. 12)

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

Es wurden insgesamt fünf Einzelversuche mit Nährlösungskulturen durchgeführt, bei denen mit Hilfe der Windtunnelmethode die NH₃-Emissionen aus Sommerweizen bei unterschiedlichem N-Versorgungsangebot erfasst werden sollten. Tabelle 7 stellt eine Übersicht dieser Versuchsreihe dar. Die Windtunnelmessungen erfolgten über einen verhältnismäßig kurzen Untersuchungszeitraum (1 bis 5 Wochen). Dabei wurde das Pflanzenalter und folglich der Entwicklungsstatus der zu untersuchenden Pflanzen variiert. Im Mittelpunkt aller Untersuchungen stand erneut die Erfassung der NH₃-Emissionsverluste aus Pflanzen unter Berücksichtigung der Ertragsbildung und der N-Aufnahme. Darüber hinaus galt es, verschiedene Stoffwechselprodukte, die in Zusammenhang mit NH₃-freisetzenden und -assimilierenden Prozessen stehen, zu untersuchen sowie die Alkalität in der pflanzlichen Trockenmasse zu bestimmen.

Tab. 7: Versuchsdaten zu Experiment 3: Windtunnelversuche mit Sommerweizen in Nährlösung

Sommerweizen Varianten: N1 / N2	Versuchs- zeitraum [Datum]	Mess- dauer [d]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z.Zt. d. Messungen
Versuch 1 (NL 1)	25.02.97-11.04.97	7	37 - 44	Schossphase
Versuch 2 (NL 2)	07.03.97-15.05.97	11	59 - 70	Ährenschieben
Versuch 3 (NL 3)	14.03.97-25.05.97	12	62 - 74	Ährenschieben - Blühbeginn
Versuch 4 (NL 4)	06.08.97-18.09.97	18	25 - 43	Bestockung - Schossen
Versuch 5 (NL 5)	11.08.97-30.10.97	35	45 - 80	Schossen bis Teigreife

* bezogen auf Tage nach Aussaat

Unmittelbar vor dem Platzieren der Versuchsgefäße im Windtunnel erfolgte ein Nährlösungswechsel. Während der Messungen wurde die Nährlösung in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen alle zwei bis fünf Tage gewechselt. Dazu wurde das Messintervall unterbrochen. Das Herausnehmen der Gefäße erforderte ein Demontieren des gesamten Windtunnels. Nach erfolgtem Nährlösungswechsel wurden die Gefäße in gleicher Reihenfolge wie vorher im Windtunnel platziert. Durch das Öffnen des Windtunnels wurden die *mikroklimatischen Verhältnisse* im Versuchsflächenbereich - insbesondere in Bezug auf Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftzusammensetzung - verändert. Daher folgte nach dem erneuten Schließen des

Windtunnels eine 20 min andauernde Phase des *sich Wiedereinstellens ungestörter mikroklimatischer Verhältnisse*. Bei der späteren Berechnung der NH_3 -Emissionsverluste wurde die Unterbrechung der Messungen, die insgesamt 1 ½ Stunden andauerte, berücksichtigt.

Aufgrund sehr warmer Witterungsverhältnisse mit zum Teil extrem hohen Lufttemperaturen erfolgte bei den VERSUCHEN 4 und 5 im Abstand von 2 bis 3 Tagen ein Nährlösungswechsel. Nach Ablauf der Windtunnelmessungen wurden die Pflanzen geerntet und die Ertragsparameter bestimmt.

2.6. Gefäßversuche zur Erfassung von NH_3 -Emissionsverlusten aus Pflanzen in Abhängigkeit von der mineralischen N-Angebotsform

Die folgenden Versuche hatten zum Ziel, den Einfluss der mineralischen N-Angebotsform auf die NH_3 -Emissionen aus Pflanzen zu untersuchen. So wurde zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -N-Versorgung unterschieden.

Erneut stand die Erfassung der NH_3 -Emissionsverluste unter Berücksichtigung der Ertragsbildung und der N-Aufnahme der Pflanzen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Ferner sollten erneut verschiedene Stoffwechselprodukte, die mit der NH_3 -Freisetzung oder -Assimilation in Verbindung stehen, erfasst werden.

Die Untersuchungen erfolgten mit Sommerweizen, *Triticum aestivum* L. cv. Remus, der in Nährlösung kultiviert wurde.

2.6.1. Experiment 4: Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen bei Angebot von NH_4^+ -N und NO_3^- -N

Pflanzenanzucht

Die mit Hilfe der Filterpapiertechnik angezogenen Weizenkeimlinge wurden in verdünnter, NO_3^- -N beinhaltender Standardnährlösung für monokotyle Pflanzenarten vorkultiviert. Nach fünf Tagen wurde die Hälfte der Versuchspflanzen in ausschließlich NH_4^+ -N beinhaltende Nährlösung umgesetzt, während die andere Hälfte in der bisherigen Standardnährlösung kultiviert blieb. Die Konzentration der Nährlösung wurde in Abhängigkeit vom Pflanzenalter stufenweise auf die volle Konzentration angehoben.

Die Zusammensetzung der Nährlösungen ist in Tabelle 9 aufgeführt. Die eingesetzten Makronährstoffe sind in ihrer Endkonzentration angegeben. Die Versorgung mit Mikronährstoffen war bei beiden Versuchsvarianten dieselbe (Tab. 6).

Tab. 9: Zusammensetzung der Nährlösung (Makroelemente) für Sommerweizenkulturen bei Angebot von ausschließlich NO_3^- - und NH_4^+ -N

NO_3^- -N-Variante		Konzentration Nährlösung [mM]	NH_4^+ -N-Variante		Konzentration Nährlösung [mM]
N	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	2,0	N	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	2,0
P	KH_2PO_4	0,1	P	KH_2PO_4	0,1
K	K_2SO_4	0,7	K	K_2SO_4	0,7
	KCl	0,1		KCl	0,1
Mg	MgSO_4	0,5	Mg	MgSO_4	0,5
Ca	CaCl_2	-	Ca	CaCl_2	1,0
Ca	CaSO_4	-	Ca	CaSO_4	1,0

Bei ausschließlicher NH_4^+ -N-Ernährung fällt der pH-Wert der Nährlösung erheblich ab. Die NH_4^+ -Aufnahme stimuliert infolge einer starken Depolarisierung des elektrischen Membranpotentials die ATPase (Mengel, 1991) und folglich die Netto- NH_4^+ -Freisetzung an das Außenmedium (Schubert, 1990). Zur pH-Wert-Regulierung wurde der Nährlösung Calciumcarbonat (CaCO_3) zugesetzt. Mehrmals täglich wurde der pH-Wert manuell überprüft.

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELVERSUCHE

Es wurden drei voneinander unabhängige Versuche im Windtunnel durchgeführt, deren wichtigsten Daten in Tabelle 10 dargestellt sind. Nach Ablauf der NH_3 -Messungen wurden die Pflanzen geerntet und der Ertrag bestimmt.

Tab. 10: Versuchsdaten zu Experiment 4: Windtunnelversuche mit Sommerweizenkulturen in Nährlösung bei unterschiedlicher N-Angebotsform

Sommerweizen Varianten: NO_3^- -N / NH_4^+ -N	Versuchs- zeitraum [Datum]	Mess- dauer [d]	Pflanzenalter* z.Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z.Zt. d. Messungen
Versuch 1	10.01.97 - 05.05.97	18	98 - 116	Teig- bis Vollreife
Versuch 2	11.04.97 - 09.06.97	7	55 - 57	Ährenschieben
Versuch 3	19.09.97. - 01.11.97	23	20 - 43	Bestockung - Schossen

* bezogen auf Tage nach Aussaat

DURCHFÜHRUNG DER HAUBENGEFÄßVERSUCHE

Unter Einsatz der Haubengefäß-Versuchsanlage wurden insgesamt fünf Versuche durchgeführt, die ebenfalls der Erfassung der NH_3 -Emissionen aus Sommerweizen in Abhängigkeit von der N-Versorgungsform dienten. Neben der Überprüfung und Absicherung bisheriger Versuchsergebnisse galt es, Datenreihen zu ergänzen. So wurde erneut zwischen den N-Versorgungsvarianten ' NO_3^- -N' und ' NH_4^+ -N' unterschieden. In Tabelle 11 sind die wichtigsten Angaben zur Durchführung der Untersuchungen zusammengestellt.

Tab. 11: Versuchsdaten zu Experiment 4: Haubengefäßversuche mit Sommerweizenkulturen in Nährlösung bei unterschiedlicher N-Angebotsform

Sommerweizen Varianten: NO_3^- -N / NH_4^+ -N	Versuchs- zeitraum [Datum]	Mess- dauer [d]	Pflanzenalter* ¹ z.Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z.Zt. d. Messungen
Versuch 1	04.09.97 - 30.10.97	30	27 - 57	Schossbeginn - Ährenschieben
Versuch 2	10.09.97 - 06.10.97	7	13 - 20	Bestockung
Versuch 3	30.09.97 - 06.11.97	7	30 - 37	Schossen
Versuch 4	17.12.97 - 19.03.98	6* ²	unterschiedlich. Alter	versch. Wachstumsphasen
Versuch 5	27.03.98 - 27.06.98	7* ²	unterschiedlich. Alter	versch. Wachstumsphasen

*¹ bezogen auf Tage nach Aussaat *² keine kontinuierlichen Messungen: siehe Tabelle 12

Bei den VERSUCHEN 1, 2 und 3 wurden die Pflanzen nach Ablauf der NH_3 -Messdauer geerntet. Bei den VERSUCHEN 4 und 5 erfolgten die NH_3 -Messungen nicht wie gewohnt über einen kontinuierlichen Versuchszeitraum hinweg, sondern temporär während verschiedener Entwicklungsstadien. In Tabelle 12 sind die Termine der einzelnen Messungen aufgeführt. Nach Durchführung der letzten Messung wurden die Versuchspflanzen geerntet.

Zusätzlich zu den NH_3 -Emissionen wurden bei den VERSUCHEN 4 und 5 Lachgas-Konzentrationsveränderungen in unmittelbarer Umgebung der oberirdischen Pflanzensprosse untersucht. Die genauen Angaben zur Durchführung dieser Messungen sind unter 2.11. aufgeführt.

Tab. 12: Experiment 4: VERSUCHE 4 und 5: Termine zur Erfassung von NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenkulturen in Nährlösung bei Angebot von NO_3^- - und NH_4^+ -N

	VERSUCH 4: Erfassung NH_3 -Emissionen			VERSUCH 5: Erfassung NH_3 -Emissionen		
	Zeit [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungs- sta- dium	Zeit [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungs- sta- dium
I	27.01.97	41 Tage	Schossen	19.04.98	41 Tage	Schossen
II	02.02.97	47 Tage	Ende Schossen	11.05.98	45 Tage	Schossen
III	11.02.97	56 Tage	Beg. Ährenschieben	28.05.98	62 Tage	Ährenschieben
IV	19.02.97	64 Tage	Blühbeginn	03.06.98	68 Tage	Blüte
V	02.03.97	75 Tage	Ende d. Blüte	09.06.98	74 Tage	Ende d. Blüte
VI	19.03.97	92 Tage	Teigreife	20.06.98	85 Tage	Milchreife
VII				27.06.98	92 Tage	Teigreife

* bezogen auf Tage nach Aussaat

2.7. Gefäßversuche zur Erfassung von NH_3 -Emissionsverlusten in Abhängigkeit von dem Verhältnis an Nähranionen und Nährkationen

Die im Folgenden dargestellten Versuche dienen dazu, über die Form der angebotenen Nährstoff-Ionen den pflanzlichen Stoffwechsel und die NH_3 -Freisetzung bei Sommerweizen zu beeinflussen. Dabei wurde zwischen der Versorgung mit auf Chlorid basierenden Nährsalzen und der Versorgung mit auf Sulfat basierenden Nährsalzen unterschieden. Als N-Angebotsform wurde bei beiden Varianten NH_4^+ -N gewählt.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand erneut die Erfassung der NH_3 -Emissionen unter Berücksichtigung der Ertragsbildung und der N-Aufnahme der Versuchspflanzen. Zusätzlich wurde in einigen Versuchen die Apoplastenflüssigkeit der Pflanzen gewonnen und die darin enthaltene Konzentration an löslichen Aminosäuren und freien NH_4^+ -Ionen bestimmt.

Die gezielte Versorgung der Versuchspflanzen mit verschiedenen Nährsalzen setzte den Einsatz von Nährlösungskulturen voraus. Dabei war die Anfertigung geeigneter Stammnährlösungen erforderlich, deren Pflanzenverträglichkeit vorab geprüft werden musste.

2.7.1. Experiment 5: Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen unter Einsatz der

- Windtunnelmethode (Exp. 5a) und der
- Haubengefäßmethode (Exp. 5b)

PFLANZENANZUCHT UND NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Die Pflanzenanzucht erfolgte gemäß den vorangegangenen Nährlösungskulturversuchen mit NO_3^- -N-Standardnährlösung. In einem Alter von 8-12 Tagen wurden die jungen Pflanzen in chlorid- oder sulfatbetonte Nährkulturmedien mit ausschließlich NH_4^+ -N umgesetzt.

In Tabelle 13 ist die Zusammensetzung der Makronährstoffe der eingesetzten Kulturlösungen dargestellt. Die Zusammensetzung der Mikronährstoffe blieb gegenüber der NO_3^- -N-Standardnährlösung unverändert. Zur pH-Wert-Regulierung wurde dem Nährmedium Calciumcarbonat zugesetzt. Der Nährlösungswechsel erfolgte in Abhängigkeit von dem Alter der Pflanzen, den

Witterungsbedingungen sowie der pH-Wert-Entwicklung in der Nährlösung alle 2-4 Tage. Die Versuchspflanzen waren von der Keimung an bis zu Beginn der Windtunnelmessungen als vollständig randomisierte Versuchsanlage in der Vegetationshalle platziert.

Tab. 13: Experiment 5: Nährlösungszusammensetzung (Makronährstoffe) bei chlorid- bzw. sulfatbetonter Ernährung

	CHLORIDBETONT	Konzentration Nährlösung [mM]	SULFATBETONT	Konzentration Nährlösung [mM]
N	NH ₄ Cl	2,0	(NH ₄) ₂ SO ₄	2,0
P	KH ₂ PO ₄	1,0	KH ₂ PO ₄	0,1
	K ₂ HPO ₄	1,0	K ₂ HPO ₄	1,6
K	KCl	0,5	K ₂ SO ₄ / KCl	0,79 / 0,01
Mg	MgCl ₂	0,5	MgSO ₄	0,5
Ca	CaCl ₂	2,0	CaSO ₄	2,0
	CaCO ₃	0,5 TL pro Gefäß zur pH-Wert-Regulierung	CaCO ₃	0,5 TL pro Gefäß zur pH-Wert-Regulierung

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELVERSUCHE

Unter Einsatz der Windtunnelmethode wurden vier zeitlich versetzte Wiederholungsversuche durchgeführt, deren Daten zur Durchführung der NH₃-Messungen in Tabelle 14 zusammengestellt sind.

Tab. 14: Versuchsdaten zu Experiment 5a: Windtunnelversuche mit Sommerweizen in Nährlösung bei chlorid- bzw. sulfatbetonter Ernährung

Sommerweizen 'chlorid-/ sulfatbetont'	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]
Versuch 1	14.03. - 22.05.1997	7	62 - 68	Ährenschieben
Versuch 2	06.08. - 18.09.1997	18	25 - 43	Bestockung bis Schossen
Versuch 3	28.08. - 26.10.1997	39	20 - 59	Bestockung bis Ährenschieben
Versuch 4	07.10. - 09.11.1997	14	19 - 33	Bestockung bis Schoßbeginn

* bezogen auf Tage nach Aussaat

Im Anschluss an die NH₃-Messungen im Windtunnel wurden die Pflanzen aller Versuche geerntet. Nach Auswertung der Erträge wurden die pflanzlichen Proben für die chemische Analyse aufbereitet.

DURCHFÜHRUNG DER HAUBENGEFÄßVERSUCHE

Ergänzend zu den Windtunnelversuchen wurde die NH₃-Freisetzung bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen unter Einsatz der Haubengefäße untersucht. Dabei erfolgte die Pflanzenanzucht und Nährstoffversorgung in völliger Übereinstimmung mit den vorangestellten Windtunnelversuchen.

Es waren drei zeitlich versetzte Wiederholungsversuche geplant, deren wichtigsten Daten in Tabelle 15 aufgeführt sind.

Tab. 15: Versuchsdaten zu Experiment 5b: Haubengefäßversuche mit Sommerweizen in Nährlösung bei chlorid- bzw. sulfatbetonter Ernährung

Sommerweizen 'chlorid-/ sulfatbetont'	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z.Zt. d. Messungen [d]
Versuch 1	26.06. - 15.08.1997	11	35 - 45	Schossphase
Versuch 2	11.08. - 15.09.1997	13	24 - 36	Bestockungsphase
Versuch 3	27.10. - 04.12.1997	17	22 - 39	Bestockung bis Schossbeginn

* bezogen auf Tage nach Aussaat

Nach Ablauf des Untersuchungszeitraumes wurden die Pflanzen mehrheitlich geerntet. Zur Bereitstellung von älterem Pflanzenmaterial für Analysenzwecke blieben einige Versuchsgefäße in der Vegetationshalle weiter kultiviert.

2.8. Gefäßversuche zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Pflanzen in Abhängigkeit von pflanzenartspezifischen Stoffwechseleigenschaften

Die in diesem Kapitel aufgeführten Versuche dienen dem Ziel, das NH₃-Emissionsverhalten verschiedener Pflanzenarten mit unterschiedlichen Stoffwechseleigenschaften zu untersuchen. Dabei galt zu klären, ob die N₂-FIXIERUNG und die PHOTORESPIRATION direkten Einfluss auf die Freisetzung von NH₃ ausüben.

Neben Sommerweizen, *Triticum aestivum* L. cv. Remus, wurden Ackerbohne, *Vicia faba* L. cv. Alfred, und Körnermais, *Zea mays* L. cv. Zentis, als zu untersuchende Pflanzenarten gewählt.

2.8.1. Vergleichende Untersuchungen mit Sommerweizen und Ackerbohne

Anhand der folgenden Untersuchungen sollte geklärt werden, in welchem Ausmaß sich die Ackerbohne mit der Fähigkeit, in Symbiose mit Knöllchenbakterien (Rhizobien) über die Nitrogenaseaktivität Luftstickstoff nutzen zu können, hinsichtlich ihres NH₃-Emissionsverhaltens gegenüber Sommerweizen unterscheidet.

Als Kulturmedien wurden Mineralboden und Nährlösungen eingesetzt. Dabei erfolgte die Erfassung der NH₃-Emissionen bei den Mineralbodenkulturen mit Hilfe der Windtunnelmethode, während bei den Nährlösungskulturen die Haubengefäßmethode zum Einsatz kam.

2.8.1.1. Experiment 6: Mineralbodenversuch unter Einsatz der Windtunnelmethode

Der nachstehende Versuch bestand aus zwei voneinander unabhängigen Einzeluntersuchungen, deren Versuchspflanzen in einem Abstand von drei Wochen ausgesät wurden. Im Folgenden wird die erste Aussaat der Versuchspflanzen als 1. AS und die zweite als 2. AS bezeichnet. Die Erfassung der NH₃-Emissionen im Windtunnel wurde bei beiden Einzeluntersuchungen zeitlich unterteilt. Nach 16 Tagen wurden die Messungen der 1. AS-Generation für die darauf folgenden 16 Tage unterbrochen. Während dieser Zeit erfolgten die Messungen mit den Pflanzen der 2. AS-Generation. Im Anschluss daran wurde der Ablauf wiederholt. Dabei betrug der zweite Untersuchungszeitraum jeweils 21 Tage. In Tabelle 16 ist eine Übersicht der Messphasen des aus den zwei Aussaaten - 1. AS / 2. AS - bestehenden Gesamtversuches dargestellt.

Tab. 16: Versuchsdaten zu Experiment 6: Sommerweizen und Ackerbohnen in Mineralboden (Windtunnelversuche)

Sommerweizen Ackerbohne	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z.Zt. d. Messungen
1. AS 1. Messphase	12.03.1997- 26.05.1997	16	03.04.1997- 19.04.1997	22 - 38	Weizen: Bestockung - Schossen
1. AS 2. Messphase	12.03.1997- 26.05.1997	21	05.05.1997- 26.05.1997	54 - 75	Weizen: Beginn Ähren- schieben - Ende Blüte
2. AS 1. Messphase	03.04.1997- 16.06.1997	16	19.04.1997- 05.05.1997	22 - 38	Weizen: Bestockung - Schossen
2. AS 2. Messphase	03.04.1997- 16.06.1997	21	26.05.1997- 16.06.1997	53 - 74	Weizen: Beginn Ähren- schieben - Ende Blüte

* bezogen auf Tage nach Aussaat

SUBSTRAT, VERSUCHSGEFÄßE, NÄHRSTOFFVERSORGUNG (DÜNGUNG)

Als Versuchsboden wurde erneut der schluffige Sandboden aus Erlangen-Höchststadt (Tab. 4) verwendet. Zur Gewährleistung eines optimalen Wachstums musste der Boden-pH-Wert - insbesondere bei Ackerbohne - stärker als bisher angehoben werden. Da die Versuchsbedingungen bei beiden Pflanzenarten identisch sein sollten, wurde der pH-Wert im Boden durch die Zugabe von 0,02 % CaCO₃ (0,2 g CaCO₃ kg⁻¹ Boden) bei beiden Pflanzenarten auf 6,5-6,8 erhöht. Nach der Aufkalkung erfolgte die Grunddüngung des Versuchsbodens. Dazu wurden 2/3 der insgesamt eingesetzten Nährstoffe in gelöster Form unter den lufttrockenen Boden gemengt. Anschließend wurde das Bodenmaterial intensiv durchmischt und in die Vierkant-Versuchsgefäße verteilt. Die Restdüngermenge wurde drei Wochen nach Aussaat der Pflanzen auf der Substratoberfläche appliziert. Die Lagerungsdichte des Bodens betrug bei einer Einwaage von 13 kg pro Gefäß 1,4 g cm⁻¹ Boden. Es wurde eine Bodenfeuchte von annähernd 60 % WK_{max} eingestellt. Im Anschluss daran setzte eine vierwöchige Ruhephase des vorbereiteten Bodens ein.

Tab. 17: Experiment 6: Düngermengen (Makro- und Mikro-Nährstoffe) für Ackerbohnen in Mineralboden (schluffiger Sandboden), in g oder mg Reinnährstoff pro kg Boden

Makro-			Mikro-		
Nährstoffe	[g kg ⁻¹ Boden]	Nährstoff-Form	Nährstoffe	[mg kg ⁻¹ Boden]	Nährstoff-Form
N	0,01	NH ₄ NO ₃	B	0,3	H ₃ BO ₃
P	0,1	K ₂ HPO ₄	Cu	1	CuSO ₄
K	0,2	KNO ₃ / K ₂ HPO ₄	Mn	10	MnSO ₄
Mg	0,2	MgSO ₄	Zn	1	ZnSO ₄
Ca (Kal- kung)	0,2	CaCO ₃	Mo	1,25	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄
			Co	0,125	CoCl ₂
			Fe	120	Sequestren (6 % Fe ^{III})

Die Versorgung mit Nährstoffen erfolgte bei Weizen in Anlehnung an die vorangegangenen Mineralbodenversuche. Die Menge an Stickstoff, in Form von KNO₃-N, betrug hier 300 mg N kg⁻¹ Boden. Alle anderen Nährelemente wiesen die in Tabelle 5 aufgeführten Konzentrationen und Nährstoffformen auf. Bei der Ackerbohne wurden die in Tabelle 17 aufgeführten Nährstoffe gedüngt. Zur Klärung der Versuchsfrage nach dem Einfluss der Nitrogenaseaktivität bei

der Freisetzung von NH_3 wurde der Versuchsboden bei Ackerbohne mit *Rhizobium leguminosarum* geimpft (Inokulation). Damit wurde die Voraussetzung für die symbiotische Nutzbarmachung von Luftstickstoff geschaffen. Dementsprechend erhielten die Ackerbohnenpflanzen lediglich eine N-Startgabe von $0,01 \text{ g N kg}^{-1}$ Boden, die nach dem Auflaufen der Keimpflanzen verabreicht wurde.

Die Versuchsgefäße waren bis zum Beginn der Windtunnelmessungen in der Vegetationshalle als vollständig randomisierte Versuchsanlage platziert. Zur Bereitstellung von Pflanzenmaterial für Analysenzwecke sowie zur gravimetrischen Erfassung von Transpirations- und Evaporationsverlusten während der Windtunnelmessungen wurden auch hier Zusatzgefäße angesetzt.

PFLANZENANZUCHT

Das Saatgut beider Pflanzenarten wurde ein Tag vor Aussaat in gesättigter CaSO_4 -Lösung vorgequollen. Danach wurde der Samen auf die Substratoberfläche der vorbereiteten Versuchsgefäße ausgelegt. Während die Weizensaat mit Bodenmaterial abgedeckt wurde, wurden die Ackerbohnen leicht in den Versuchsboden eingedrückt. Jede im Boden eingebettete Bohne wurde mit *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* (Stamm 490) inokuliert und anschließend ebenfalls mit Bodenmaterial abgedeckt. Zuletzt wurde die Substratoberfläche aller Versuchsgefäße mit einer dünnen Quarzsand-Auflage versehen und bewässert. Dabei erfolgte eine Anhebung der Bodenfeuchte auf 70 % WK-max.

Die Aussaatstärke betrug bei Weizen 30 und bei Ackerbohnen 12 Samen pro Versuchsgefäß. Nur wenige Tage nach dem Auflaufen der jungen Keimpflänzchen erfolgte eine Reduktion der Pflanzenanzahl auf 25 Weizen- und 8 Ackerbohnenpflanzen pro Versuchsgefäß.

Der infolge Evaporation und Transpiration entstandene Wasserverlust in den Versuchsgefäßen wurde in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen bis zu drei mal täglich ausgeglichen. Dadurch konnten die geforderte Wasserkapazität im Boden annäherungsweise gehalten und größere Schwankungen im Wasserhaushalt der Pflanzen verhindert werden.

Da der Entwicklungsverlauf beider Pflanzenarten anfänglich nicht eingeschätzt werden konnte, folgte drei Wochen nach der ersten Aussaat eine zweite Aussaat. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass die zu vergleichenden Pflanzenarten für die anstehenden NH_3 -Messungen keine zu großen Unterschiede im Hinblick auf ihre *pflanzliche Biomasse* aufwiesen. Wie sich aber zeigte, wäre eine weitere Aussaat nicht erforderlich gewesen. So ergab sich bei der Überprüfung der Frischgewichte von jeweils einem Versuchsgefäß Weizen und einem Versuchsgefäß Ackerbohne eine erstaunlich hohe Übereinstimmung. Die zweiten Aussaat-Generationen beider Pflanzenarten konnten folglich für einen zeitlich versetzten Wiederholungsversuch eingesetzt werden (Tab. 16).

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

In einem Alter von circa drei Wochen wurden die Versuchspflanzen der 1. AS-Generation im Windtunnel platziert und die Messungen zur Erfassung der NH_3 -Emissionen gestartet. Während der Weizen zu diesem Zeitpunkt in der Hauptbestockungsphase stand, hatte Ackerbohne bis zu acht Blätter an der Sprossachse ausgebildet. Nach Ablauf des 16 Tage umfassenden Untersuchungszeitraumes wurden die Versuchsgefäße erneut in der Vegetationshalle platziert und die 2. AS-Generation im Windtunnel aufgestellt. 16 Tage später begann die zweite Messphase, zu der ein erneuter Wechsel der Versuchsgefäße erfolgte. Die 1. AS-Generation wurde erneut im Windtunnel und die 2. AS-Generation in der Vegetationshalle platziert. Der zweite Untersuchungszeitraum erstreckte sich über genau drei Wochen. Danach wurde die 1. AS-Generation geerntet, während für die 2. AS-Generation die zweite Messphase im Windtunnel begann. Weitere drei Wochen später wurden auch die Pflanzen der 2. AS-Generation geerntet und verschiedene Ertragsparameter bestimmt. Damit war der Gesamtversuch beendet.

Unmittelbar nach Ausführung der letzten Windtunnelmessungen wurden die Versuchsgefäße gewogen, um den Feuchtigkeitsgehalt im Boden zu kontrollieren.

2.8.1.2. Experiment 7: Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Haubengefäßmethode

Ziel des folgenden Versuches war es, die NH_3 -Emissionsergebnisse aus Mineralbodenkulturbeständen des vorangegangenen Windtunnelversuches mit NH_3 -Messergebnissen aus Nährlösungskulturbeständen unter Einsatz der Haubengefäßmethode zu vergleichen und gegebenenfalls zu ergänzen.

Um die Bedeutung der Nitrogenaseaktivität an der NH_3 -Freisetzung bei Ackerbohne genauer zu untersuchen, wurde in diesem Versuch die N_2 -Fixierung *unterbunden*, indem keine Inokulierung mit Rhizobien erfolgte und statt dessen mineralisch gedüngt wurde. Folglich konnten die Pflanzen ihren N-Bedarf nicht über die Symbiose mit luftstickstofffixierenden Bakterien decken. In Übereinstimmung mit Sommerweizen wurde die Ackerbohne ebenfalls über das Nährmedium mit mineralischem NO_3^- -N versorgt. So wurde anhand dieses Versuches das NH_3 -Emissionsverhalten von Ackerbohne gegenüber Sommerweizen ohne den Einfluss der N_2 -Fixierung (Nitrogenaseaktivität) untersucht.

In einem späteren Versuch (Experiment 8; 2.8.2.1.) wurde durch eine vergleichende Gegenüberstellung der NH_3 -Emissionen von *inokulierten* und *nicht-inokulierten* Ackerbohnen die Bedeutung der Nitrogenaseaktivität in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung weiter untersucht.

Tabelle 18 stellt die wichtigsten Daten zur Durchführung des Nährlösungskulturversuches mit Sommerweizen und Ackerbohnen unter Einsatz der Haubengefäßmethode zusammen.

Tab. 18: Versuchsdaten zu Experiment 7: Sommerweizen und Ackerbohne in Nährlösung (Haubengefäßversuch)

Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter * z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Zt. d. Messungen
12.02.1998- 07.04.1998	26	12.03.1998- 07.04.1998	30 - 56	Weizen: Schossbeginn bis Ährenschieben Ackerbohne: 10- bis 14- Blattstadium

* bezogen auf Tage nach Aussaat

PFLANZENANZUCHT, VERSUCHSGEFÄßE

Sommerweizen wurde erneut in Filterpapiertaschen, Ackerbohne in einer mit Quarzsand gefüllten Aussaatschale in einer Klimakammer angezogen. Unter Verwendung einer gesättigten Calcium-Sulfat-Lösung wurde die Saat feuchtgehalten.

Mit dem Umsetzen der Keimpflanzen in die Haubengefäße (Typ A) erfolgte die Platzierung in der Vegetationshalle. Die Pflanzdichte betrug bei Weizen zwölf und bei Ackerbohne sechs Pflanzen pro Versuchsgefäß.

NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Bei Weizen entsprach die eingesetzte Nährlösung der Standard- NO_3^- -N-Kulturlösung für monokotyle Pflanzenarten (Tab. 6). Ackerbohne erhielt die in Tabelle 19 dargestellte Nährlösungszusammensetzung für dikotyle Pflanzenarten. Der Stickstoff wurde wie bei Weizen in Form von $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ in einer Konzentration von 2,0 mM N zugesetzt. Der Wechsel der Nährlösung erfolgte anfangs alle zwei, später alle drei bis vier Tage.

DURCHFÜHRUNG DER NH_3 -MESSUNGEN

Dreißig Tage nach Aussaat wurden die Hauben geschlossen und die NH_3 -Messungen gestartet. Unmittelbar nach Ablauf des 3 ½ Wochen umfassenden Untersuchungszeitraumes erfolgte die Ernte mit anschließender Auswertung des Ertrags.

Tab. 19: Zusammensetzung der Nährlösung für dikotyle Pflanzenarten (NH_4^+ - und NO_3^- -N-Variante)

Makro-Nährstoffe			Nährstoffkonzentration (Nährlösung) [mM]
Nährstoff		in Form (Salz)	
N	NH_4^+-Variante	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	2,0
	NO_3^--Variante	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	2,0
Ca	nur bei NH_4^+ -Variante	CaCl_2	1,0
		CaSO_4	1,0
K		K_2SO_4	0,7
		KCl	0,1
Mg		MgSO_4	0,5
P		KH_2PO_4	0,1
Mikro-Nährstoffe			Nährstoffkonzentration (Nährlösung) [μM]
Nährstoff		in Form (Salz)	
Fe		FeEDTA	50
Cu		CuSO_4	1,0
Mn		MnSO_4	6,0
Zn		ZnSO_4	1,0
B		H_3BO_3	4,0
Co		CoCl_2	0,2
Mo		$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	0,2
B		H_3BO_3	4,0

2.8.2. N-Ernährung und NH_3 -Freisetzung bei Ackerbohne

2.8.2.1. Experiment 8: Nährlösungskulturversuch: Angebot von NO_3^- -N und NH_4^+ -N

In Experiment 8 sollte untersucht werden, ob das NH_3 -Emissionsverhalten der Ackerbohne über die mineralische N-Versorgungsform in ähnlicher Weise beeinflusst wird, wie es bei Sommerweizen zu beobachten war. Dazu wurde ein Haubengefäßversuch mit in Nährlösung kultivierten Ackerbohnen bei Angebot von NO_3^- - und NH_4^+ -N durchgeführt. In Tabelle 20 sind die Versuchsdaten der Untersuchung zusammengestellt.

PFLANZENANZUCHT, VERSUCHSGEFÄßE, NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Die Keimung der Ackerbohnen erfolgte in mit Quarzsand gefüllten Aussaatschalen. Unabhängig von der späteren N-Angebotsform erhielten alle Keimpflanzen nach dem Umsetzen in die Haubengefäße (Typ B) 1:5 verdünnte Nährlösung für dikotyle Pflanzenarten mit ausschließlich NO_3^- -N (Tab. 19). Wenige Tage später wurde bei den Pflanzen der NH_4^+ -N-Variante der NO_3^- -Stickstoff durch NH_4^+ -Stickstoff ersetzt. Das hatte eine Veränderung der Calcium-Zufuhr zur Folge (Tab. 19). Der pH-Wert in der Nährlösung wurde bei der NH_4^+ -N-Variante täglich kontrolliert. Bei einem Absinken unter pH 5 erfolgte zur Verhinderung eventueller Wachstumsdepressionen der Versuchspflanzen ein sofortiger Nährlösungswechsel. In Abhängigkeit vom Pflanzenalter wurde die Konzentration der Nährlösungen bei beiden Varianten stufenweise auf die volle Konzentration angehoben.

DURCHFÜHRUNG DER NH_3 -MESSUNGEN

Die Durchführung der elf Tage umfassenden Untersuchungen zur Erfassung der NH_3 -Emissionen begannen 3 ½ Wochen nach Aussaat. Im Anschluss daran wurden die Pflanzen geerntet.

Tab. 20: Versuchsdaten zu Experiment 8: Ackerbohnen in Nährlösung bei Versorgung mit NO_3^- -N und NH_4^+ -N (Haubengefäßversuch)

Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Beginn d. Messungen
03.04.98 - 09.05.98	11	28.04.98 - 09.05.98	25 - 36	8-/10- Blatt-Stadium

* bezogen auf Tage nach Aussaat

2.8.2.2. Experiment 9: Nährlösungskulturversuch: mineralische und symbiotische N-Ernährung

Experiment 9 diente der Untersuchung der Nitrogenaseaktivität als NH_3 -freisetzender Prozess. Dabei wurde ein Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Haubengefäßmethode geplant, bei welchem die NH_3 -Emissionsverluste bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art der N-Versorgung erfasst werden sollten. Es wurde zwischen mineralischer N-Ernährung - Versorgung mit NO_3^- -N und NH_4^+ -N - und symbiotischer N-Ernährung - N_2 -Fixierung durch *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* - unterschieden. Das Experiment bestand aus zwei zeitlich versetzten Wiederholungsversuchen, deren wichtigste Daten in Tabelle 20 zusammengestellt sind.

Tab. 21: Versuchsdaten zu Experiment 9: Ackerbohne in Nährlösung: N_2 -Fixierung, NO_3^- -N-, NH_4^+ -N-Angebot (Haubengefäßversuch)

Ackerbohne	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Beginn d.
Versuch 1	18.05.1998- 23.06.1998	15	08.06.1998- 23.06.1998	21 - 36	6-Blattstadium
Versuch 2	18.06.1998- 01.08.1998	15	17.07.1998- 01.08.1998	29 - 45	10-Blattstadium

* bezogen auf Tage nach Aussaat

PFLANZENANZUCHT, VERSUCHSGEFÄßE, NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Die Anzucht der Pflanzen und die Auswahl der Versuchsgefäße erfolgte in Anlehnung an das vorangegangene Experiment. Auch die eingesetzten Nährlösungskulturmedien der NO_3^- -N- und NH_4^+ -N-Variante entsprachen denen des Experimentes 8. Nach vorangegangener Vorkultur in 1:5 verdünnter Nährlösung mit ausschließlich NO_3^- -N (Tab. 19) wurde einem Drittel der Versuchsgefäße, der fortan bezeichneten Variante ' N_2 -Fixierung', zur Inokulierung der Wurzeln Rhizobienkulturlösung zugesetzt. Die Hälfte der übrigen Versuchspflanzen wurde auf NH_4^+ -N-Ernährung umgestellt, während für die andere Hälfte die NO_3^- -N-Versorgung erhalten blieb. Bei der Variante ' N_2 -Fixierung' wurde die N-Konzentration in der Nährlösung stufenweise reduziert, bis den Pflanzen schließlich kein mineralischer Stickstoff mehr zur Verfügung stand. Ferner erhielten die Pflanzen eine weitere Gabe an Rhizobienkulturlösung.

Die Bereitstellung einer ausreichend funktionierenden Symbiose zwischen *Vicia faba* L. und *Rhizobium leguminosarum* in Nährlösung erforderte zwei Vorversuche. Erst die dritte Anzucht bot eine genügend hohe Anzahl gut entwickelter Knöllchen an den Wurzeln der Versuchspflanzen. Zur Überprüfung des Inokulationserfolges wurde die Bakteriendichte in den Knöllchen bestimmt.

DURCHFÜHRUNG DER NH₃-MESSUNGEN

Drei Wochen nach Aussaat wurden die Messungen zur Erfassung der NH₃-Freisetzung gestartet. Nach Ablauf des 15 Tage andauernden Untersuchungszeitraumes wurden die Pflanzen geerntet und die Erträge bestimmt.

Weitere dreieinhalb Wochen später begannen die Untersuchungen des Wiederholungsversuches, die sich ebenfalls über einen Zeitraum von 15 Tagen erstreckten. Auch hier wurden Pflanzen direkt nach Ablauf der NH₃-Messungen geerntet.

2.8.3. Vergleichende Untersuchung mit Sommerweizen und Körnermais

Die folgenden Versuche dienten dem Ziel, den Einfluss der Photorespiration auf die Höhe der NH₃-Freisetzung zu untersuchen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, läuft die Photorespirationsreaktion bei C₄-Pflanzen gegenüber C₃-Pflanzen stoffwechselbedingt in deutlich geringerem Umfang ab. Daher lag der Untersuchungsschwerpunkt in einer vergleichenden Gegenüberstellung der NH₃-Emissionen aus Sommerweizen, *Triticum aestivum* L. cv. Remus, als C₃-Pflanze und Körnermais, *Zea mays* L. cv. Zentis, als C₄-Pflanze. Es waren Versuche mit Mineralboden- und Nährlösungskulturen unter Einsatz der Windtunnel- und der Haubengefäßmethode geplant.

2.8.3.1. Experiment 10: Mineralbodenversuch unter Einsatz der Windtunnelmethode

In Tabelle 22 sind die wichtigsten Versuchsdaten zur Durchführung der NH₃-Messungen zusammengestellt.

Tab. 22: Versuchsdaten zu Experiment 10: Sommerweizen und Körnermais in Mineralboden (Windtunnelversuch)

Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* ¹ z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Beginn d. Messungen
23.04.1997* ² - 12.06.1997	18	25.05.1997 - 12.06.1997	Weizen: 32 - 50 Mais: 22 - 40	Weizen: Schossbeginn Mais: Streckungsphase

*¹ bezogen auf Tage nach Aussaat *² drei verschiedene Aussaattermine: 23.04.1997; 03.05.1997; 13.05.1997

PFLANZENANZUCHT, VERSUCHSGEFÄßE

Als Versuchsboden wurde erneut der schluffige Sandboden aus Erlangen verwendet. Die Vorbehandlung, wie die Anhebung des Boden-pH-Wertes, die Grunddüngung sowie die Einstellung der Bodenfeuchte erfolgte wie unter 2.5.2. beschrieben. Dabei wurde zwischen den beiden zu untersuchenden Pflanzenarten nicht unterschieden.

Die Anzucht der Versuchspflanzen erfolgte in der Vegetationshalle. Nach einer Quellbehandlung in gesättigter CaSO₄-Lösung wurde das Saatgut beider Pflanzenarten auf der Substratoberfläche der bereitgestellten Versuchsgefäße - die 14 l-Vierkantbehälter - ausgelegt, welche im Anschluss daran als voll randomisierte Versuchsanlage angeordnet wurden.

Bei Weizen betrug die Saatstärke 50, bei Mais 12 Samen pro Versuchsgefäß. Zur Reduzierung von Evaporationsverlusten folgte eine Auflage aus grobem Quarzsand. Zehn Tage nach Aussaat wurde die vorläufige Bestandesdichte reduziert. Die endgültige Anzahl an Versuchspflanzen pro Gefäß betrug bei Weizen erneut 25, bei Mais 6 Stück.

Infolge der hohen Wachstumsraten bei Mais erfolgten im Abstand von 10 Tagen zwei weitere Mais-Aussaaten. Damit sollte sichergestellt werden, dass zum Zeitpunkt der NH₃-Messungen bei beiden zu vergleichenden Pflanzenarten - nach visuellem Beurteilungsvermögen - annäherungsweise übereinstimmende oberirdische *pflanzliche Biomassen* vorlagen.

Die Wasserversorgung der Pflanzen erfolgte mehrmals täglich über das eingerichtete Be- und Entwässerungssystem. Sie entsprach dem durch Transpiration und Evaporation verursachten, gravimetrisch erfassten Wasserverlust.

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

Zu Beginn der Windtunnelmessungen zur Erfassung der NH_3 -Freisetzung waren die Weizenpflanzen 32 Tage alt und befanden sich bereits in der Schossphase. Die eingesetzten Maispflanzen gingen aus der zweiten Aussaat hervor und wiesen folglich ein Alter von 22 Tagen auf. Der visuellen Beurteilung nach lag die *Produktion an pflanzlicher Biomasse* bei beiden Pflanzenarten auf vergleichbarem Niveau. Nach Ablauf des zehn Tage andauernden Untersuchungszeitraumes wurden die Pflanzen geerntet.

2.8.3.2. Experiment 11: Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Windtunnelmethode

Zur Ergänzung der vorangegangenen Untersuchungsergebnisse erfolgte ein weiterer Windtunnelversuch mit Sommerweizen und Körnermais als Nährlösungskulturen. Die wichtigsten Daten zu diesem Experiment sind in Tabelle 23 aufgeführt.

PFLANZENANZUCHT, VERSUCHSGEFÄßE, NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Die Aussaat von Körnermais erfolgte eine Woche nach Aussaat von Sommerweizen. Nach dem Umsetzen der Keimpflanzen in die Versuchsgefäße wurden diese als vollständig randomisierte Versuchsanlage in der Vegetationshalle unter Zusatzbeleuchtung platziert. Als Nährmedium wurde die NO_3^- -N-Standardnährlösung für monokotyle Pflanzenarten (Tab. 6) verwendet.

Tab. 23: Versuchsdaten zu Experiment 11: Sommerweizen und Körnermais in Nährlösung (Windtunnelversuch)

	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Zt. d. Messungen
Weizen:	04.09. - 09.10.97	14	30.09.97-	Weizen: 26 - 40	Weizen: Bestockung - Schossen
Mais:	11.09. - 09.10.97		14.10.97	Mais: 19 - 33	

* bezogen auf Tage nach Aussaat

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

Zu Beginn der NH_3 -Messungen stand der Weizen in der Hauptbestockungsphase. Das Alter der Pflanzen betrug 23 Tage. Der zu diesem Zeitpunkt 16 Tage alte Mais wies gegenüber Weizen vergleichbare Wuchshöhen auf. Nach Ablauf des 18 Tage umfassenden Untersuchungszeitraumes wurden die Pflanzen geerntet.

2.8.3.3. Experiment 12: Nährlösungskulturversuch unter Einsatz der Haubengefäßmethode

Dieses Experiment unter Einsatz der Haubengefäßmethode diente der Ergänzung und Absicherung der mit Hilfe der Windtunnelmethode erhobenen Ergebnisdaten.

PFLANZENANZUCHT, VERSUCHSGEFÄß

In einer Klimakammer wurde Sommerweizen und - 7 Tage später - Körnermais mit Hilfe der Filterpapiertechnik zum Keimen ausgelegt. Mit dem Umsetzen der Keimlinge in die Haubengefäße (Typ A) erfolgte die Platzierung der Pflanzen in der Vegetationshalle. Die eingesetzte Nährlösung entsprach der des Experimentes 11 (NO_3^- -N-Standardnährlösung für monokotyle Pflanzenarten, Tabelle 6).

DURCHFÜHRUNG DER WINDTUNNELMESSUNGEN

In Tabelle 24 sind die wichtigsten Versuchsdaten zur Durchführung der NH₃-Messungen aufgeführt. In Übereinstimmung mit dem vorangegangenen Versuch (Exp. 11) befand sich der Sommerweizen zu Beginn der NH₃-Emissionsmessungen in der Hauptbestockungsphase. Die sieben Tage jüngeren Maispflanzen wiesen gegenüber den Weizenpflanzen eine *vergleichbare oberirdische Pflanzenmasse* pro Versuchsgefäß auf.

Tab. 24: Versuchsdaten zu Experiment 12: Sommerweizen und Körnermais in Nährlösung (Haubengefäßversuch)

	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Zt. d. Messungen
Weizen:	02.11. - 13.12.97	18	25.11.97-	Weizen: 23 - 41	Weizen: Bestockung - Schossen
Mais:	09.11. - 13.12.97		13.12.97	Mais: 16 - 34	Mais:

* bezogen auf Tage nach Aussaat

2.9. Gefäßversuch zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Pflanzen und Pflanzenbeständen

2.9.1. Experiment 13: Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei *offen gehaltener* und *abgedeckter* Substratoberfläche unter Einsatz der Haubengefäßmethode

Da bei den bisherigen Mineralbodenversuchen zur Erfassung von NH₃-Emissionen aus Pflanzen die Bodenoberfläche nicht abgedeckt war, kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch eventuelle NH₃-Freisetzungsprozesse im Kultursubstrat (Boden) entsprechende Ausgasungsverluste miterfasst wurden. Anhand der folgenden Versuche wurde die Höhe der NH₃-Emissionen aus Weizenpflanzen unter Ausschluss bodenbürtiger NH₃-Ausgasungsverluste untersucht. Dabei sollte eine vergleichende Gegenüberstellung von NH₃-Emissionsverlusten aus einem »Pflanzenbestand« (einschließlich Bodenoberfläche) sowie aus ausschließlich »*oberirdischen Pflanzensprossen*« (ohne Bodenoberfläche) erfolgen. Dementsprechend blieb die Substratoberfläche bei der Versuchsvariante »Pflanzenbestand« offen, während sie bei der Variante »*oberirdischen Pflanzensprosse*« abgedeckt wurde. Es waren drei Wiederholungsversuche geplant, deren wichtigste Daten in Tabelle 25 zusammengestellt sind.

Tab. 25: Versuchsdaten zu Experiment 13: Sommerweizen in Mineralboden bei *offener* Substratoberfläche (»Pflanzenbestand«) und *abgedeckter* Substratoberfläche (»Pflanzenspross«)

Sommerweizen: »Pflanzenspross« / »Pflanzenbestand«	Versuchs- zeitraum [Datum]	Mess- dauer [d]	Mess- zeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z. Zt. d. Messungen [d]
Versuch 1	11.02.98-29.03.98	26	20 - 46	Bestockung bis Schossphase
Versuch 2	05.04.98-08.05.98	18	15 - 33	3-4-Blatt-Stadium bis Schossbeginn
Versuch 3	14.05.98-15.06.98	16	16 - 32	Bestockung bis Schossbeginn

* bezogen auf Tage nach Aussaat

VERSUCHSGEFÄßE, SUBSTRAT, NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Als Versuchsgefäß wurde der Haubengefäß-Typ B gewählt. Für die Versuchsvariante *offene* Substratoberfläche (»Pflanzenbestand«) wurden Zwischeneinsätze angefertigt, die einem ein-

fachen Ringeinsatz glichen. Sie dienten dazu, das Gefäßunterteil und den Haubenaufsatz nach außen hin luftdicht miteinander zu verbinden, ohne den Gasaustausch zwischen Haubeninnenraum und Kulturmedium zu hindern.

Bei die Variante *abgedeckte* Substratoberfläche (*»oberirdische Pflanzensprosse«*) wurden die für die Nährlösungsversuche hergestellten Lochteller-Zwischeneinsätze verwendet. Wie bei den Versuchen mit Nährlösungskulturen gewährleisteten diese Einsätze eine räumliche Trennung von oberirdischem Pflanzenspross und dem Wurzelbereich mit Nährmedium. Zur Sicherstellung der Luftdichtigkeit wurde der pflanzliche Spross am Übergang zur Wurzel hin mit Knetmasse abgedichtet.

Da die NH_3 -Bildung und -Freisetzung im Boden von bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften stark beeinflusst wird, wurden zur genaueren Differenzierung und präziseren Bewertung zwei verschiedene Mineralbodentypen eingesetzt. Während bei den beiden ersten Versuchen der SCHLUFFIGE SANDBODEN aus Erlangen (Tab. 4) zum Einsatz kam, wurde bei der dritten Untersuchung ein stickstoffarmer toniger Schluffboden aus dem C-Horizont eines Lössmineralbodens verwendet. In Tabelle 26 sind die physikalischen Kenndaten und Nährstoffgehalte des C-LÖSS-Bodens aufgeführt.

Tab. 26: Kenndaten des C-LÖSS-Versuchsbodens (Parabraunerde)

Physikalische Parameter				Nährstoffgehalte [mg / 100 g Boden]				
Sand	22 %	Org. Substanz	< 1 %	P	(CAL)	0,4	pH (CaCl ₂)	7,5
Schluff	67 %	C _{ges}	0,35 %	K	(CAL)	17	CaCO ₃	20 %
Ton	11 %	Dichte g/cm ³	1,4	Mg	Mg (CaCl ₂)	15		

Die Anhebung des pH-Wertes, die Nährstoffversorgung sowie die Einstellung der Bodenfeuchte des Versuchsbodens SCHLUFFIGER SAND erfolgte in Übereinstimmung mit den bisherigen Mineralbodenversuchen (Tab. 5). Lediglich die nachfolgende Ruhephase des vorbereiteten Bodenmaterials wurde aus zeitlichen Gründen auf 2 ½ Wochen verkürzt.

Dem C-LÖSS-Mineralboden wurden als Grunddüngung die in Tabelle 27 aufgeführten Nährstoffe zugesetzt. Dabei wurde die Düngermenge unter den luftgetrockneten Mineralboden gemengt, welcher im Anschluss daran mit einer Lagerungsdichte von 1,4 g cm⁻¹ in die Versuchsgefäße gefüllt und nachfolgend auf circa 60 % WK-max angefeuchtet wurde.

Tab. 27: Nährstoffzufuhr (Düngung) des C-LÖSS-Versuchsbodens

Nährstoff	in Form (Nährsalz)	mg/kg Boden	Nährstoff-Konzentration [M]
N	Ca(NO ₃) ₂	200	0,5
P	KH ₂ PO ₄	200	0,1
K	K ₂ SO ₄	100	0,1
Ca	CaCl ₂	120	0,5
Mg	MgCl ₂	30	0,5
Fe	Fe EDTA	3-4	0,015
Spurennährstoffe			

PFLANZENANZUCHT

Entgegen der bisherigen Versuche mit Mineralboden erfolgte die Anzucht von Sommerweizen unter Einsatz der Filterpapiertechnik in einer Klimakammer. Nach Ausbildung einer kräftigen Keimwurzel wurden die jungen Keimlinge in die Versuchsgefäße eingepflanzt und in der Ve-

getationshalle platziert. Während die Keimlinge der Variante »Pflanzenbestand« gleichmäßig auf der gesamten Substratoberfläche des Haubenuntergefäßes eingesetzt wurden, erfolgte das Einsetzen der Keimlinge bei der Variante »oberirdische Pflanzensprosse« durch die vorgegebenen feinen Bohröffnungen hindurch. Der infolge Transpiration und Evaporation verursachte Wasserverlust im Versuchsgefäß wurde täglich gravimetrisch bestimmt und durch erneute Zufuhr ausgeglichen.

NH₃-MESSUNGEN

Die NH₃-Messungen erfolgten bei allen drei Einzeluntersuchungen in Bezug auf die Entwicklung der Versuchspflanzen zu einer vergleichbaren Zeit (Bestockungs- bis Schossphase). Wenige Tage vor Beginn der Messungen wurde bei der Variante »oberirdische Pflanzensprosse« (abgedeckte Substratoberfläche) der Spross - am Übergang zur Wurzel - gegen die Bohröffnung hin mit Knetmasse abgedichtet. Nach Ablauf der Untersuchungen wurden die Pflanzen geerntet und die Ertragsparameter bestimmt.

2.10. Gefäßversuch zur Erfassung von NH₃-Emissionsverlusten aus Pflanzen unter Wasserstress

2.10.1. Experiment 14: Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei optimaler und unzureichender Wasserversorgung unter Einsatz der Haubengefäßmethode

Der folgende Versuch diente dem Ziel, den Einfluss der Transpiration auf die NH₃-Freisetzung bei Pflanzen genauer zu bewerten und damit der Frage nach der Bedeutung von Wasserstress für die NH₃-Abgabe bei Pflanzen nachzugehen.

Zu diesem Zwecke wurden Untersuchungen mit Sommerweizen in Mineralboden bei *optimaler* und *unzureichender Wasserversorgung* durchgeführt. Dabei richtete sich die Einstellung der Bodenfeuchte und folglich die Wasserversorgung nach der maximalen Wasserkapazität des Versuchsbodens (siehe unten).

Tab. 28: Versuchsdaten zu Experiment 14: Sommerweizen in Mineralboden bei optimaler und unzureichender H₂O-Versorgung (Haubengefäßversuch)

Sommerweizen 'Wasserstress'	Versuchszeitraum [Datum]	Messdauer [d]	Messzeitraum [Datum]	Pflanzenalter* z.Zt. d. Messungen [d]
Versuch 1	11.02. - 29.03.1998	26	20 - 46	Bestockung bis Schossphase
Versuch 2	05.04. - 08.05.1998	18	15 - 33	Bestockung bis Schossbeginn

* bezogen auf Tage nach Aussaat

Die Durchführung von Experiment 14 erfolgte zur gleichen Zeit wie die Durchführung von Experiment 13. Dabei war die gesamte versuchstechnische Gestaltung einschließlich Versuchsgefäß, Substrat und Düngung sowie die Anzucht und Kultur der Versuchspflanzen bei beiden Experimenten identisch. Allerdings kam in Experiment 14 nur der schluffige Sandboden (2.5.2.) als Kultursubstrat und nur die Gefäße der Versuchsvariante »Pflanzenbestand« mit offen gehaltener Substratoberfläche (2.9.1.) zum Einsatz.

Der verwendete Boden wies eine maximale Wasserkapazität (WK-max.) von 230 g Wasser pro kg Boden auf. Der Wassergehalt des Bodens wird in Prozent der WK-max. angegeben. Dabei sagt der absolute Wassergehalt allerdings relativ wenig über die Wasserverfügbarkeit aus. Die Wasserspannung oder das Wasserpotential (kPa) des Bodens gibt an, wie stark das Wasser im Boden gebunden ist. Nach der Druckmethode wurde eine Wasserpotentialkurve erarbeitet. Dazu wurden 20 g lufttrockener Boden mit Wasser gesättigt, gewogen und in einem

Drucktopf verschiedenen Druckpotentialen ausgesetzt. Das dabei abgegebene Wasser wurde in % der WK-max. gegen den eingesetzten Druck in ein Koordinatensystem eingetragen. Auf diese Weise entsteht der Verlauf der Wasserpotential- oder Wasserspannungskurve eines Versuchsbodens.

Für die Durchführung des Wasserstressversuches war es notwendig, den Wassergehalt bzw. das Wasserpotential im Gefäß auf ein bestimmtes Niveau einzustellen und möglichst konstant zu halten. Die Kontrollgefäße - »optimale H_2O -Versorgung« - wurden bei einer WK-max. von > 70 % gehalten, während die Wasserkapazität bei der Stressvariante - »unzureichende H_2O -Versorgung« - auf weniger als 30-35 % WK-max. eingestellt wurde.

Das Ansetzen der Versuchsgefäße und die Grunddüngung erfolgten 4 Wochen vor Versuchsbeginn. Nach Zusetzen der gelösten Nährstoffe wurde der Wassergehalt des Bodens auf ca. 60 % WK-max. eingestellt, um eine gleichmäßige Nährstoffverteilung im Gefäßraum zu erreichen.

Es waren zwei zeitlich versetzte Untersuchungen geplant, deren wichtigste Versuchsdaten in Tabelle 28 aufgeführt sind. Eine Woche nach Einpflanzen der mit Hilfe der Filterpapiertechnik vorgezogenen Keimlinge wurde die Wassermangelsituation erzeugt. Die Stressdauer erstreckte sich bis zu Versuchsende. Die Überprüfung und Einstellung des Wassergehaltes in den Versuchsgefäßen erfolgte täglich. Nach Ablauf der NH_3 -Messungen wurden die Pflanzen geerntet und die Ertragsparameter bestimmt. Außerdem wurde der Wassergehalt im Boden überprüft.

2.11. Gefäßversuch zur Erfassung von Distickstoffmonoxid(N_2O)-Konzentrationsveränderungen zwischen Pflanzen und der sie umgebenden Atmosphäre

2.11.1. Experiment 15: Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen

Die im Folgenden dargestellten Versuche hatten zum Ziel, N_2O -Flüsse beziehungsweise N_2O -Konzentrationsveränderungen zwischen oberirdischen Pflanzensprossen und der sie umgebenden Luft zu untersuchen. Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob die Form des angebotenen mineralischen Stickstoffs die N_2O -Bildung und -Freisetzung bei Pflanzen beeinflusst. So wurde zwischen NO_3^- -N- und NH_4^+ -N-Ernährung unterschieden.

VERSUCHSPFLANZEN, VERSUCHSGEFÄßE und MESSTECHNIK

Als Versuchspflanze wurde erneut Sommerweizen, *Triticum aestivum* L. cv. Remus, gewählt. Die Pflanzen wurden in Nährlösung kultiviert. Dabei erhielt die eine Hälfte der Pflanzen NO_3^- -, die andere Hälfte NH_4^+ -N (Tab. 9).

Die Windtunnelmethode konnte aufgrund der hohen Luftdurchflussraten zur Bestimmung von N_2O -Gasflüssen nicht eingesetzt werden. Der Nachweis dieses Spurengases erfordert eine mehrstündige Akkumulationszeit. Anlässlich dieser messtechnischen Anforderung kamen die Haubengefäße als sogenannte 'CLOSED CHAMBER' zum Einsatz. Bei der CLOSED CHAMBER-Methode wird die Versuchsfläche mit Messkammern (Hauben) über einen bestimmten Zeitraum unter vollständiger Unterbindung des Luftaustausches mit der Außenatmosphäre abgedeckt. Während dieser Zeit findet eine Konzentrationsveränderung - vorwiegend eine Anreicherung - des zu messenden Gases statt. Aus der Konzentrationsveränderung über die Zeit und unter Berücksichtigung des Kammervolumens und der Fläche kann anschließend mit Hilfe einer linearen Regression der Gasfluss bestimmt werden.

In den folgenden Untersuchungen kamen die Haubengefäße (Typ B) zum Einsatz, die bereits in den Versuchen zur Bestimmung von NH_3 -Emissionen verwendet wurden. Doch im Unterschied zu den Untersuchungen über die NH_3 -Freisetzung waren die hier verwendeten Hauben-aufsätze in ihrer Höhe variabel. Mit Hilfe eines verschiebbaren Zwischeneinsatzes konnte der

Haubeninnenraum (Messkammervolumen) der aktuellen Wuchshöhe der Versuchspflanzen angepasst werden. Die maximale Höhe dieser Haubenaufsätze betrug dabei 80 cm. So waren Untersuchungen von N_2O -Konzentrationsveränderungen während verschiedener Entwicklungsphasen möglich. Um während der Akkumulationszeit ein Aufheizen im Haubeninneren zu vermeiden, wurde die erwärmte Luft permanent heruntergekühlt. Dabei wurde im oberen Bereich der Haube Luft abgeführt, durch ein Kühlbad geleitet und erneut zurückgeführt. Bei dieser Luftzirkulation gelangt weder Haubeninnenluft nach außen, noch wurde atmosphärische Frischluft eingeleitet (geschlossenes Luftkreislaufsystem). Die bei diesem Vorgang ausgetragene Feuchtigkeit wurde in einer Waschflasche aufgefangen und quantitativ erfasst.

Die Versuchspflanzen wurden zusätzlich in Experiment 4 (2.6.1.2.) für Untersuchungen zur Erfassung von NH_3 -Emissionen eingesetzt. Von einer erneuten Aufführung der Beschreibung versuchstechnischer Grundlagen, einschließlich der Anzucht und Nährstoffversorgung der Versuchspflanzen, wurde abgesehen. Die entsprechenden Angaben sind in Kapitel 2.6.1.2. nachzulesen.

DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN

Es wurden insgesamt vier zeitlich versetzte Versuche dieser Art durchgeführt. In Tabelle 29 sind die Beprobungstermine und andere wichtige Daten zur Durchführung der Untersuchungen dargestellt.

Unmittelbar vor dem Platzieren der Haubenaufsätze wurde die Nährlösung gewechselt und der Spross - am Übergang zur Wurzel - im Bereich der Bohröffnung erneut mit einer Knetmasse abgedichtet, um einen eventuellen Gasaustausch zwischen unterem und oberem Gefäßteil vollständig zu unterbinden.

Nach Ablauf der Akkumulationszeit, die exakt 24 h umfasste, erfolgte die Beprobung der Haubeninnenluft. Die Probenluft wurde in einem vorab evakuierten Vakutainergläschen, welches mit einem Septum gasdicht verschlossen war, mit Hilfe einer Kanüle aufgenommen. Die Kanüle war zuvor in das Haubeninnere durch eine entsprechende Vorrichtung hineingestochen worden. Die Probenahme erfolgte in dreifacher Wiederholung. Im Anschluss daran wurden die Hauben geöffnet. Die im Vakutainergläschen enthaltene Probeluft wurde an einem Gaschromatographen (HP 5890) mittels eines ECD (Elektroneneinfangdetektor) analysiert (Leick, 2004).

Zur Erfassung von N_2O -Konzentrationsveränderungen innerhalb eines Versuchssystems ist die Bestimmung der N_2O -Konzentration außerhalb der Hauben (Hintergrundkonzentration) erforderlich. So erfolgte die Beprobung der umgebenden Atmosphärenluft unmittelbar vor dem Schließen der Hauben und unmittelbar nach Ablauf der Akkumulationszeit. Dabei kamen ebenfalls evakuierte Vakutainergläschen zum Einsatz.

Pro Versuch wurden zwischen vier bis sechs Luftbeprobungen durchgeführt. Dabei reichte das Entwicklungsstadium der Versuchspflanzen während der Untersuchungen von der Bestockungsphase bis hin zur Blüte. Zum Teil lagen die Beprobungstermine in sehr dichter Abfolge. Dies erfolgte in der Absicht, die Messtechnik durch Wiederholungen zu überprüfen.

Im Anschluss an die letzte Probenahme wurden die Versuchspflanzen geerntet und die Erträge bestimmt.

Tab. 29: Versuchsdaten zu Experiment 13: N₂O-Messungen bei Sommerweizen in Nährlösung bei unterschiedlicher N-Angebotsform [NO₃⁻-N / NH₄⁺-N] (Haubengefäßversuche)

N ₂ O-Messungen bei Sommerweizen	Messung [Nr.]	Probenahme [Datum]	Pflanzenalter z. Zt. d. Messungen [d]	Entwicklungsstadium z. Zt. d. Messungen
Versuch 1 26.06.1997 bis 15.08.1997	1	07.08.1997	42 - 43	Schossphase
	2	08.08.1997	43 - 44	unverändert
	3	11.08.1997	46 - 47	unverändert
	4	14.08.1997	49 - 50	Blatthäutchen-Stadium
Versuch 2 30.09.1997 bis 28.11.1997	1	29.10.1997	29 - 30	Ende der Bestockung
	2	31.10.1997	31 - 32	unverändert
	3	07.11.1997	38 - 39	Schossphase
	4	11.11.1997	42 - 43	Schossphase
	5	18.11.1997	49 - 50	Blatthäutchen-Stadium
	6	27.11.1997	58 - 59	Beginn des Ährenschiebens
Versuch 3 17.12.1997 bis 24.02.1998	1	18.01.1998	32 - 33	Beginn des Schossens
	2	23.01.1998	37 - 38	Schossphase
	3	29.01.1998	43 - 44	4. / 5. Knoten an der Halmbasis fühlbar
	4	05.02.1998	50 - 51	Blatthäutchen-Stadium
	5	12.02.1998	57 - 58	Beginn des Ährenschiebens
	6	23.02.1998	68 - 69	Blüte
Versuch 4 17.12.1997 bis 24.02.1998	1	23.04.1998	27 - 28	Ende der Bestockung
	2	26.04.1998	30 - 31	Beginn der Schossphase
	3	29.04.1998	33 - 34	2-Knoten-Stadium
	4	18.05.1998	52 - 53	Blatthäutchen-Stadium
	5	25.05.1998	59 - 60	Beginn des Ährenschiebens

3. Ergebnisse

- 3.1. Auswertung der folgenden Experimente nach
- Wachstumsverhalten
 - Ertrag und N_t -Konzentrationen
 - NH_3 -Emissionen
 - Alkalität in der pflanzlichen Asche
 - Konzentrationen an NH_4^+ -Ionen und löslichen Aminosäuren
- 3.1.1. Experiment 1: Quarzsandkulturversuch mit Sommerweizen bei unterschiedlicher N-Angebotsmenge

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Der Keimvorgang des vorgequollenen Sommerweizensamens verlief zügig und gleichmäßig. Knapp 3 Wochen nach Aussaat begannen sich die jungen Pflanzen zu bestocken. Bis zu Beginn des *Schossens*, 5 Wochen nach Aussaat, lagen keine äußeren Wachstumsdifferenzen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen vor. Erst im weiteren Verlauf zeichneten sich visuelle Entwicklungsunterschiede ab. Dabei wiesen die Pflanzen der N1-Variante gegenüber denen der N2- und der N3-Variante geringere Wuchshöhen, schmalere Blattspreiten und eine blass- bis gelbgrüne Blattfärbung auf. Ferner war zu beobachten, dass die Pflanzen der N1-Variante in ihrer Gesamtentwicklung etwas fortgeschrittener waren. Während sie bereits 5 ½ Wochen nach Aussaat das Stadium des *Ährenschiebens* erreicht hatten, befanden sich die Pflanzen der N2-Variante zum selben Zeitpunkt im *Blatthäutchen-Stadium*. Zu Versuchsende waren die Pflanzen der N1-Variante voll ausgereift. Die Pflanzen der N2- und N3-Variante standen indessen gerade in der *Teigreife*.

Der visuelle Unterschied zwischen den Pflanzen der N2- und N3-Variante war während der gesamten Versuchsdauer sehr gering. Zu Versuchsende wiesen die Pflanzen der N3- gegenüber der N2-Variante eine etwas höhere Produktion an pflanzlicher Biomasse auf. Gleichzeitig setzte die Reife der leicht *N-überversorgten* Pflanzen (N3) mit etwas Verzögerung ein.

N-KONZENTRATIONEN IM OBERIRDISCHEN GESAMTSPROSS

Die zu Beginn der NH_3 -Messungen untersuchten N-Konzentrationen im oberirdischen Gesamtspross der Versuchspflanzen sind in Abbildung 4 dargestellt. Entsprechend der N-Versorgung wiesen die Pflanzen der N1-Variante eine leichte N-Unterversorgung auf, während die Pflanzen der N2-Variante optimal und die Pflanzen der N3-Variante leicht N-überversorgt waren. Dabei erfolgte die Beurteilung in Anlehnung an die Angaben von Bergmann (1993) über »ausreichende N-Konzentrationen für optimales Wachstum« bei Sommerweizen.

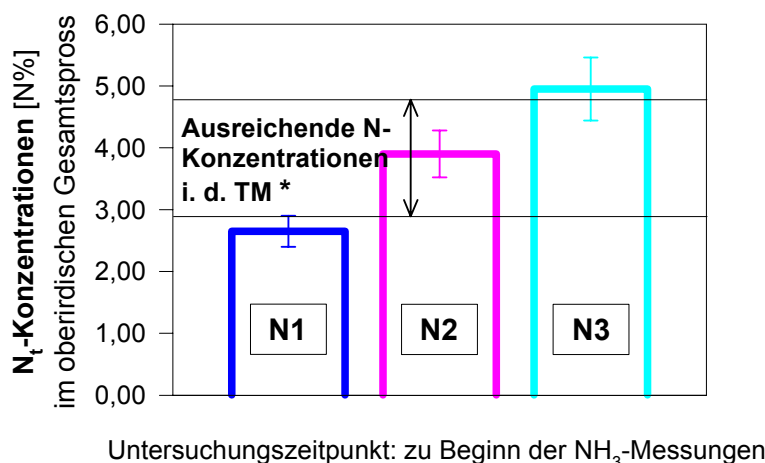


Abb. 4:
Experiment 1:
N-Konzentrationen
im oberirdischen
Gesamtspross von
Sommerweizen in
Abhängigkeit von dem
N-Versorgungsgrad der
Pflanzen zu Beginn der
Windtunnelmessungen
(* nach Bergmann, 1993)

Der unterschiedliche N-Versorgungszustand der Versuchspflanzen war die entscheidende Voraussetzung für das zu untersuchende NH_3 -Emissionsverhalten der Pflanzen dieses Versuches.

ERTRÄGE

In Übereinstimmung mit den Wachstumsbeobachtungen ergaben sich in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen Unterschiede in der Ertragsbildung (Tab. 30). So erzielten die Pflanzen der N1-Variante erwartungsgemäß die geringsten und die Pflanzen der N3-Variante die höchsten Frisch- und Trockengewichte. Die N-Konzentrationen in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte entsprachen gleichfalls dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen. Dabei wurde zwischen den Fraktionen Wurzel, Ähre und übriger oberirdischer Spross unterscheiden.

Zwischen den Versuchsvarianten N2 und N3 waren die Ertrags- und N-Konzentrationsunterschiede allerdings deutlich geringer als zwischen den Versuchsvarianten N1 und N2 .

NH_3 -EMISSIONEN

Die Höhe der absoluten NH_3 -Emissionsverluste, deren Erfassung über nahezu die gesamte Vegetationszeit erfolgte, lag auf relativ niedrigem Niveau (Abb. 5). Dennoch hatte der N-Versorgungsgrad der Pflanzen einen klaren Einfluss auf die Höhe der NH_3 -Abgabe. Je höher der N-Versorgungsgrad, desto höher die NH_3 -Emissionen aus Pflanzen. So emittierten die Pflanzen der N3-Variante mit 13 mg NH_3 -N pro Versuchsgefäß 75 % mehr als die Pflanzen der N1-Variante mit 7,5 mg NH_3 -N. Unter Berücksichtigung des N_t -Gehaltes im oberirdischen Gesamtspross zur Zeit der Ernte waren die Unterschiede zwischen den N-Versorgungsvarianten deutlich geringer (Tab. 30).

Die in Abbildung 5 dargestellten Graphiken gehen aus kumulativer Berechnung der aufeinanderfolgenden 24-h-Einzel- NH_3 -Messwerte hervor.

Während sich der Verlauf der NH_3 -Emissionskurve der N1- von der N2-Variante erkennbar unterscheidet (Abb. 5: obere und untere Grafik), verlaufen die NH_3 -Emissionskurven der N2- und N3-Variante (Abb. 5: Mitte und unten) annähernd parallel zueinander. Innerhalb der ersten, knapp 30 Tage umfassenden Messphase (bis etwa 60 Tage nach Aussaat) waren die NH_3 -Emissionsverluste mit dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen positiv korreliert. So wiesen die Pflanzen der N1-Variante die geringsten und die Pflanzen der N3-Variante die höchsten NH_3 -Verluste auf. Im Anschluss daran nahmen die NH_3 -Emissionen der Pflanzen der N1-Variante infolge der durch N-Unterversorgung induzierten fortgeschritteneren physiologischen Entwicklung stärker zu als bei der N2- und N3-Variante. Zu diesem Zeitpunkt standen die Pflanzen der N1-Variante bereits in der *Milchreife*, während die Pflanzen der N2- und N3-Variante gerade in ihrer *Blühphase* waren. Während der letzten Messphase, 130 bis 150 Tage nach Aussaat, trat bei den Pflanzen der N2- und insbesondere der N3-Variante ein deutlicher NH_3 -Emissionsanstieg auf, der dazu führte, dass die Gesamt- NH_3 -Verluste zu Versuchsende hier erheblich höher ausfielen als bei der N1-Variante.

Die NH_3 -Messwerte der N2- und N3-Variante lagen fast während des gesamten Versuchszeitraumes auf vergleichbarem Niveau. Erst gegen Ende der Untersuchungen, ab 140 Tage nach Aussaat, wurde bei der N3-Variante ein stärkerer NH_3 -Emissionsanstieg gegenüber der N2-Variante verzeichnet.

Bei genauerer Betrachtung zeigten alle drei Versuchsvarianten ein vergleichbares NH_3 -Emissionsverhalten. Im Jugendstadium der Pflanzen waren die NH_3 -Emissionsverluste zunächst relativ gering, die Emissionskurve verlief flach ansteigend. Im Anschluss daran folgte eine mehr oder minder ausgeprägte Stagnation, zum Teil sogar eine leichte Abnahme der NH_3 -Emissionen. Im weiteren Verlauf ab etwa 60 Tage nach Aussaat stiegen die NH_3 -Emissionen, beeinflusst von der N-Versorgung, erneut an. Danach folgte wieder eine Phase der Stagnation, während zur Reife hin ein weiterer, deutlich ausgeprägter Anstieg der Kurven beobachtet wer-

den konnte. Im Falle einer unzureichenden N-Versorgung (N1-Variante) setzte, verursacht durch eine vorzeitige Abreife, das Ende der NH_3 -Freisetzung früher ein.

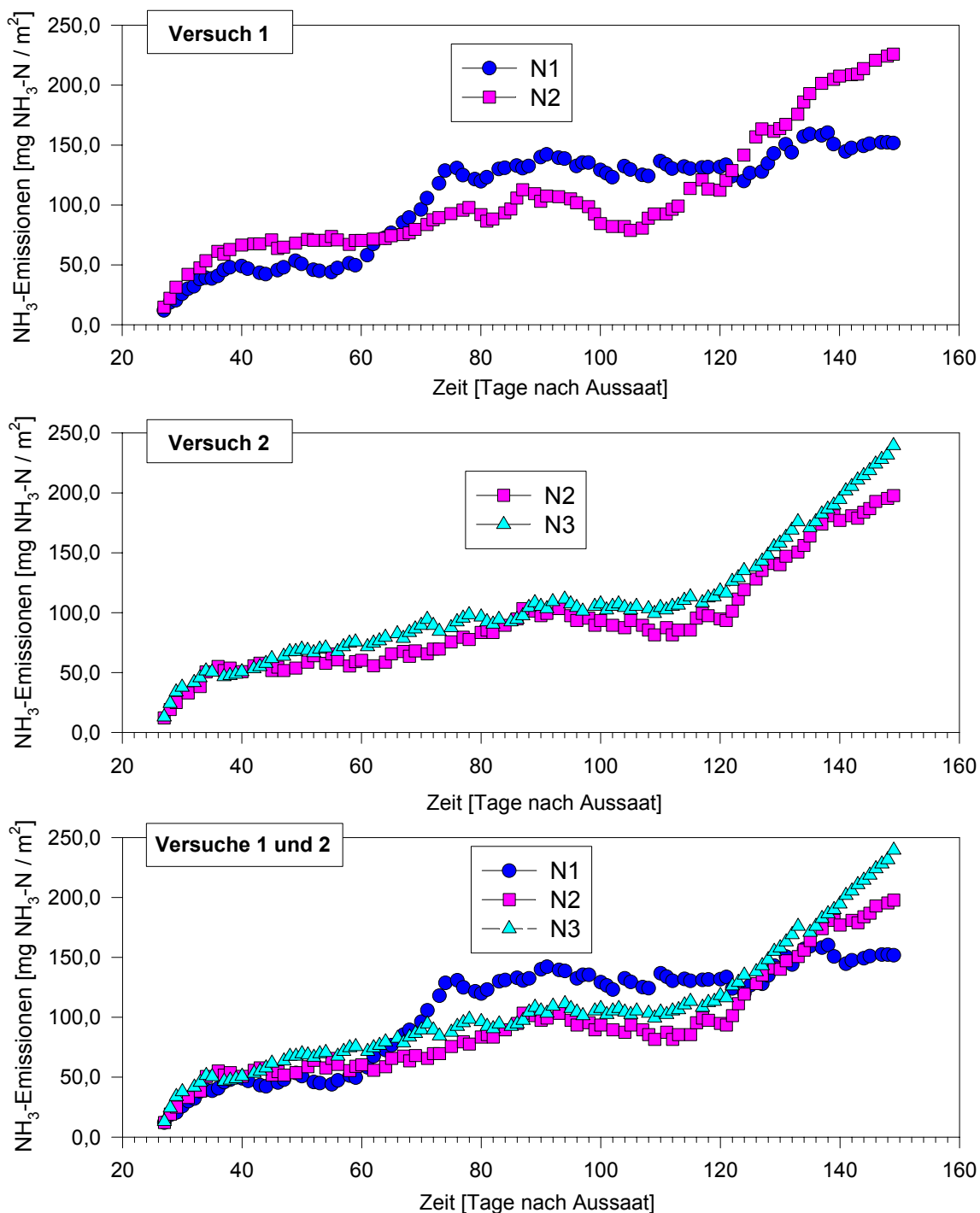


Abb. 5: Experiment 1: Quarzsandkulturversuch: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenbeständen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen; oben: Versuch 1 (N1 und N2), Mitte: Versuch 2 (N2 und N3), unten: Versuch 1 und 2 (N2 = Mittelwerte aus den Versuchen 1 und 2)

Tab. 30: Experiment 1: **Ertragsbildung** und **NH₃-Emissionsverluste** bei Sommerweizen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen (Quarzsandkulturversuch)

		Erträge				
		FG	TS-Gehalt	TS	N _t	N _t
		[g/Gefäß]	[%]	[g/Gefäß]	[%]	[g/Gefäß]
N1	Ähre	30,37	86,7	26,33 (± 1,74)	3,01	0,79
	Spross	46,22	86,3	39,89 (± 2,27)	0,95	0,38
	Wurzel			20,57 (± 1,64)	0,41	0,08
	Summe	76,59		86,80 (± 5,74)		1,26
N2*	Ähre	38,75	86,2	33,41 (± 3,54)	3,9	1,30
	Spross	51,86	85,8	44,50 (± 4,75)	1,2	0,53
	Wurzel			22,36 (± 2,04)	0,66	0,15
	Summe	90,61		100,26 (± 9,34)		1,98
N3	Ähre	42,80	83,9	35,91 (± 2,78)	3,43	1,23
	Spross	55,19	85,2	47,02 (± 4,04)	1,36	0,64
	Wurzel			23,11 (± 1,98)	0,75	0,17
	Summe	97,99		106,04 (± 8,12)		2,04

NH₃-Emissionen			
	NH ₃ -N	NH ₃ -N	[% d. N _t -Gehaltes
	[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	zur Ernte] (errechnet)
N1	7,47 (± 0,74)	131 (± 12,9)	0,59 (± 0,05)
N2*	11,47 (± 1,22)	201 (± 23,5)	0,58 (± 0,06)
N3	13,10 (± 1,14)	229 (± 20,9)	0,64 (± 0,06)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung; * N2 = Mittelwerte aus den Versuchen 1 u. 2

STICKSTOFFBILANZIERUNG ZU VERSUCHSENDE

Nach Beendigung der NH₃-Untersuchungen erfolgte die N-Bilanzierung. Dabei wurde die Gesamtmenge des Dünger-Stickstoffs als N-Input den drei Fraktionen N-AUFNAHME (Pflanze), SICKERWASSER-BODEN-N und NH₃-N-EMISSION als N-Output gegenübergestellt. Der SALDO stellt die Differenz zwischen In- und Output dar (Gl. 2).

N-INPUT	-	N-OUTPUT	=	SALDO
· GESAMT-N-DÜNGERMENGE		· N-AUFNAHME (PFLANZE) · SICKERWASSER-BODEN-N · NH ₃ -N-EMISSION		NICHT WIEDER AUFFINDBARES N

Gleichung 2

In der Summe von Einzelgaben erhielt die N1-Variante 1,8 g NO₃-N, die N2-Variante 3,5 g NO₃-N und die N3-Variante 5,0 g NO₃-N.

In der Fraktion N-AUFNAHME wurde der N-Gehalt der Ähren, des ährenlosen Sprosses und der Wurzeln nach vorausgegangener Einzelanalyse zusammengefasst.

Die Pflanzen der N1-Variante wiesen mit 1,26 g N deutlich geringere N_t -Gehalte gegenüber den Pflanzen der N2- und der N3-Variante mit 1,98 g N und 2,04 g N auf. Damit wurden bei den Pflanzen der N1-Variante 70 % des Gesamt-N-Düngers, bei den Pflanzen der N2-Variante knapp 57 % und bei den Pflanzen der N3-Variante gut 40 % in der Fraktion N-AUFNAHME wiedergefunden.

Die als Sickerwasser- und Boden-N deklarierte N-Outputfraktion beinhaltete zum einen die regelmäßig aus dem Versuchssystem entfernte Sickerlösung, zum anderen die zu Versuchsende gewonnene Restsickerlösung sowie das mit N angereicherte Wasser, das beim Durchspülen des Quarzsandes anfiel.

Nach dem Waschen des Quarzsandes mit entionisiertem Wasser wurde anschließend eine Substrat-N-Analyse nach der N_{\min} -Methode zur Erfassung von Restgehalten an NO_3^- - und NH_4^+ -N durchgeführt. Die ermittelten Messwert-Konzentrationen waren so gering, dass keine gesonderte Darstellung dieser Daten erfolgte. Sie wurden zu der Fraktion SICKERWASSER-BODEN-N dazu addiert.

Nach der Zusammenstellung des N-Outputs erfolgte das Errechnen des SALDOS der jeweiligen Versuchsvariante (Tab. 31). Die Höhe des Saldos lag zwischen 10 und 12 %. Das bedeutet, der Verbleib von circa zwölf Prozent des eingesetzten Dünger-Stickstoffs konnte nicht geklärt werden (Abb. 6). Nach der indirekten Methode zur Erfassung von NH_3 -Emissionen, die nicht auf Messungen sondern auf Berechnungen basiert, müsste theoretisch die gesamte als Saldo bilanzierte N-Menge den NH_3 -N-Verlusten zugerechnet werden. Die real gemessenen NH_3 -N-Emissionsverluste betragen allerdings bei allen Varianten weniger als 0,5 % des eingesetzten Dünger-Stickstoffs (Tab. 31). Aufgrund dieser geringen Konzentrationen war eine grafische Darstellung der NH_3 -N-Emissionsverluste als N-Output-Fraktion an der Gesamtmenge des eingesetzten Dünger-Stickstoffs nicht möglich (Abb. 6).

Die Berechnung der NH_3 -Emissionen als prozentualer Anteil des bilanzierten Saldos veranschaulicht die große Diskrepanz zwischen direkter und indirekter Methode (Tab 31, letzte Spalte). So betrug der Anteil der tatsächlichen NH_3 -N-Emissionsverluste - gemessen im Windtunnel - am errechneten Saldo gerade einmal 2,4 bis 4,0 %.

Tab. 31: Experiment 1: Quarzsandkulturversuch: **N-Bilanzierung** der eingesetzten N-Düngermenge in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen

		N1	N2	N3
N-Input	N-Zugabe über	1,80	3,50	5,00
	Nährlösung [g N/Gefäß]			
N-Output:				
• N-Aufnahme durch Pflanzen	[g N/Gefäß] - gemessen -	1,26 ($\pm 0,09$)	1,98 ($\pm 0,17$)	2,04 ($\pm 0,19$)
	[% d. N-Zufuhr]	70,0	56,6	40,8
• Sickerwasser-Boden-N	[g N/Gefäß] - gemessen -	0,36 ($\pm 0,033$)	1,08 ($\pm 0,09$)	2,40 ($\pm 0,25$)
	[% d. N-Zufuhr]	19,8	31,2	48,3
• NH_3 -N-Emission	[g N/Gefäß] - gemessen -	0,0075 ($\pm 8 \cdot 10^{-4}$)	0,0115 ($\pm 9 \cdot 10^{-4}$)	0,0131 ($\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$)
	[% d. N-Zufuhr]	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Saldo:				
(N-Input abzüglich N-Output)	[g N/Gefäß] - errechnet -	0,18	0,43	0,55
	[% d. N-Zufuhr]	10,25	12,28	10,90
NH_3-N-Emission	[in % des Saldos]	4,02	2,65	2,40

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

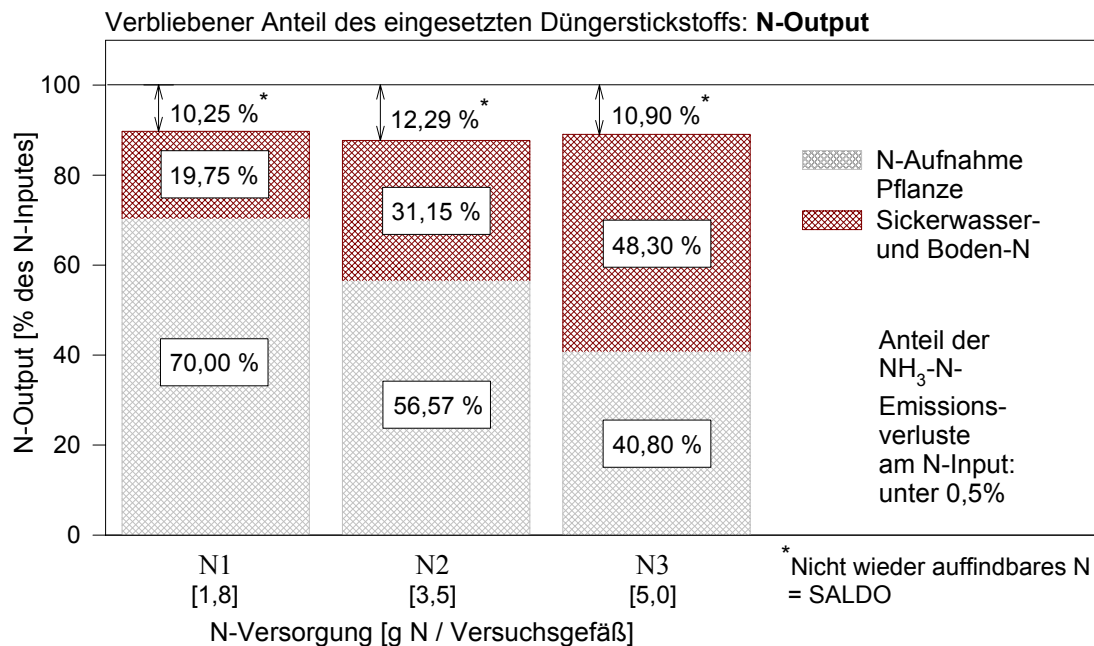


Abb. 6: Experiment 1: Quarzsandkulturversuch: **N-Bilanzierung** der eingesetzten N-Düngermenge in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen

3.1.2. Experiment 2: Mineralbodenversuche mit Sommerweizen bei unterschiedlicher N-Angebotsmenge

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

1. AUSSAAT

Die Anzucht der Versuchspflanzen verlief zügig und problemlos. Es entwickelten sich homogene Pflanzenbestände. Etwa 2 ½ Wochen nach Aussaat traten visuelle Wachstumsdifferenzen zwischen den Pflanzen der beiden N-Versorgungsvarianten N1/N2 auf. Die Pflanzen der N1-Variante wiesen eine schneller fortschreitende Entwicklung bei gleichzeitiger Verschlechterung des Gesamthabitus gegenüber den kräftigen Pflanzen der N2-Variante auf.

Zu Beginn der NH_3 -Messungen im Windtunnel hatten die Versuchspflanzen die *Hauptschossphase* erreicht. Bei den Pflanzen der N1-Variante wurden Wuchshöhen von 35 cm, bei den Pflanzen der N2-Variante dagegen von maximal 30 cm gemessen. Ferner waren die Pflanzen der N1-Variante durch ein blasses Grün gekennzeichnet, während die Pflanzen der N2-Variante eine *sattgrüne* Färbung aufwiesen. Diese Entwicklungs- und Wachstumsdifferenzen blieben über die gesamte Versuchsdauer bestehen. Zu Versuchsende standen die Pflanzen der N1-Variante in der Phase der *Teigreife*. Die Einzelpflanzen zeigten auffallend dünne Sprossstengel, schmale Blattspreiten und partiell stark chlorotische Aufhellungen. Die Mehrzahl der unteren Blätter waren hier nekrotisch und teilweise vom Spross abgelöst. Dagegen wies die N2-Variante gesunde, zu reifen beginnende (*Milchreife*) Pflanzen auf, bei denen lediglich die älteren, unteren Blätter chlorotische Aufhellungen zeigten.

2. AUSSAAT

Die Anzucht der Pflanzen des Wiederholungsversuches (2. AUSSAAT) verlief optimal. Die warmen Lufttemperaturen Mitte August 1997 begünstigten die pflanzliche Entwicklung. Anhand von Bonitierungsdaten, die regelmäßig aufgezeichnet wurden, konnte eine vergleichende Gegenüberstellung von Wachstumsverlauf und Entwicklungsmerkmalen der vorangegangenen

Untersuchung (1. AUSSAAT) erfolgen. Dabei war eine hohe Übereinstimmung zu beobachten. Auch die durch den unterschiedlich hohen N-Versorgungsgrad induzierten Wachstumsdifferenzen zwischen den Pflanzen der beiden Versuchsvarianten stimmten mit denen der 1. AUSSAAT weitgehend überein.

ERTRÄGE

1. AUSSAAT

Die Wachstumsbeobachtungen ließen bereits auf zu erwartende Ertragsunterschiede zwischen den N-Versorgungsvarianten schließen. Ein unzureichendes N-Angebot verursachte eine reduzierte Produktion an pflanzlicher Biomasse. So erzielten die Pflanzen der N1- gegenüber denen der N2-Variante fast 25 % geringere Trockengewichte (Tab. 32). Auch die N_t -Konzentrationen in der Trockensubstanz zur Zeit der Ernte lagen bei den Pflanzen der N2-Variante auf signifikant höherem Niveau als bei den Pflanzen der N1-Variante. Die Ähren der N2-Variante wiesen fast 30 % höhere, das übrige Sprossmaterial sogar über 50 % höhere N-Konzentrationen auf. Somit nahmen die Pflanzen der N2-Variante im Vergleich zu den Pflanzen der N1-Variante 80 % mehr Stickstoff pro Versuchsgefäß auf (Tab. 32).

2. AUSSAAT

Auch im zeitlich versetzten Versuch (2. Aussaat) waren die Trockengewichte des oberirdischen Gesamtssprosses bei den Pflanzen der N1- gegenüber der N2-Variante deutlich reduziert (Tab. 32). Ebenso signifikante Unterschiede ergaben sich für die N_t -Konzentrationen in der Trockensubstanz und den N-Entzug durch die Pflanzen zu Versuchsende. Mit 3,3 % N_t wiesen die Pflanzen der N2-Variante 57 % höhere N-Konzentrationen auf als die Pflanzen der N1-Variante mit nur 2,1 % N_t . Nach den Angaben BERGMANN'S (1993) über ausreichende N-Konzentrationen in der pflanzlichen Trockenmasse waren die Pflanzen der N2-Variante optimal und die Pflanzen der N1-Variante unzureichend mit N versorgt (Abb. 7).

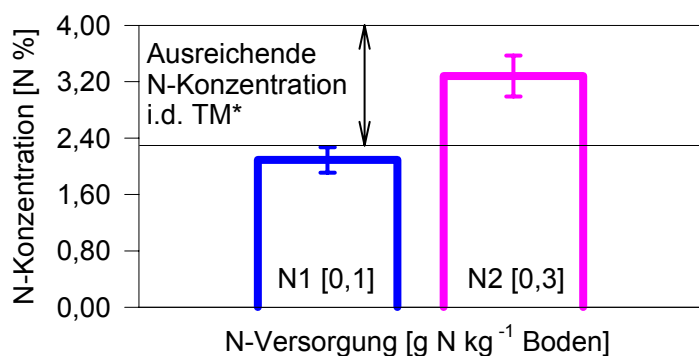


Abb. 7:
Experiment 2:
N-Konzentrationen im oberirdischen Gesamtsspross von Sommerweizen (2. AUSSAAT) in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen zu Versuchsende (* nach Bergmann, 1993)

Tab. 32: Experiment 2: **Ertragsbildung** und **NH₃-Emissionsverluste** bei Sommerweizen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen

Sommerweizen in Mineralboden N1 / N2			Erträge			NH ₃ -Emissionen		
			TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]	NH ₃ -N [mg/Gefäß]	NH ₃ -N [mg/m ²]	[% d. N _t -Gehaltes zur Ernte]
1. Aussaat	N1	Ähre	19,13	3,36	0,64			
		Spross	23,19	1,97	0,46			
		Summe	42,32		1,10	3,53 (± 0,33)	61,9 (± 5,78)	0,32 (± 0,028)
	N2	Ähre	22,49	4,34	0,98			
		Spross	32,93	3,06	1,01			
		Summe	55,42		1,98	7,36 (± 0,82)	129,1 (± 14,38)	0,37 (± 0,041)
2. Aussaat	N1	ges. Pflanze	6,26	2,09	0,13	0,79 (± 0,066)	13,9 (± 1,16)	0,61 (± 0,059)
	N2	ges. Pflanze	8,61	3,28	0,28	0,64 (± 0,072)	11,2 (± 1,26)	0,23 (± 0,025)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

NH₃-EMISSIONEN

1. AUSSAAT

Die Höhe der NH₃-Gesamtemissionen aus den untersuchten Sommerweizenbeständen wurde von der Höhe der N-Versorgung deutlich beeinflusst (Abb. 8). Die Pflanzen der N2-Variante emittierten während des knapp 9 Wochen umfassenden Untersuchungszeitraums mit insgesamt 7,36 mg NH₃-N über 100 % mehr als die Pflanzen der N1-Variante mit 3,53 mg NH₃-N pro Versuchsgefäß. Mit Erhöhung der N-Versorgung - N2 gegenüber N1- wurde überproportional viel NH₃ emittiert, was auf einen *ineffizienten N-Stoffwechsel* der Pflanzen mit hoher N-Versorgung hindeutet.

Bis etwa 3 Wochen nach Messbeginn zeigten die NH₃-Emissionskurven, die aus kumulativer Berechnung der Einzelmesswerte hervorgingen, bei beiden Varianten nur einen geringen Anstieg. Im Anschluss daran - zu Beginn des *Ährenschiebens* etwa 7 Wochen nach Aussaat - setzte eine Phase mit hoher NH₃-Freisetzung ein. Dabei wurden die NH₃-Emissionsverluste der N1-Variante zeitweise von denen der N2-Variante übertroffen. Gleiches konnte bereits bei dem Quarzsandkulturversuch beobachtet werden und wird dem durch N-Mangel induzierten Entwicklungsvorsprung bei den Pflanzen der N1-Variante zugeschrieben.

Während bei der N1-Variante eine vorübergehende Stagnation der NH₃-Emissionen eintrat, hielt der Emissionsanstieg bei der N2-Variante unverändert an. In den letzten 12 Untersuchungstagen war bei der N1-Variante ein erneuter Anstieg der NH₃-Freisetzung zu beobachten, der gegenüber der N2-Variante aber deutlich geringer ausfiel.

Bezogen auf den N_t-Gehalt in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte waren die NH₃-Emissionsverluste der N2-Variante gegenüber denen der N1-Variante nur wenig erhöht (Tab. 32, letzte Spalte).

2. AUSSAAT

Wie in Abbildung 8 (unten) dargestellt, hatte die N-Angebotsmenge bei der 2. AUSSAAT ebenfalls Einfluss auf die Höhe der NH₃-Emissionen des untersuchten Sommerweizens. Dabei traten bei den Pflanzen der N1-Variante nach Ablauf des 3 Wochen umfassenden Messzeitraumes knapp 25 % höhere NH₃-Emissionsverluste auf als bei den Pflanzen der N2-Variante. Unter Berücksichtigung des N_t-Gehaltes in der pflanzlichen Trockenmasse zu Versuchsende waren die Gesamt-NH₃-Emissionsverluste bei der N1-Variante gegenüber der N2-Variante sogar um 165 % erhöht (Tab. 32). Dieses, gegenüber den vorangegangenen Versuchen zunächst wider-

sprüchlich erscheinende Ergebnis zeigt, dass die Abgabe von $\text{NH}_3\text{-N}$ sehr stark von der Wachstumsphase (Entwicklungsstadium) der Versuchspflanzen abhängig ist. Ein unzureichendes N-Angebot hat eine zügigere Entwicklung mit vorzeitiger physiologischer Alterung der Pflanzen zur Folge. Da die NH_3 -Freisetzung an bestimmte Stoffwechselprozesse gebunden ist, die wiederum während einzelner Entwicklungsphasen unterschiedlich stark ausgeprägt sind, kommt es in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen zu einer zeitlichen Verschiebung der NH_3 -Emissionskurven. Die letzten Messungen deuten eine Veränderung der NH_3 -Freisetzungsraten an. Die Pflanzen der N2-Variante emittierten während der letzten 5 Tage deutlich mehr NH_3 als die Pflanzen der N1-Variante. Eine Verlängerung des Untersuchungszeitraumes hätte vermutlich zur Folge gehabt, dass die Gesamt- NH_3 -Emissionsverluste der N2-Variante gegenüber der N1-Variante erhöht ausgefallen wären.

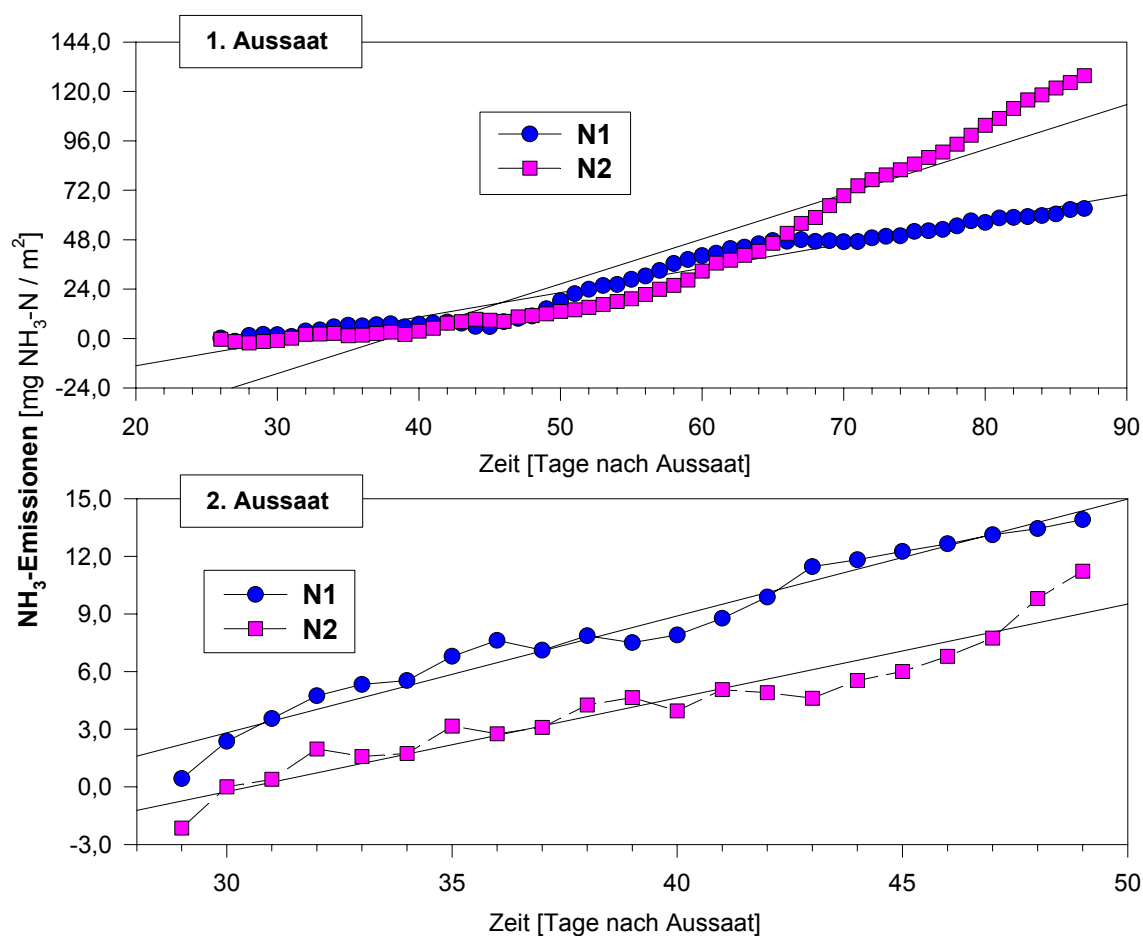


Abb. 8: Experiment 2: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenbeständen in Abhängigkeit von der N-Versorgung der Pflanzen; oben: **1. Aussaat**; unten: **2. Aussaat**

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE ZU VERSUCHSENDE

In beiden Einzelversuchen konnte eine Beziehung zwischen der Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche und dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen beobachtet werden. Bei unzureichender N-Versorgung (N1) wurde gegenüber optimaler N-Versorgung (N2) eine erhöhte Alkalität gemessen. Während bei der 1. AUSSAAT zwischen »Ähren« und »ährenlosem Spross« unterschieden wurde, erfolgten die Untersuchungen bei der 2. AUSSAAT mit dem »oberirdischen Gesamtspross« (Abb. 9).

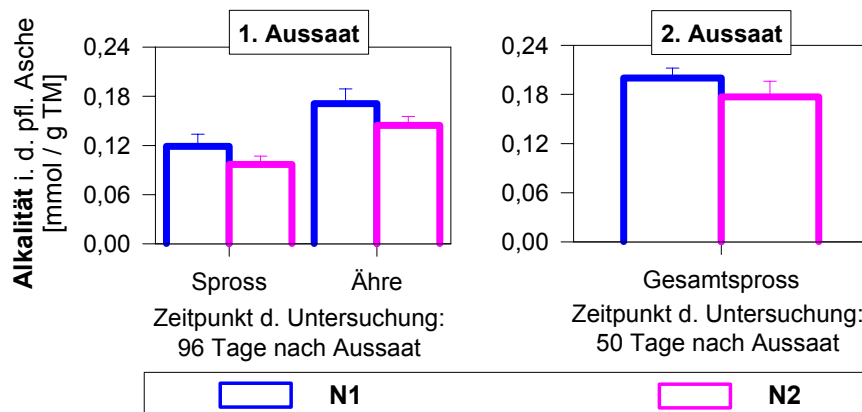


Abb. 9:
Experiment 2:
Einfluss des N-
Versorgungsgrades
auf die Konzentration
der **Alkalität** in
der pflanzlichen Asche
bei Sommerweizen zu
Versuchsende

3.1.3. Experiment 3: Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen bei unterschiedlicher N-Angebotsmenge

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

VERSUCH 1

Bei allen fünf Einzelversuchen verlief die Pflanzenanzucht gleichmäßig und ohne Besonderheiten. Einer zügigen Keimung folgte stets eine ebenso günstig verlaufende Weiterentwicklung. Die junge Pflanzen waren kräftig und widerstandsfähig.

Während die Aussaat bei den VERSUCHEN 1 und 2 jahreszeitlich bedingt in einer Klimakammer erfolgte, wurden die Pflanzen in den VERSUCHEN 3 bis 5 in der Vegetationshalle angezogen.

Drei bis vier Wochen nach Aussaat wurden erste Wachstumsdifferenzen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen sichtbar. Die Pflanzen der N1-Variante waren in ihrer physiologischen Entwicklung im Allgemeinen weiter fortgeschritten. Die einzelnen Entwicklungsphasen, so auch die *Seneszenz* als sichtbarer Alterungsprozess, wurden deutlich früher eingeleitet als bei den Pflanzen der N2-Variante. Gleichzeitig aber waren die Pflanzen der N1-Variante durch einen schwächeren Gesamthabitus und eine meist blassgrüne Blattfärbung gekennzeichnet. In Bezug auf die Produktion an pflanzlicher Biomasse lagen sie hinter den Pflanzen der N2-Variante zurück.

Bonitierungsdaten, deren Aufzeichnung regelmäßig zu jedem Versuch erfolgte, machten eine vergleichende Gegenüberstellung der Entwicklung der Pflanzen aus den verschiedenen Versuchen möglich. Dabei dienten die Bestimmung der Wuchshöhe, der Halmstärke und des Blattflächenindex sowie der »visuelle Allgemeinzustand« des pflanzlichen Gesamthabitus' als primäre Vergleichskriterien.

Zu Versuchsende standen die Pflanzen der VERSUCHE 1 und 4 in der *Schossphase*. Dabei war die Wuchshöhe bei den Pflanzen der N1-Variante gegenüber der N2-Variante um 3-4 cm erhöht.

Der Befall mit Blattläusen machte bei VERSUCH 2 den Einsatz von Metasystox®, einem systemisch wirkenden Insektizid, erforderlich. Zu Beginn der NH₃-Messungen, 8 ½ Wochen nach Aussaat, war das zwischenzeitlich etwas zögernde Wachstum wieder ausgeglichen. Wie die Auswertung der Bonitierungsdaten später ergab, lagen im Vergleich zu den Pflanzen der vorangegangenen und nachfolgenden Untersuchungen keine größeren Entwicklungsdifferenzen vor. Nach Ablauf der Messungen hatten die Pflanzen der N2-Variante das Stadium der *Blüte* erreicht, während die Pflanzen der N1-Variante dieses Stadium zu diesem Zeitpunkt teilweise bereits abgeschlossen hatten. Bei VERSUCH 3 lag in Bezug auf die pflanzliche Entwicklung zu Versuchsende eine vergleichbare Situation vor.

Begünstigt durch den sehr milden Spätsommer hatten die Pflanzen in VERSUCH 5 nach Ablauf der Untersuchungen im Windtunnel das *Reifestadium* erlangt. Dabei befanden sich die Pflanzen der N1-Variante bereits in der *Teigreife*, die Pflanzen der N2-Variante dagegen erst in der *Milchreife*.

ERTRÄGE

Wie die Wachstumsbeobachtungen bereits vermuten ließen, wurde die Ertragsbildung in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen bei allen Versuchen beeinflusst. Dabei wiesen die Pflanzen der N2-Variante gegenüber der N1-Variante einen Mehrertrag an pflanzlicher Frischmasse von bis zu 28 % auf. Die Trockengewichte waren bei der N2-Variante gegenüber der N1-Variante um maximal 25 % erhöht (Tab. 33a). Bei Versuch 4 lag der Mehrertrag an pflanzlicher Trockenmasse zwischen N2- und N1-Variante allerdings unter 5 % (Tab. 33a).

Die N_t-Konzentrationen in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte waren bei der N2-Variante zwischen 20 bis 60 % höher als bei der N1-Variante. Das bedeutet, dass von den Pflanzen der N2-Variante bis zu 100 % mehr Stickstoff pro Versuchsgefäß aufgenommen wurde, als von den Pflanzen der N1-Variante.

In Tabelle 33a sind die Erträge, N_t-Konzentrationen und N-Entzüge der fünf zeitlich versetzten Versuche aufgeführt.

Tab. 33a: Experiment 3: **Ertragsbildung** bei Sommerweizen in Nährlösung bei unterschiedlich hohem N-Versorgungsgrad der Pflanzen

Sommerweizen in Nährlösung Varianten: N1 / N2			ERTRÄGE		
			TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
VERSUCH 1	ges. oberirdische Pflanze	N1	8,88	3,48	0,31
		N2	9,67	5,01	0,48
VERSUCH 2	ges. oberirdische Pflanze	N1	23,00	2,80	0,64
		N2	27,86	3,90	1,09
VERSUCH 3	ges. oberirdische Pflanze	N1	26,27	2,00	0,53
		N2	32,90	3,20	1,05
VERSUCH 4	ges. oberirdische Pflanze	N1	9,17	3,20	0,29
		N2	9,55	3,87	0,37
VERSUCH 5	Ähre	N1	14,40	2,90	0,42
	Spross		22,31	2,78	0,62
	Summe		36,71		1,04
	Ähre	N2	16,66	3,86	0,64
	Spross		26,66	3,46	0,92
	Summe		43,32		1,56

Tab. 33b: Experiment 3: Höhe der **NH₃-Emissionen** bei Sommerweizen in Nährlösung bei unterschiedlich hohem N-Versorgungsgrad der Pflanzen

Sommerweizen in Nährlösung Varianten: N1 / N2		NH₃-Emissionen			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _t -Gehaltes zur Ernte]
Versuch 1	N1	0,57 (± 0,061)	14,9 (± 1,59)	0,15 (± 0,016)	0,18 (± 0,02)
	N2	0,38 (± 0,032)	9,9 (± 0,83)	0,10 (± 8,3 ⁻³)	0,08 (± 6,9 ⁻³)
Versuch 2	N1	1,18 (± 0,106)	31,1 (± 2,79)	0,31 (± 0,028)	0,18 (± 0,018)
	N2	1,57 (± 0,118)	41,4 (± 3,11)	0,41 (± 0,031)	0,14 (± 0,013)
Versuch 3	N1	1,26 (± 0,129)	33,1 (± 3,41)	0,33 (± 0,034)	0,24 (± 0,026)
	N2	1,96 (± 0,160)	51,6 (± 4,23)	0,52 (± 0,042)	0,19 (± 0,018)
Versuch 4	N1	1,18 (± 0,091)	30,9 (± 2,38)	0,31 (± 0,024)	0,41 (± 0,040)
	N2	0,87 (± 0,079)	22,9 (± 2,08)	0,23 (± 0,021)	0,24 (± 0,025)
Versuch 5	N1	2,32 (± 0,158)	61,1 (± 4,15)	0,61 (± 0,041)	0,22 (± 0,019)
	N2	5,08 (± 0,416)	133,7 (± 10,96)	1,34 (± 0,11)	0,33 (± 0,031)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

NH₃-EMISSIONEN

In allen fünf Einzelversuchen wurde die NH₃-Freisetzung von der N-Angebotsmenge der Versuchspflanzen beeinflusst (Tab. 33b; Abb. 10).

Bei VERSUCH 1 lag die Höhe der absoluten NH₃-Emissionsverluste entsprechend der sehr kurzen Messdauer von nur 7 Tagen auf niedrigem Gesamtniveau. Dennoch trat der Einfluss des N-Angebotes der Pflanzen deutlich hervor. So emittierten die Pflanzen der N1-Variante 50 % mehr NH₃-N pro Versuchsgefäß im Vergleich zu den Pflanzen der N2-Variante. Dabei sind die höheren NH₃-Verluste bei der N1-Variante erneut auf eine durch unzureichende N-Versorgung induzierte beschleunigte physiologische Alterung der Pflanzen gegenüber den Pflanzen der N2-Variante mit optimaler N-Versorgung zurückzuführen. Die NH₃-Emissionskurven beider Varianten zeigen einen übereinstimmenden, nahezu parallelen Verlauf. Die Darstellung der NH₃-Hintergrundkonzentrationen zeigt, wie die NH₃-Freisetzungsraten durch die NH₃-Konzentrationen der umgebenden Atmosphäre beeinflusst wurde. Bei geringer NH₃-Hintergrundkonzentration war die NH₃-Abgabe erhöht, während sie bei hoher NH₃-Hintergrundkonzentration geringer ausfiel (Abb. 10a). Wie in der Einleitung erwähnt, wird die Rate und Richtung des NH₃-Fluxes bei Pflanzen von dem Verhältnis zwischen dem NH₃-Partialdruck im Blattinneren und dem NH₃-Partialdruck in der Atmosphäre beeinflusst (Seite 3). In dieser Untersuchung variierte der atmosphärische NH₃-Partialdruck mit entsprechender Wirkung auf die NH₃-Abgabe der Versuchspflanzen.

In VERSUCH 2 emittierten die Pflanzen der N2-Variante 34 % mehr NH₃-N als die Pflanzen der N1-Variante. Auch hier waren die NH₃-Emissionskurven aufgrund des ungleichen physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanzen der N1- und N2-Variante verschoben. Bis 64 Tage nach Aussaat lagen die NH₃-Emissionsverluste der N1-Variante oberhalb denen der N2-Variante. Im Anschluss daran änderte sich dies. Die NH₃-Freisetzungsraten der N2-Variante nahmen stärker zu als die der N1-Variante und übertraf diese deutlich (Abb. 10a).

Wie aus der Literatur bekannt, besteht im allgemeinen zwischen der Höhe der absoluten NH₃-Emissionen und dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen eine positive Korrelation. Je höher die

N-Versorgung, desto höher die NH_3 -Freisetzungsrate bei Pflanzen (Harper et al., 1987; Schjoerring et al., 1993). Auch die Versuche mit Quarzsandkultur und Mineralböden zeigten dieses Ergebnis. Voraussetzung ist dabei, dass die NH_3 -Messungen über einen längeren Zeitraum erfolgen. Dann zeigt sich bei unzureichender N-Versorgung eine schon bald eintretende, mehr oder minder starke Stagnation der NH_3 -Emissionen, während bei hoher N-Versorgung der NH_3 -Emissionsanstieg über einen deutlich längeren Zeitraum anhält.

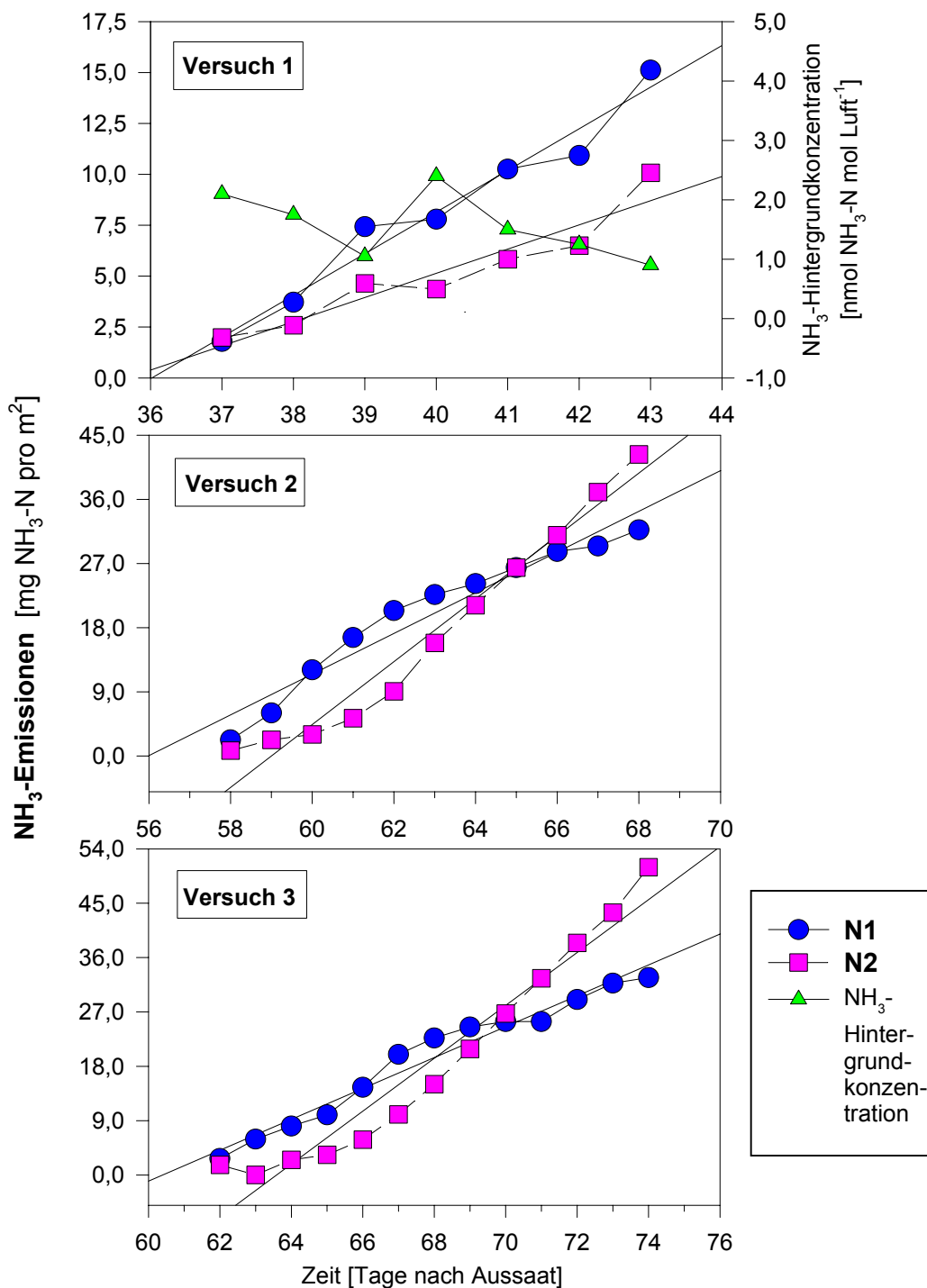


Abb. 10a: Experiment 3: VERSUCHE 1-3: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenbeständen in Abhängigkeit von der N-Angebotsmenge der Versuchspflanzen

In VERSUCH 3 waren die absoluten NH_3 -Emissionsverluste bei den Pflanzen der N2-Variante gegenüber der N1-Variante um 55 % erhöht. Dabei wiesen die Pflanzen der N1-Variante während der ersten acht Messungen eine höhere NH_3 -Freisetzung auf als die Pflanzen der N2-Variante. Erst im Anschluss daran lagen die NH_3 -Emissionsverluste der N2-Variante auf höherer Stufe (Abb. 10a).

In VERSUCH 4 war die über die gesamte Versuchsdauer freigesetzte NH_3 -Menge bei den Pflanzen der N1-Variante gegenüber der N2-Variante um 36 % erhöht. Dabei hatte der N-Versorgungsgrad der Pflanzen während der ersten 8 Messungen, bis zu einem Alter von 4 ½ Wochen, nur wenig Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung (Abb. 10b).

In VERSUCH 5 emittierten die Pflanzen der N2-Variante gegenüber den Pflanzen der N1-Variante über 100 % mehr NH_3 . Bereits von Beginn der Messungen an konnte bei den Pflanzen der N2-Variante eine höhere NH_3 -Freisetzung beobachtet werden. Zwischen der 13. und 18. Messung traten bei beiden Versuchsvarianten negative Messwerte auf, die einen leicht inhomogenen Verlauf der Emissionskurven zur Folge hatten. Die Ursache dafür war der plötzliche Anstieg der NH_3 -Hintergrundkonzentration (Abb. 10c), der vermutlich durch den Einsatz wirtschaftseigener Düngemittel mit hohen NH_3 -Ausgasungsverlusten in unmittelbarer Umgebung zustande kam.

Unter Berücksichtigung des N_t -Gehaltes in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte ergab sich bei der vergleichenden Gegenüberstellung der Gesamt- NH_3 -Emissionsverluste der N1- und N2-Variante ein etwas anderes Ergebnis (Tab. 33b, letzte Spalte). In den VERSUCHEN 1 bis 4 wiesen die Pflanzen der N1-Variante bezogen auf den N_t -Gehalt in der TM höhere NH_3 -Emissionen auf als die Pflanzen der N2-Variante.

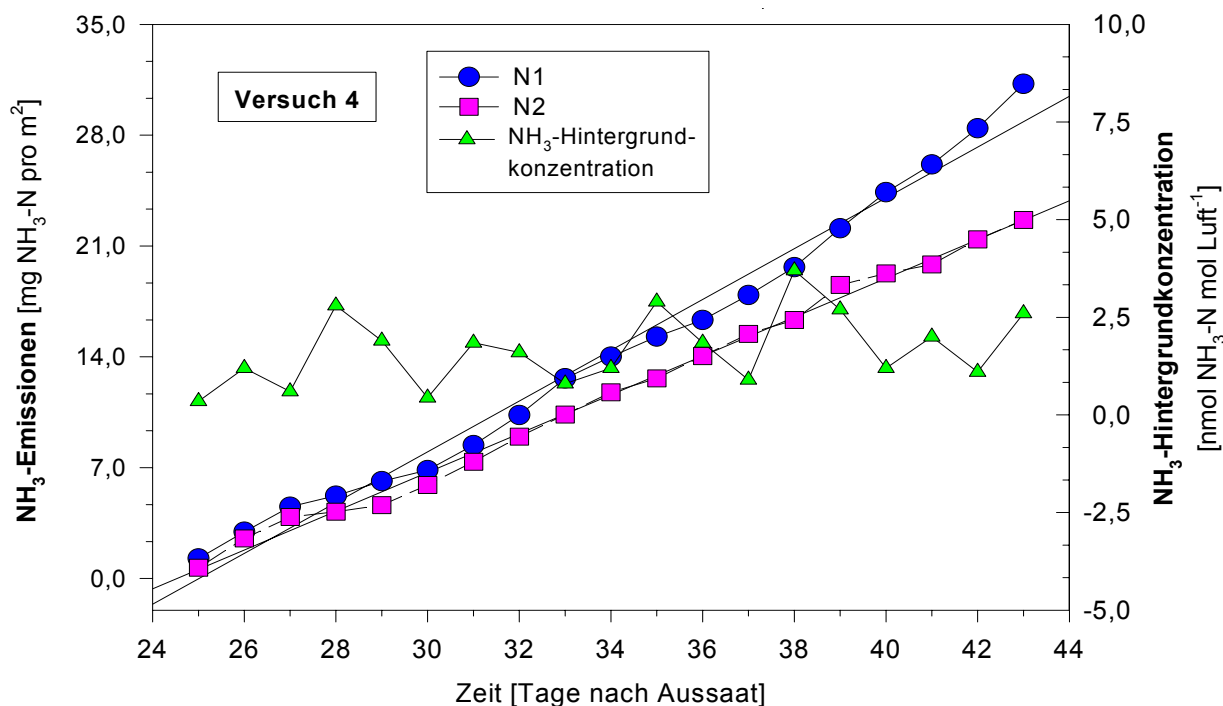


Abb. 10b: Experiment 3: VERSUCH 4: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenbeständen in Abhängigkeit von der N-Angebotsmenge der Versuchspflanzen

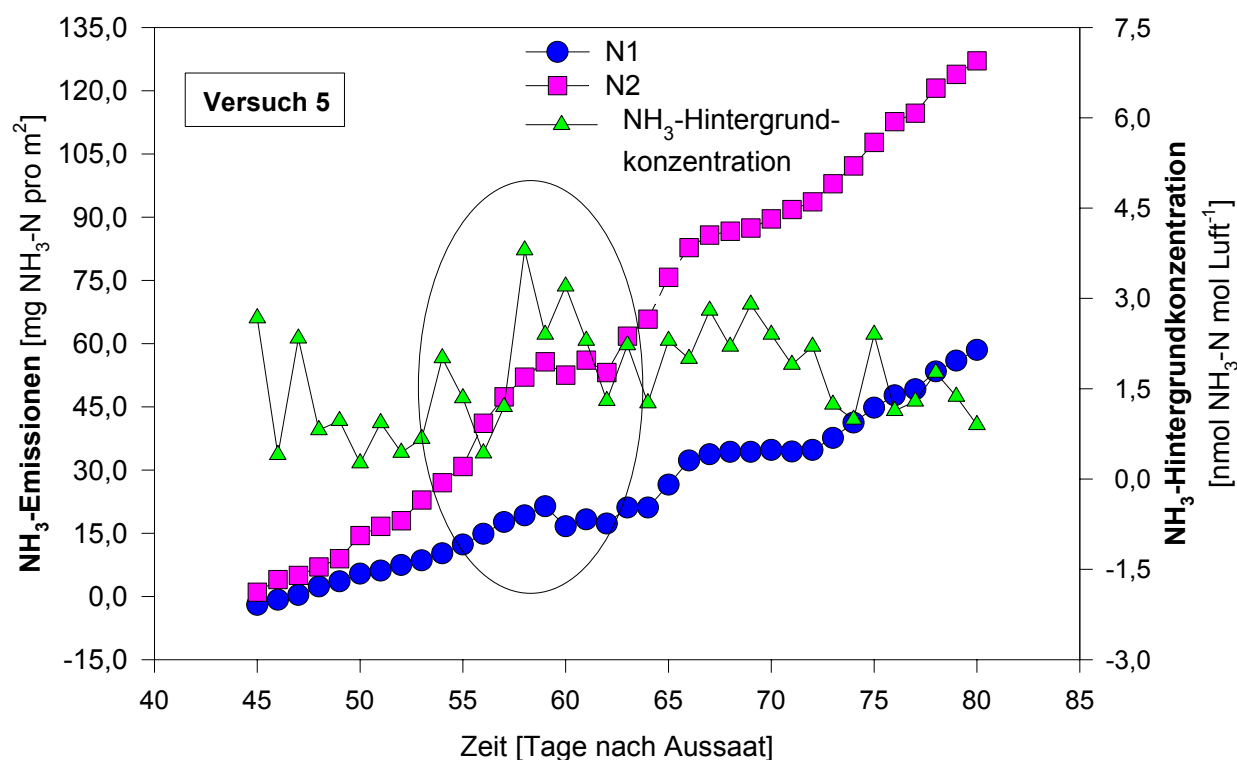


Abb. 10c: Experiment 3: VERSUCH 5: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenbeständen in Abhängigkeit von der N-Angebotsmenge der Versuchspflanzen

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Auch die Konzentration der Alkalität im oberirdischen Gesamtpross, deren Bestimmung in der pflanzlichen Asche zu verschiedenen Beprobungsterminen erfolgte, wurde von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen beeinflusst (Abb. 11). Dabei war die Konzentration der Alkalität bei den Pflanzen der N1-Variante gegenüber der N2-Variante zu allen Beprobungsterminen signifikant erhöht. Darüber hinaus spielte der Untersuchungszeitpunkt und folglich das Entwicklungsstadium der Versuchspflanzen im Hinblick auf die Konzentration der Alkalität eine entscheidende Rolle. Mit zunehmendem Pflanzenalter konnte zunächst eine Erhöhung der Alkalität beobachtet werden. Nach Erreichen eines Maximums zum Stadium des *Ährenschiebens*, etwa 9 Wochen nach Aussaat, fielen die Alkalitätsmesswerte erneut ab. Dieses Ergebnis konnte bei allen 5 Versuchen gleichermaßen beobachtet werden.

Die Höhe der Konzentration der Alkalität in den Ähren zum Zeitpunkt der *Vollreife* blieb von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen unbeeinflusst (ohne Abbildung).

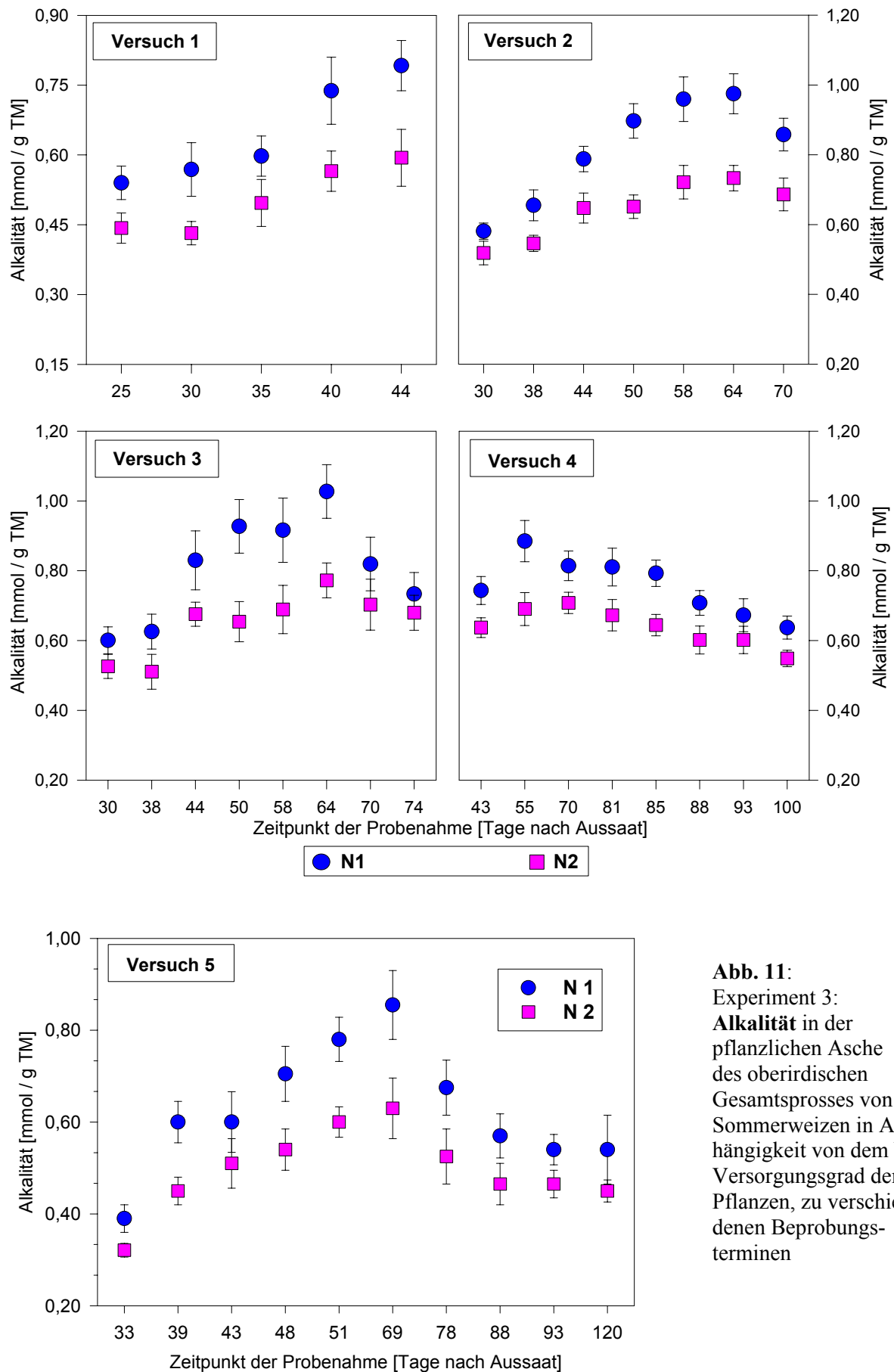


Abb. 11:
 Experiment 3:
 Alkalität in der
 pflanzlichen Asche
 des oberirdischen
 Gesamtprozesses von
 Sommerweizen in Ab-
 hängigkeit von dem N-
 Versorgungsgrad der
 Pflanzen, zu verschie-
 denen Beprobungs-
 terminen

FREIES AMMONIUM

Die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im oberirdischen Gesamtspross der Versuchspflanzen, deren Bestimmung zu verschiedenen Beprobungsterminen erfolgte, wurde von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen nicht beeinflusst (Abb. 12). So wiesen die Pflanzen weder bei mangelnder noch bei ausreichender N-Versorgung (N1/N2) eine erhöhte Akkumulation an freien NH_4^+ -Ionen auf. Dagegen wurden in Abhängigkeit von dem Entwicklungsstatus der Versuchspflanzen unterschiedliche NH_4^+ -Konzentrationen im pflanzlichen Gewebe gemessen. Mit zunehmendem Pflanzenalter wurde zunächst ein kontinuierlicher Konzentrationsanstieg verzeichnet. Dieser Anstieg hielt bis etwa zur zehnten Wachstumswoche an. Im Anschluss daran trat eine erneute Abnahme der NH_4^+ -Konzentrationen ein, die bis Versuchsende fortwährte.

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtspross wurde von dem N-Versorgungsgrad der Versuchspflanzen unterschiedlich beeinflusst. Im Allgemeinen aber waren die Konzentrationen an löslichen Aminosäuren bei den Pflanzen der N2-Variante gegenüber der N1-Variante erhöht. Dagegen bestand zwischen dem Alter der Versuchspflanzen und der Höhe der Aminosäurekonzentration eine klare Beziehung. Bis etwa zur *Milchreife* - etwa 80 Tage nach Aussaat - konnte mit zunehmendem Alter ein nahezu kontinuierlicher Konzentrationsanstieg beobachtet werden. Danach trat ein starker Konzentrationsrückgang ein (Abb. 13, VERSUCH 4 und 5).

In VERSUCH 1 wiesen die Pflanzen der N2-Variante gegenüber der N1-Variante zu allen Beprobungsterminen stark erhöhte Aminosäurekonzentrationen auf (Abb. 13 oben links). Bei den VERSUCHEN 2 und 3 lagen während der ersten Untersuchungen, bis etwa zur 6./7. Wachstumswoche, zwischen den Pflanzen beider N-Versorgungsvarianten nur geringe Konzentrationsunterschiede vor. Erst im Anschluss daran wiesen die Pflanzen der N2-Variante gegenüber der N1-Variante signifikant höhere Konzentrationen an löslichen Aminosäuren auf. Dabei wurden diese Konzentrationsunterschiede mit zunehmendem Pflanzenalter größer. Auch in VERSUCH 4 lagen während der beiden ersten Beprobungen - bis 55 Tage nach Aussaat - nur geringe Unterschiede in der Aminosäurekonzentration zwischen beiden N-Versorgungsvarianten vor. Während der darauffolgenden Untersuchungen aber wiesen die Pflanzen der N2-Variante eine deutlich höhere Akkumulation an löslichen Aminosäuren als die Pflanzen der N1-Variante auf. In VERSUCH 5 wurden erst nach der dritten Untersuchung (6. Wachstumswoche) bei den Pflanzen der N2-Variante gegenüber der N1-Variante signifikant höhere Aminosäurekonzentrationen gemessen (Abb. 13 unten).

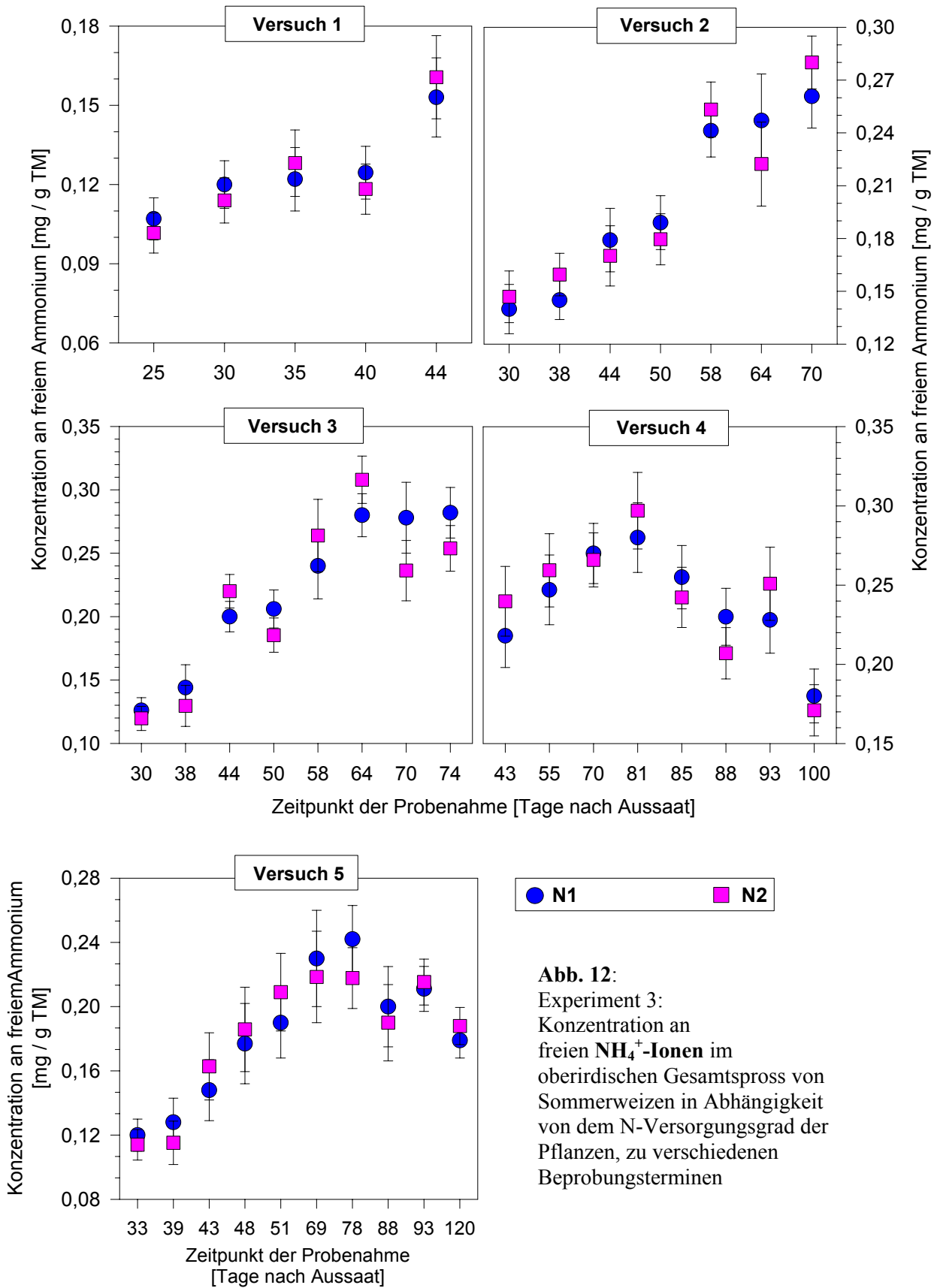


Abb. 12:
 Experiment 3:
 Konzentration an
 freien NH_4^+ -Ionen im
 oberirdischen Gesamtpross von
 Sommerweizen in Abhängigkeit
 von dem N-Versorgungsgrad der
 Pflanzen, zu verschiedenen
 Beprobungsterminen

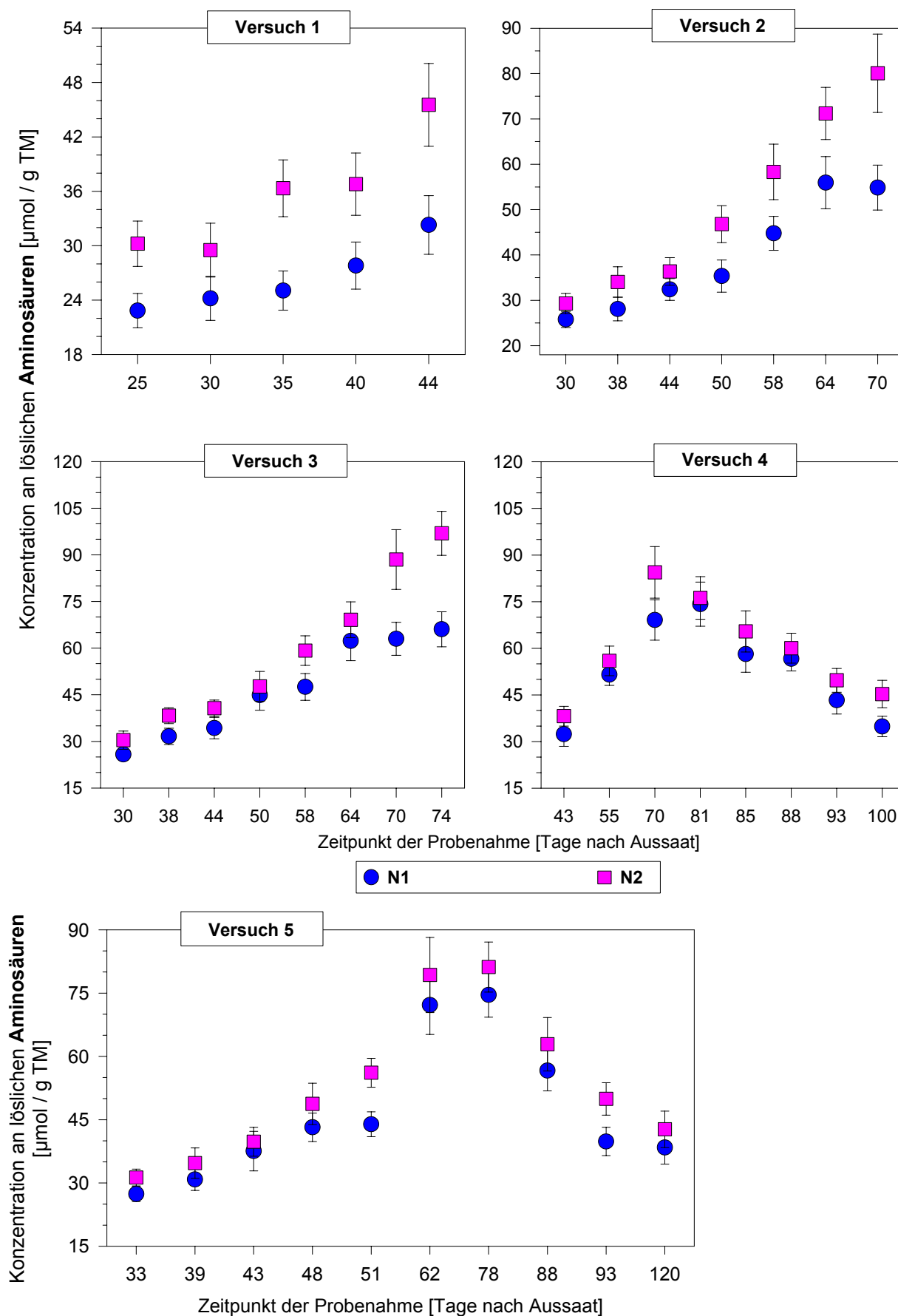


Abb. 13: Experiment 3: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtpross von Sommerweizen in Abhängigkeit von dem N-Versorgungsgrad der Pflanzen, zu verschiedenen Beprobungsterminen

3.1.4. Experiment 4:

Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen
bei unterschiedlicher N-Angebotsform· **Windtunnelversuche** bei Angebot von NO_3^- -N und NH_4^+ -N

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Bei allen drei Versuchen verlief die Pflanzenanzucht zügig und problemlos. Es entwickelten sich von Beginn an gesunde und widerstandsfähige Pflanzen. Bei Ernährung mit ausschließlich NH_4^+ -N verschlechterte sich allerdings das pflanzliche Wachstum. So wiesen die Pflanzen gegenüber reiner NO_3^- -N-Versorgung einen schwächeren Gesamthabitus sowie ein blasser erscheinendes Blattgrün auf. Gleichzeitig schien die physiologische Entwicklung (Alterung) bei NH_4^+ -N-Ernährung etwas zügiger zu verlaufen. Außerdem kam es vorzeitig zum Auftreten von Blattchlorosen.

In VERSUCH 1 hatten die Pflanzen zu Beginn der NH_3 -Messungen im Windtunnel - 14 Wochen nach Aussaat - die *Reifephase* erreicht. Dabei lag bei Angebot von NH_4^+ -N das Übergangsstadium »*Teig-Vollreife*«, bei Angebot von NO_3^- -N dagegen das Übergangsstadium »*Milch-Teigreife*« vor. Nach Ablauf der 18 Tage umfassenden NH_3 -Messungen standen alle Versuchspflanzen im Stadium der vollen *Seneszenz*. Bei Versorgung mit NH_4^+ -N kam es allerdings verstärkt zur Bildung nekrotischen Blattgewebes mit vorzeitigem Blattabwurf.

In VERSUCH 2 wiesen die Pflanzen zu Beginn der NH_3 -Messungen - knapp acht Wochen nach Aussaat - bei Angebot von NH_4^+ -N einen deutlich schwächeren Gesamthabitus auf als bei Angebot von NO_3^- -N. Sieben Tage später wurden die Messungen beendet. Die Pflanzen standen zu diesem Zeitpunkt im Stadium des *Ährenschiebens*.

In VERSUCH 3 waren zu Beginn der NH_3 -Messungen - drei Wochen nach Aussaat - noch keine pflanzlichen Wachstumsdifferenzen in Abhängigkeit von der N-Versorgungsform zu beobachten. Während des drei Wochen umfassenden Untersuchungszeitraumes im Windtunnel stellte sich bei Angebot von NH_4^+ -N erneut eine allgemeine Verschlechterung des pflanzlichen Wachstums ein.

ERTRÄGE

Die Wachstumsbeobachtungen gaben bereits Hinweise auf die Ertragsbildung der Versuchspflanzen. Bei den VERSUCHEN 1 und 3 lag die Produktion an pflanzlicher Frisch- und Trockenmasse unabhängig von der mineralischen N-Versorgungsform auf vergleichbarem Niveau (Tab. 34). Dagegen wurden in VERSUCH 2 bei Angebot von NO_3^- -N knapp 17 % höhere Frisch- und 12 % höhere Trockengewichte als bei Angebot von NH_4^+ -N erreicht.

In VERSUCH 1 wurde die N-Aufnahme von der mineralischen N-Versorgungsform beeinflusst. So lag die N-Aufnahme pro Versuchsgefäß bei Angebot von NH_4^+ -N um mehr als 20 % höher als bei Angebot von NO_3^- -N. Demzufolge waren auch die N_t -Konzentrationen in der Trockenmasse bei den NH_4^+ -ernährten Pflanzen zur Zeit der Ernte erhöht. Bei Angebot von NH_4^+ -N wurden in den Ähren 11 % und im übrigen Sprossmaterial 38 % höhere N_t -Konzentrationen gemessen als bei Angebot von NO_3^- -N (Tab. 34).

Bei den VERSUCHEN 2 und 3 blieben die N_t -Konzentrationen in der pflanzlichen Trockenmasse von der Form des angebotenen Stickstoffs dagegen unbeeinflusst (Tab.34). Den Angaben Bergmanns (1993) zufolge lagen die N_t -Konzentrationen bei beiden N-Versorgungsvarianten im optimalen Bereich.

Tab. 34: Experiment 4: **Ertragsbildung** (oben) und Höhe der **NH₃-Emissionen** (unten) bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der mineralischen N-Angebotsform der Pflanzen (in Nährlösung)

Sommerweizen in Nährlösung Varianten: NO ₃ ⁻ -N / NO ₄ ⁺ -N			ERTRÄGE		
			TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
VERSUCH 1	NO ₃ ⁻ -N	Ähre	37,42	2,84	1,06
		Spross	39,64	1,14	0,45
		Σ	77,05		1,51
	NH ₄ ⁺ -N	Ähre	37,21	3,15	1,17
		Spross	40,69	1,58	0,64
		Σ	77,90		1,81
VERSUCH 2	NO ₃ ⁻ -N		16,91	3,43	0,58
	NH ₄ ⁺ -N		15,15	3,55	0,54
VERSUCH 3	NO ₃ ⁻ -N		9,20	5,18	0,48
	NH ₄ ⁺ -N		9,09	5,32	0,48

Sommerweizen in Nährlösung Varianten: NO ₃ ⁻ -N / NO ₄ ⁺ -N		NH ₃ -Emissionen			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _t -Gehaltes zur Ernte]
VERSUCH 1	NO ₃ ⁻ -N	3,17 (± 0,259)	83,4 (± 6,84)	0,83 (± 0,068)	0,21 (± 0,019)
	NH ₄ ⁺ -N	4,22 (± 0,299)	111,1 (± 7,89)	1,11 (± 0,079)	0,23 (± 0,017)
VERSUCH 2	NO ₃ ⁻ -N	0,20 (± 0,019)	5,3 (± 0,50)	0,05 (± 4,7*10 ⁻³)	0,03 (± 2,7*10 ⁻³)
	NH ₄ ⁺ -N	1,29 (± 0,010)	33,9 (± 2,54)	0,34 (± 0,032)	0,24 (± 0,019)
VERSUCH 3	NO ₃ ⁻ -N	0,74 (± 0,065)	19,5 (± 1,72)	0,19 (± 0,017)	0,16 (± 0,014)
	NH ₄ ⁺ -N	1,61 (± 0,164)	42,4 (± 4,32)	0,42 (± 0,043)	0,33 (± 0,034)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

NH₃-EMISSIONEN

Die mineralische N-Versorgungsform hatte einen deutlichen Einfluss auf die Höhe der NH₃-Emissionen der untersuchten Weizenpflanzen (Abb. 14). In allen drei Versuchen führte die Versorgung mit ausschließlich NH₄⁺-N zu signifikant höheren NH₃-Emissionen gegenüber der Versorgung mit ausschließlich NO₃⁻-N. Dieses Ergebnis betrifft sowohl die absoluten NH₃-Emissionsverluste als auch die auf den N_t-Gehalt in der pflanzlichen Trockenmasse (Tab. 34, letzte Spalte) bezogenen Emissionswerte.

In VERSUCH 1 waren die Gesamt-NH₃-Emissionen, deren Bestimmung während der *Kornreife* erfolgte, bei Angebot von NH₄⁺-N gegenüber NO₃⁻-N um mehr als 33 % erhöht. Insbesondere zu Beginn und gegen Ende des Untersuchungszeitraumes konnten ernährungsbedingte Unterschiede im NH₃-Emissionsverhalten beobachtet werden. So wiesen die Pflanzen bei Angebot von NH₄⁺-N während der ersten acht Tage (98-106 Tage nach Aussaat) eine deutlich höhere NH₃-Freisetzungsrates auf, als bei Angebot von NO₃⁻-N. Im Anschluss daran lagen die NH₃-Emissionen bei beiden Varianten auf nahezu gleich hohem Niveau. Im letzten Messabschnitt (ab 110 Tage nach Aussaat) trat bei der NH₄⁺-N-Variante eine Stagnation der NH₃-Emissions-

kurve ein, während bei der NO_3^- -N-Variante der Kurvenanstieg zwar abflachte, sich aber dennoch weiter fortsetzte.

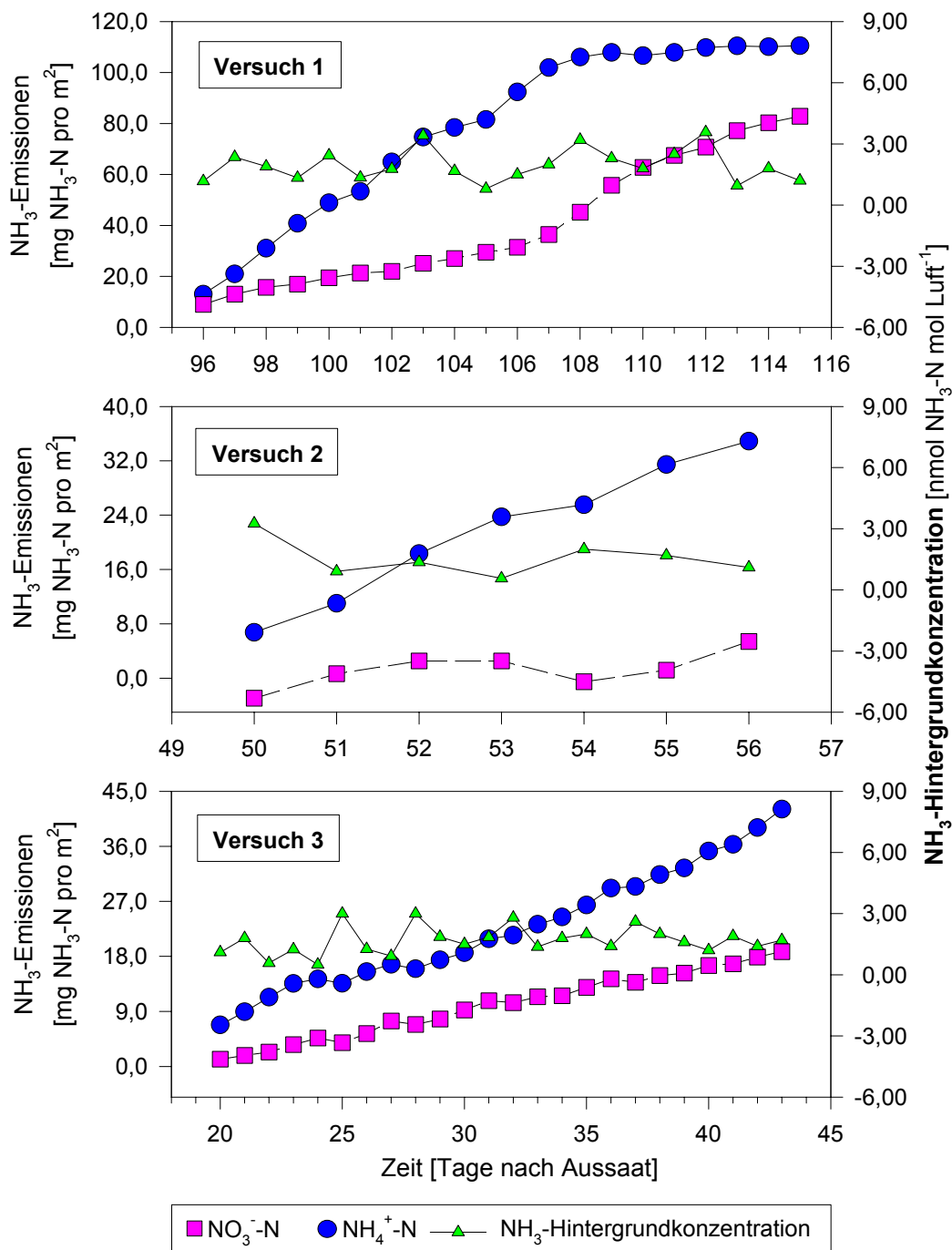


Abb. 14: Experiment 4: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizenbeständen in Abhängigkeit von der N-Angebotsform der Versuchspflanzen

In VERSUCH 2 emittierten die Pflanzen bei Angebot von NH_4^+ -N 6,5 mal mehr NH_3 pro Versuchsgefäß als bei Angebot von NO_3^- -N. Dabei erfolgte der sieben Tage umfassende Untersuchungszeitraum während der Phase des *Ährenschiebens*. Während bei den NH_4^+ -N ernährten Pflanzen ein nahezu kontinuierlicher NH_3 -Emissionsanstieg zu beobachten war, tendierten die NH_3 -Emissionen bei den NO_3^- -N ernährten Pflanzen insgesamt gesehen gegen Null. Die beiden letzten Messungen deuten allerdings eine Veränderung an.

In VERSUCH 3 waren die Gesamt- NH_3 -Emissionsverluste bei Angebot von NH_4^+ - gegenüber NO_3^- -N um mehr als 100 % erhöht. Aufgrund der sehr jungen Pflanzenbestände mit entsprechend geringer Biomasse lagen die NH_3 -Emissionen ungeachtet des verhältnismäßig langen Untersuchungszeitraumes auf niedrigem Niveau.

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Die Alkalität in der pflanzlichen Asche wurde von der mineralischen N-Angebotsform der Pflanzen deutlich beeinflusst. In allen drei Versuchen wiesen die Pflanzen bei Versorgung mit NO_3^- -N signifikant höhere Alkalitätswerte auf als bei Versorgung mit NH_4^+ -N (Abb. 15). Ferner zeigte sich, dass die Fraktion Ähre gegenüber dem übrigen ährenlosen Sprossmaterial eine signifikant höhere Alkalität aufwies. Diese Untersuchungen erfolgten mit den vollausgereiften Pflanzen aus VERSUCH 1 und den noch nicht völlig ausdifferenzierten Ähren aus VERSUCH 2.

Außerdem wurde ein Zusammenhang zwischen dem Alter der Versuchspflanzen und der Konzentration der Alkalität beobachtet. Mit zunehmendem Pflanzenalter trat eine Erhöhung der Alkalität ein. Nach Erreichen eines Maximums ging die Alkalität mit weiter zunehmendem Alter erneut zurück (gemeinsame Auswertung der VERSUCHE 1 bis 3, ohne Abb.). Während die Konzentration der Alkalität im oberirdischen Gesamtspross bei Angebot von NO_3^- -N (VERSUCH 3) kontinuierlich zunahm (Abb. 15 unten), blieb sie bei Angebot von NH_4^+ -N in der Zeit zwischen 42 und 51 Tagen nach Aussaat nahezu unverändert.

FREIES AMMONIUM

Die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen, deren Bestimmung sowohl im oberirdischen Gesamtspross als auch separat in den Fraktionen »Ähren« und »ährenloser Spross« erfolgte, wurde von der Form des angebotenen Stickstoffs stark beeinflusst (Abb. 16). Bei Angebot von NH_4^+ -N wiesen die Pflanzen sowohl in den Ähren als auch im übrigen ährenlosen Sprossmaterial signifikant höhere NH_4^+ -Konzentrationen auf als bei Angebot von NO_3^- -N.

Die NH_4^+ -Konzentration in der Fraktion »Ähre« war gegenüber der NH_4^+ -Konzentration in der Fraktion »ährenloser Spross« leicht reduziert (VERSUCH 1).

Während in den VERSUCHEN 1 und 2 die NH_4^+ -Bestimmung ausschließlich zu Versuchsende erfolgte, wurden in VERSUCH 3 auch zu früheren Terminen Beprobungen durchgeführt. Dabei konnte beobachtet werden, dass mit zunehmendem Pflanzenalter eine Erhöhung der NH_4^+ -Konzentration eintrat (Abb. 16 unten).

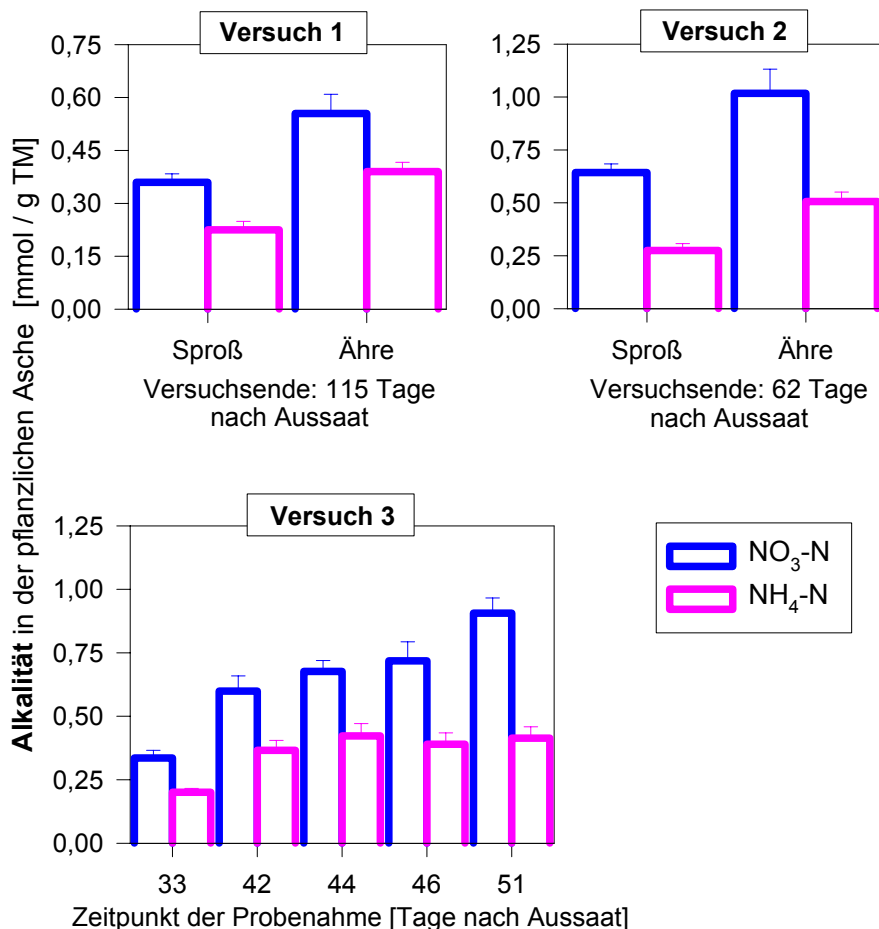


Abb. 15: Experiment 4: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtssprosses bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der mineralischen N-Versorgungsform

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Die N-Versorgungsform hatte auch deutlichen Einfluss auf die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Spross der Versuchspflanzen (Abb. 17). Die Versorgung mit $\text{NH}_4^+\text{-N}$ hatte gegenüber der Versorgung mit $\text{NO}_3^-\text{-N}$ eine Erhöhung der Aminosäurekonzentration zur Folge (Abb.17).

In VERSUCH 1 wurde der oberirdische Gesamtsspross nach Ablauf der NH_3 -Emissionsmessungen in die Fraktionen »Ähren« und »ährenloser Spross« unterteilt. Dabei zeigte sich, dass die Ähren gegenüber dem übrigen Sprossmaterial bei beiden N-Versorgungsvarianten eine deutlich höhere Konzentration an löslichen Aminosäuren aufwiesen.

Ferner spielte erneut das physiologische Alter der Pflanzen für die Akkumulation löslicher Aminosäuren eine entscheidende Rolle. So wurden in VERSUCH 3 zum Zeitpunkt der dritten und der vierten Untersuchung - 43 und 53 Tage nach Aussaat - deutlich höhere Aminosäurekonzentrationen gemessen, als zu den beiden vorangegangenen Untersuchungsterminen - 27 und 32 Tage nach Aussaat.

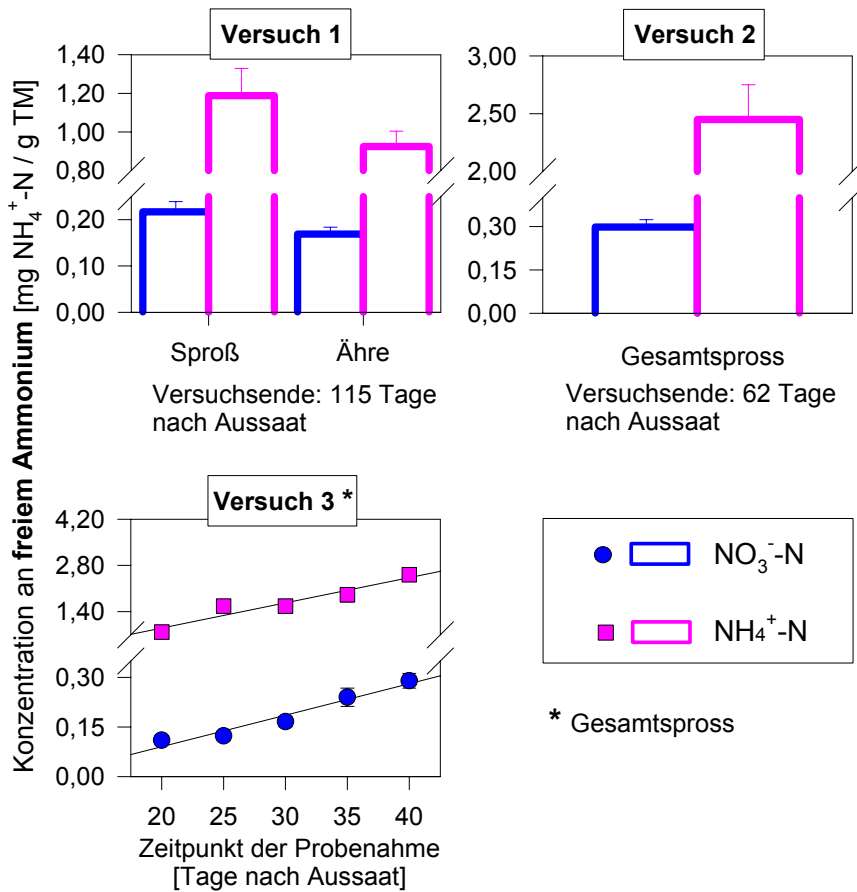


Abb. 16:
 Experiment 4:
 Konzentration an freiem Ammonium im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen in Abhängigkeit von der angebotenen N-Form

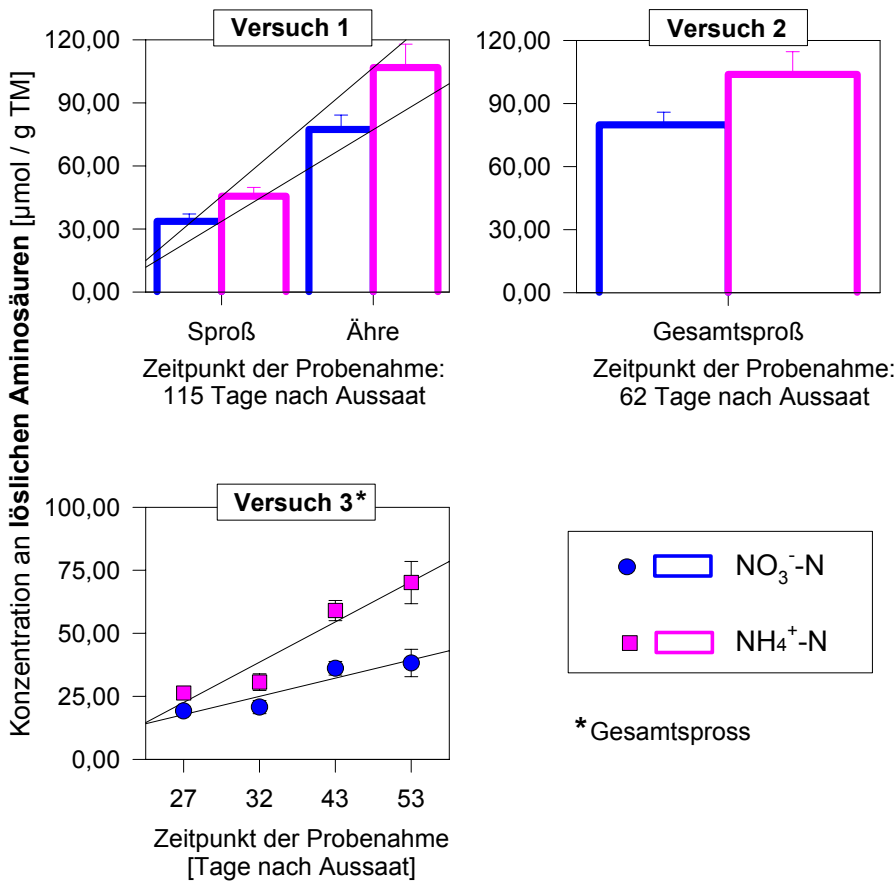


Abb. 17:
 Experiment 4:
 Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen in Abhängigkeit von der angebotenen N-Form

· Haubengefäßversuche bei Angebot von $\text{NO}_3^- \text{N}$ und $\text{NH}_4^+ \text{-N}$

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Die Pflanzenanzucht erfolgte bei allen fünf Einzelversuchen wie zuvor beschrieben und ohne Besonderheiten. Einer gleichmäßigen Keimung schloss sich eine gesunde und zügige Weiterentwicklung der Jungpflanzen an. Bonitierungsdaten zufolge lag zwischen den Pflanzen der verschiedenen Versuche große Übereinstimmung im Wachstumsverlauf vor. Bis etwa 3 ½ Wochen nach Aussaat blieb die pflanzliche Entwicklung von der jeweiligen N-Versorgungsform unbeeinflusst. Im Anschluss daran traten erste ernährungsbedingte Wachstumsdifferenzen auf, die sich mit zunehmendem Pflanzenalter aber nicht weiter verstärkten. Bei Angebot von $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ zeigten die Pflanzen eine etwas zügigere Gesamtentwicklung als bei Angebot von $\text{NO}_3^- \text{-N}$. Gleichzeitig waren bei NH_4^+ -Ernährung Halmstärken und Blattspreiten feiner und das Gesamtwachstum insgesamt schwächer ausgeprägt. Darüber hinaus traten vorzeitig chlorotische Aufhellungen auf. Demgegenüber waren die Pflanzen bei Angebot von $\text{NO}_3^- \text{-N}$ bis zu Versuchsende durch einen vitalen Gesamthabitus gekennzeichnet.

In VERSUCH 1 befanden sich die Versuchspflanzen während der vierwöchigen NH_3 -Emissionsmessungen in der Phase des *Schossens*. Nach Ablauf der Untersuchungen war das Stadium des *Ährenschiebens* erreicht. Erste, in Abhängigkeit von der N-Angebotsform hervorgerufene Wachstumsunterschiede wurden bereits zu Beginn des Messzeitraumes - knapp vier Wochen nach Aussaat - beobachtet.

In VERSUCH 2 waren während der gesamten zwanzig Tage umfassenden Versuchsdauer keine ernährungsbedingten Wachstumsdifferenzen aufgetreten. Die sieben Tage umfassenden NH_3 -Emissionsmessungen erfolgten in der Phase der *Bestockung*.

Infolge optimaler Wachstumsbedingungen in der Klimakammer während der Anzucht entwickelten sich die Pflanzen in VERSUCH 3 und 4 besonders zügig. Mit Beginn des *Schossens* traten erste visuelle Wachstumsunterschiede in Abhängigkeit von der N-Angebotsform der Versuchspflanzen auf. In VERSUCH 3 waren die Wuchshöhen der Pflanzen bei Angebot von $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ zu Versuchsende 2 cm höher als bei Angebot von $\text{NO}_3^- \text{-N}$.

Auch in VERSUCH 5 traten ab dem Zeitpunkt des *Schossens* die üblichen Wachstumsdifferenzen auf. Bei Angebot von $\text{NO}_3^- \text{-N}$ entwickelten sich erneut vitalere Einzelpflanzen und 'üppigere' Pflanzenbestände als bei Angebot von $\text{NH}_4^+ \text{-N}$. Zu Versuchsende standen die $\text{NO}_3^- \text{-N}$ -ernährten Pflanzen in der *Milchreife*, während die $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ -ernährten Pflanzen bereits den Übergang zwischen *Teig-* und *Vollreife* erreicht hatten.

ERTRÄGE

Die N-Versorgungsform der Versuchspflanzen hatte unterschiedlichen Einfluss auf die Produktion an pflanzlicher Biomasse (Tab. 35). Während bei den VERSUCHEN 1, 3, 4 und 5 die Pflanzen bei Angebot von NO_3^- - gegenüber $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ deutlich höhere Frisch- und Trockengewichte bildeten, lagen bei VERSUCH 2 keine signifikanten Ertragsunterschiede in Abhängigkeit von der N-Angebotsform vor.

In VERSUCH 1 waren die Frischgewichte bei $\text{NO}_3^- \text{-N}$ -Ernährung rund 15 % höher als bei $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ -Ernährung. Der Unterschied zwischen den Trockengewichten fiel aufgrund des höheren TS-Gehaltes bei $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ -Ernährung geringer aus. Die N_t -Konzentration im oberirdischen Gesamtspross zu Versuchsende lag bei Angebot von $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 6 % höher als bei Angebot von $\text{NO}_3^- \text{-N}$.

In VERSUCH 3 wurden bei Versorgung mit $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 12 % höhere Frisch- aber nur knapp 5 % höhere Trockengewichte gegenüber der Versorgung mit $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ erreicht. Die N_t -Konzentration im Gesamtspross zur Zeit der Ernte war bei Angebot von $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ leicht erhöht.

In VERSUCH 4 führte die Versorgung mit ausschließlich $\text{NO}_3^- \text{-N}$ zu 12 % höheren Frisch- und 10 % höheren Trockengewichten als die Versorgung mit ausschließlich $\text{NH}_4^+ \text{-N}$. Die N_t -Konzentration im pflanzlichen Spross zu Versuchsende blieb von der N-Versorgungsform unbeeinflusst.

In VERSUCH 5 erzielten die Pflanzen bei NO_3^- - gegenüber $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ -Ernährung sogar einen Mehrertrag (TS) von über 20 %.

Demgegenüber lagen die pflanzlichen Frisch- und Trockengewichte in VERSUCH 2 unabhängig von der N-Angebotsform auf nahezu gleich hohem Niveau. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Pflanzenbestände zum Zeitpunkt der Ernte erst 3 Wochen alt waren. Die N_T -Konzentration im oberirdischen Gesamtspross zur Zeit der Ernte blieb von der Form des angebotenen Stickstoffs hier ebenfalls unbeeinflusst (Tab. 35).

NH₃-EMISSIONEN

In allen fünf Versuchen hatte die N-Versorgungsform denselben Einfluss auf die NH₃-Freisetzung der Versuchspflanzen. Eine ausschließliche NH₄⁺-N-Ernährung führte gegenüber einer ausschließlichen NO₃⁻-N-Ernährung zu erhöhten NH₃-Emissionen.

In VERSUCH 1 emittierten die Pflanzen bei Angebot von NH₄⁺-N insgesamt über 100 % mehr NH₃ als bei Angebot von NO₃⁻-N. Bei beiden N-Ernährungsvarianten wurde ein nahezu kontinuierliches Ansteigen der NH₃-Emissionen verzeichnet. Dabei lag die NH₃-Freisetzungsrate bei NH₄⁺-N-Versorgung von Beginn an höher als bei NO₃⁻-N-Versorgung.

In VERSUCH 2 lagen die NH₃-Emissionsmesswerte infolge des äußerst jungen Pflanzenbestandes auf sehr niedrigem Niveau. Während die Pflanzen bei Angebot von NH₄⁺-N insgesamt knapp 0,2 mg NH₃-N pro Versuchsgefäß emittierten, nahmen die NO₃⁻-N ernährten Pflanzen geringe Mengen an NH₃-N (< 0,1 mg) aus der Umgebungsluft auf (Abb. 18, Tab. 35). Damit traten hier bei Angebot von NO₃⁻-N negative Netto-NH₃-Emissionen auf.

In VERSUCH 3 führte die Versorgung mit NH₄⁺-N zu einer insgesamt fünffach höheren NH₃-Freisetzung als bei Versorgung mit NO₃⁻-N.

Bei den VERSUCHEN 4 und 5 erfolgte die Erfassung der NH₃-Emissionen nicht über einen durchgehenden Untersuchungszeitraum, sondern tageweise während verschiedener Entwicklungsstadien. Dabei wiesen die Pflanzen bei Angebot von NH₄⁺-N zu fast jedem Untersuchungszeitpunkt eine deutlich höhere NH₃-Freisetzung auf als bei Angebot von NO₃⁻-N (Abb. 19). Die als Summe der Einzelmesswerte errechneten Gesamt-NH₃-Emissionsverluste lagen bei NH₄⁺-N-Versorgung in VERSUCH 4 um 30 % und in VERSUCH 5 um 15 % höher als bei NO₃⁻-N-Versorgung.

Wie in Abbildung 18 deutlich zu sehen, spielte das Entwicklungsstadium der Versuchspflanzen bei der Freisetzung von NH₃ eine entscheidende Rolle. Abgesehen von dem zweiten Untersuchungszeitpunkt konnte mit zunehmendem Pflanzenalter ein kontinuierlicher Anstieg der NH₃-Freisetzung beobachtet werden. Zum Zeitpunkt der *Blüte* war das Maximum der NH₃-Abgabe erreicht. 2 ½ Wochen später, während der *Teigreife*, wurde eine erneute Abnahme der NH₃-Emissionen beobachtet.

Tab. 35: Experiment 4: **Ertragsbildung** (oben) und Höhe der **NH₃-Emissionen** (unten) bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der mineralischen N-Angebotsform der Pflanzen (in Nährlösung)

Sommerweizen		ERTRÄGE			
Varianten: NO ₃ ⁻ -N / NO ₄ ⁺ -N		TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]	
VERSUCH 1	NO ₃ ⁻ -N	16,51	4,25	0,70	
	NH ₄ ⁺ -N	15,17	4,50	0,68	
VERSUCH 2	NO ₃ ⁻ -N	3,50	5,63	0,20	
	NH ₄ ⁺ -N	3,59	5,55	0,20	
VERSUCH 3	NO ₃ ⁻ -N	6,80	4,75	0,32	
	NH ₄ ⁺ -N	6,55	4,96	0,33	
VERSUCH 4	NO ₃ ⁻ -N	Ähre	22,75	3,88	0,88
		Spross	36,65	3,50	1,28
		Σ	59,40		2,17
	NH ₄ ⁺ -N	Ähre	19,95	3,97	0,79
		Spross	33,96	3,55	1,21
		Σ	53,91		2,00
VERSUCH 5	NO ₃ ⁻ -N	Ähre	25,28	3,50	0,88
		Spross	39,3	3,33	1,31
		Σ	64,58		2,19
	NH ₄ ⁺ -N	Ähre	21,05	3,72	0,78
		Spross	31,66	3,40	1,08
		Σ	52,71		1,86

Sommerweizen		NH₃-EMISSIONEN			
Varianten: NO ₃ ⁻ -N / NO ₄ ⁺ -N		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _t -Gehaltes zur Ernte]
VERSUCH 1	NO ₃ ⁻ -N	2,35 (± 0,193)	52,3 (± 4,29)	0,52 (± 0,043)	0,34 (± 0,029)
	NH ₄ ⁺ -N	4,93 (± 0,365)	109,5 (± 8,10)	1,10 (± 0,081)	0,72 (± 0,051)
VERSUCH 2	NO ₃ ⁻ -N	-0,08 (± 8,20 ⁻³)	-1,8 (± 0,19)	-0,02 (± 2,0*10 ⁻³)	-0,04 (± 4,1*10 ⁻³)
	NH ₄ ⁺ -N	0,18 (± 0,014)	4,0 (± 0,32)	0,04 (± 3,2*10 ⁻³)	0,09 (± 7,5*10 ⁻³)
VERSUCH 3	NO ₃ ⁻ -N	0,15 (± 0,011)	3,3 (± 0,24)	0,03 (± 2,2*10 ⁻³)	0,05 (± 3,5*10 ⁻³)
	NH ₄ ⁺ -N	0,8 (± 0,055)	17,8 (± 1,23)	0,18 (± 0,012)	0,25 (± 0,018)
VERSUCH 4	NO ₃ ⁻ -N	1,70* (± 0,18)	37,8* (± 3,93)	0,38 (± 0,039)	0,08 (± 8,6*10 ⁻³)
	NH ₄ ⁺ -N	2,31* (± 0,26)	51,3* (± 5,79)	0,51 (± 0,058)	0,12 (± 0,014)
VERSUCH 5	NO ₃ ⁻ -N	1,94* (± 0,21)	41,2* (± 4,44)	0,41 (± 0,044)	0,09 (± 9,8*10 ⁻³)
	NH ₄ ⁺ -N	2,21* (± 0,21)	49,0* (± 4,61)	0,49 (± 0,046)	0,12 (± 0,011)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung; *Erfassung der NH₃-Emissionen erfolgte nur tageweise, nicht über einen durchgehenden Zeitraum; Σ aus 6 Messtagen

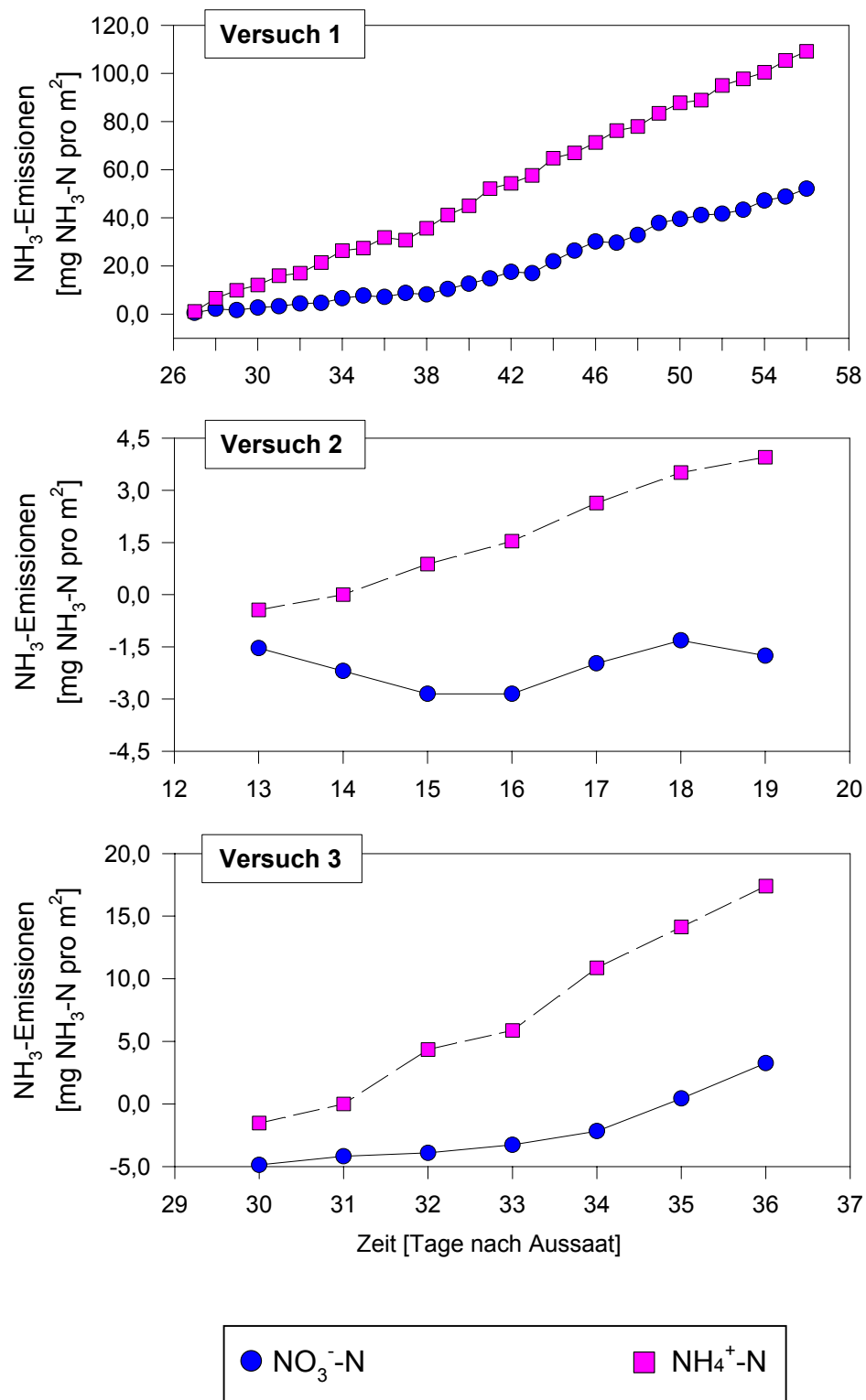


Abb. 18: Experiment 4: Kumulative NH₃-Emissionen aus Sommerweizen in Abhängigkeit von der N-Angebotsform der Pflanzen



Abb. 19: Experiment 4: **NH₃-Emissionen** aus Sommerweizen in Abhängigkeit von der N-Angebotsform der Pflanzen; oben VERSUCH 4, unten: VERSUCH 5, jeweils links: Einzelmesswerte [Tageswerte] zu verschiedenen Entwicklungsstadien, jeweils rechts: Summe der 6 Einzelmesswerte.

ALKALITÄT

Die Alkalität in der pflanzlichen Asche, deren Bestimmung im oberirdischen Gesamtpross zur Ernte erfolgte, wurde von der N-Versorgungsform der Pflanzen bei allen Versuchen in gleicher Weise beeinflusst. Bei Angebot von NO₃⁻-N wurde eine signifikant höhere Konzentration der Alkalität gemessen als bei Angebot von NH₄⁺-N. Ferner wurde eine Beziehung zwischen der Konzentration der Alkalität und dem Entwicklungsstadium der Versuchspflanzen beobachtet. Mit zunehmendem Pflanzenalter erhöhte sich die Konzentration der Alkalität (Abb. 20).

FREIES AMMONIUM

Die Konzentration an freien NH₄⁺-Ionen im oberirdischen Gesamtpross zu Versuchsende wurde bei allen Versuchen von der mineralischen N-Angebotsform erneut stark beeinflusst (Abb. 21, Tab. 36). Bei Angebot von NH₄⁺-N wiesen die Versuchspflanzen eine deutlich höhere Akkumulation an freiem NH₄⁺ auf als bei Angebot von NO₃⁻-N. Wie in Abbildung 21 (unten) deutlich zu erkennen, bestand zwischen dem Entwicklungsstadium der Versuchspflanzen und dem Gehalt an NH₄⁺-Ionen im pflanzlichen Gewebe eine direkte Beziehung. Mit zunehmendem Pflanzenalter nahmen auch die NH₄⁺-Konzentrationen zu. Nach Erreichen eines Maximums - etwa acht Wochen nach Aussaat - folgte ein erneuter Konzentrationsrückgang.

Tab. 36: Experiment 4: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche sowie die Konzentrationen an freien **Ammoniumionen** und **löslichen Aminosäuren** bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der N-Versorgungsform der Pflanzen, zu Versuchsende

Sommerweizen		Alkalität	Freies Ammonium	Lösliche Aminosäuren
in Nährlösung: $\text{NO}_3^- \text{N} / \text{NH}_4^+ \text{-N}$		[mmol / g TM]	[mg NH_4^+ / g TM]	[$\mu\text{mol} / \text{g TM}$]
Versuch 1 Pflanzenalter: 57 Tage	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0,96 ($\pm 0,07$)	0,29 ($\pm 0,03$)	58,53 ($\pm 5,4$)
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0,36 ($\pm 0,02$)	2,28 ($\pm 0,21$)	68,72 ($\pm 7,0$)
Versuch 2 Pflanzenalter: 20 Tage	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0,27 ($\pm 0,02$)	0,21 ($\pm 0,02$)	15,82 ($\pm 1,5$)
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0,18 ($\pm 1 \cdot 10^{-3}$)	0,61 ($\pm 0,06$)	29,81 ($\pm 3,0$)
Versuch 3 Pflanzenalter: 37 Tage	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0,63 ($\pm 0,09$)	0,17 ($\pm 0,01$)	22,43 ($\pm 2,1$)
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0,21 ($\pm 0,03$)	1,57 ($\pm 0,13$)	33,68 ($\pm 3,1$)
Versuch 4 Pflanzenalter: 98 Tage	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	1,26 ($\pm 0,15$)	0,26 ($\pm 0,02$)	36,12 ($\pm 2,8$)
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0,57 ($\pm 0,05$)	1,99 ($\pm 0,21$)	49,92 ($\pm 4,8$)
Versuch 5 Pflanzenalter: 92 Tage	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	1,32 ($\pm 0,12$)	0,29 ($\pm 0,03$)	46,84 ($\pm 4,2$)
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0,66 ($\pm 0,06$)	1,85 ($\pm 0,21$)	59,38 ($\pm 4,9$)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

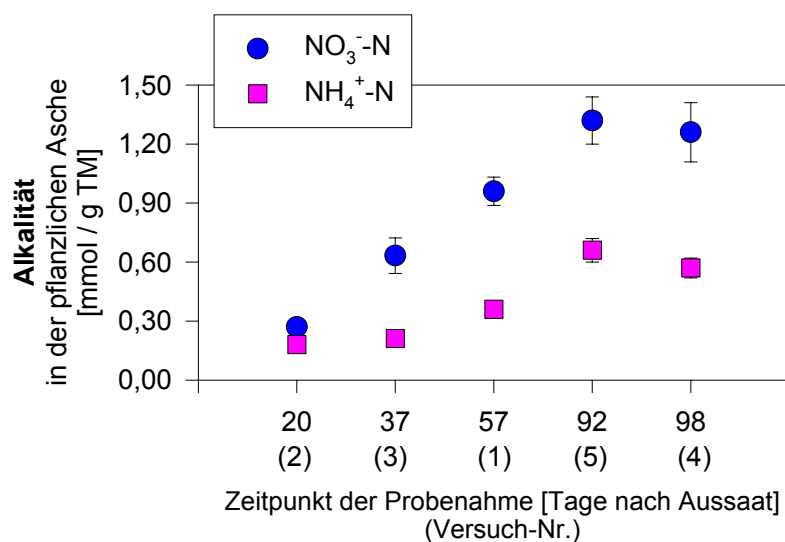


Abb. 20: Experiment 4: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtsprosses bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der mineralischen N-Versorgungsform, **Versuche 1-5**

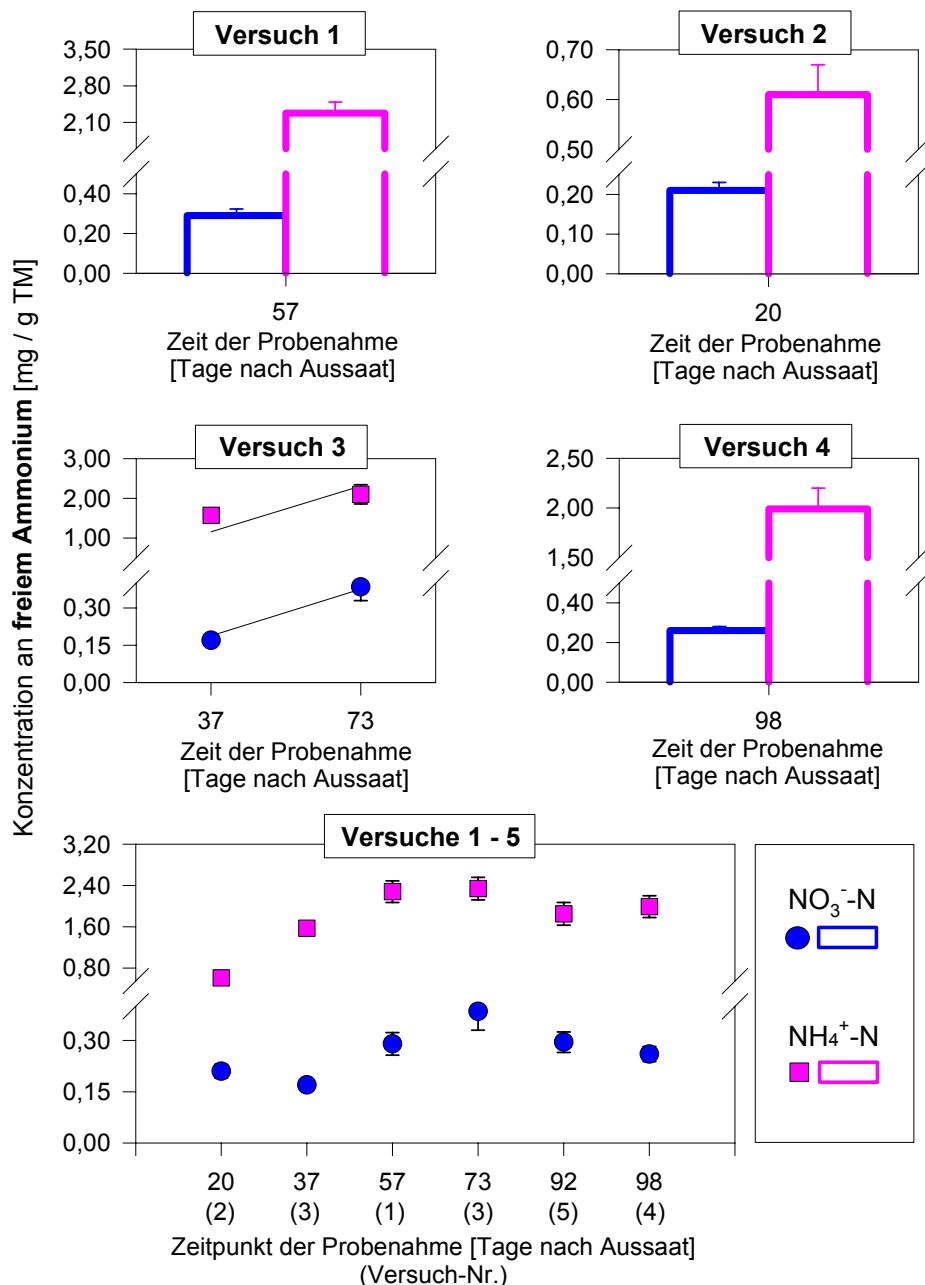


Abb. 21:
Experiment 4:
Konzentration an
freiem Ammonium
im oberirdischen
Gesamtpross bei
Sommerweizen,
unten:
VERSUCHE 1-5
'zusammengefasst'
(verschiedene Be-
probungstermine)

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Die N-Versorgungsform der Versuchspflanzen hatte auch Einfluss auf die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtpross, deren Bestimmung zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Pflanzen erfolgte.

Bei Angebot von NH₄⁺-N wurden in allen fünf Versuchen signifikant höhere Konzentrationen an löslichen Gesamtaminosäuren gemessen, als bei Angebot von NO₃⁻-N (Tab. 36, Abb. 22). Ferner wurde auch ein direkter Zusammenhang zwischen dem Entwicklungsstadium der Pflanzen und der Konzentration an löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe beobachtet. Mit zunehmendem Pflanzenalter konnte ein Anstieg der Gesamtaminosäurekonzentration verzeichnet werden. Nach Erreichen eines Maximums, welches in Abbildung 22 - VERSUCH 5 - mit dem 6. Untersuchungsergebnis - 73 Tage nach Aussaat - zusammenfällt, nahm die Konzentration erneut stark ab.

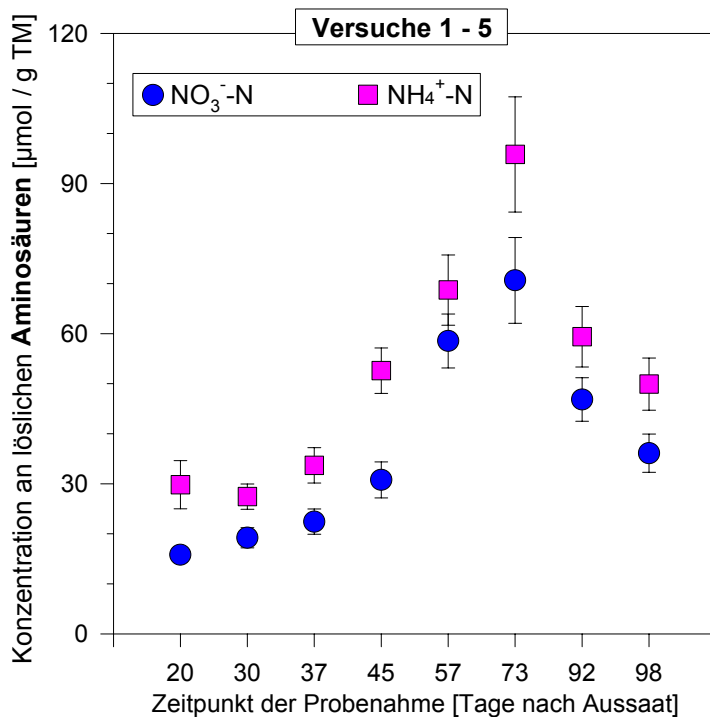


Abb. 22:
Experiment 4:
Konzentration an
Löslichen Aminosäuren
im oberirdischen
Gesamtspross von
Sommerweizen in
Abhängigkeit von
der N-Angebotsform
und dem Alter der
Versuchspflanzen

(Versuchs-Nr.) (2) (2)* (3)* (2)* (1)* (5)* (5)* (4)*

3.1.5. Experiment 5: Nährlösungskulturversuche mit Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der Nährionenversorgung

• Windtunnelversuche: Nährstoffversorgung auf »Chlorid- beziehungsweise »Sulfatbasis«

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Wie unter 'MATERIAL UND METHODEN' bereits erwähnt, gab es anfängliche Schwierigkeiten bei der Herstellung pflanzenverträglicher Kulturlösungen, deren Nährionen-Zusammensetzung überwiegend »chlorid- bzw. »sulfatbetont« waren. Die Pflanzen aus VERSUCH 1 stellten die erste Generation von Versuchspflanzen dar, die ein uneingeschränktes Wachstum und eine gesunde Entwicklung zeigten.

Bei allen vier Wiederholungsversuchen verlief die Pflanzenanzucht zügig und gleichmäßig. Infolge der Ernährungsumstellung von NO₃⁻-N-Standardnährlösung (Vorkultur) auf NH₄⁺-N-Nährlösung mit »anionisierten« (auf Chloridbasis) oder »kationisierten« (auf Sulfatbasis) Nährelementen kam es zu leichten Entwicklungsverzögerungen, die bei VERSUCH 2 deutlicher hervortraten, als bei den VERSUCHEN 1, 3 und 4.

In Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen wurden keine Wachstums- und Entwicklungsdifferenzen beobachtet. Bonitierungsdaten zufolge ergaben sich auch zu den vorangegangenen Wasserkulturversuchen mit NH₄⁺-N-Ernährung im Hinblick auf die pflanzliche Entwicklung keine Abweichungen.

In VERSUCH 1 befanden sich die Pflanzen während der 7 Tage umfassenden NH₃-Messungen im Stadium des *Ährenschiebens*.

In VERSUCH 2 erfolgten die NH₃-Messungen zwischen der *Bestockung*- und der *Schossphase*. Auch in den VERSUCHEN 3 und 4 standen die Pflanzen zu Beginn der NH₃-Messungen in der *Bestockungsphase*. Während die Untersuchungen bei VERSUCH 3 bis zur Phase des *Ährenschiebens* andauerten, wurden sie bei VERSUCH 4 bereits in der *Schossphase* beendet.

ERTRÄGE

Die Produktion an pflanzlicher Biomasse blieb, wie die Wachstumsbeobachtungen bereits zeigten, bei allen Versuchen von der Art der angebotenen Nährionen nahezu unbeeinflusst (Tab. 37). Auch die N_t -Gehalte im oberirdischen Gesamtspross zur Zeit der Ernte wurden von der Nährionenversorgung nicht beeinflusst. Folglich nahmen die Pflanzen beider Ernährungsvarianten die gleiche N-Menge pro Versuchsgefäß auf.

Tab. 37: Experiment 5 (VERSUCHE 1-4): **Ertragsbildung** (oben) und **NH₃-Freisetzung** (unten) bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen (auf *Chlorid-* oder *Sulfatbasis*) in der Kulturlösung der Pflanzen

Sommerweizen: »chloridische« / »sulfatische« Nährionen		Erträge			
		TS [g/Gefäß]	N_t [%]	N_t [g/Gefäß]	
VERSUCH 1	chloridisch	25,24	4,05	1,02	
	sulfatisch	26,35	3,92	1,03	
VERSUCH 2	chloridisch	9,04	5,09	0,46	
	sulfatisch	8,87	4,88	0,43	
VERSUCH 3	chloridisch	18,04	3,96	0,71	
	sulfatisch	18,32	4,01	0,73	
VERSUCH 4	chloridisch	5,25	5,14	0,27	
	sulfatisch	4,97	5,02	0,25	

Sommerweizen: »sulfatische« / »chloridische« Nährionen		NH ₃ -Emissionen			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N_t -Gehaltes zur Ernte]
VERSUCH 1	chloridisch	1,05 (± 0,08)	27,6 (± 2,26)	0,28 (± 0,23)	0,10 (± 8*10 ⁻³)
	sulfatisch	0,42 (± 0,03)	11,0 (± 0,85)	0,11 (± 8*10 ⁻³)	0,04 (± 3*10 ⁻³)
VERSUCH 2	chloridisch	1,41 (± 0,13)	37,1 (± 3,41)	0,37 (± 0,03)	0,31 (± 0,03)
	sulfatisch	0,50 (± 0,04)	13,2 (± 1,11)	0,13 (± 0,01)	0,12 (± 0,01)
VERSUCH 3	chloridisch	2,52 (± 0,18)	66,3 (± 4,77)	0,66 (± 0,05)	0,35 (± 0,03)
	sulfatisch	1,15 (± 0,09)	30,3 (± 2,27)	0,30 (± 0,02)	0,16 (± 0,01)
VERSUCH 4	chloridisch	1,22 (± 0,11)	32,2 (± 2,86)	0,32 (± 0,03)	0,45 (± 0,04)
	sulfatisch	0,73 (± 0,06)	19,2 (± 1,55)	0,19 (± 0,02)	0,29 (± 0,02)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

NH₃-EMISSIONEN

Wie in Abbildung 23 graphisch dargestellt, wurde die Höhe der absoluten NH₃-Emissionsverluste von der Art der angebotenen Nährionen deutlich beeinflusst. Bei Angebot von auf »Chlorid basierenden« Nährsalzen traten signifikant höhere Gesamt-NH₃-Emissionen auf, als bei Angebot von auf »Sulfat basierenden« Nährsalzen. Damit konnte gezeigt werden, dass sich durch eine gezielt »sulfatbetonte« Ernährung die NH₃-Emissionsverluste deutlich reduzieren ließen.

In VERSUCH 1 emittierten die Pflanzen der Variante »Chlorid-Ernährung« während des sieben Tage umfassenden Messzeitraumes insgesamt 150 % mehr NH₃ als die Pflanzen der Variante »Sulfat-Ernährung«.

In VERSUCH 2 waren die NH_3 -Emissionsverluste bei »Chlorid- gegenüber »Sulfat-Ernährung« sogar um 180 % erhöht. Insbesondere während der letzten sechs Messintervalle wiesen die Pflanzen bei »chloridbetonter« Ernährung eine deutlich höhere NH_3 -Freisetzung auf.

In VERSUCH 3 emittierten die Pflanzen der Variante »Chlorid-Ernährung« knapp 120 % mehr NH_3 als die Pflanzen der Variante »Sulfat-Ernährung«.

In VERSUCH 4 waren die Gesamt- NH_3 -Emissionsverluste bei »chloridbetonter« Ernährung um 65 % erhöht. Der Untersuchungszeitraum erfolgte hier über drei Wochen. Dabei traten während der ersten Untersuchungswoche im Hinblick auf die NH_3 -Freisetzung allerdings keine ernährungsbedingten Unterschiede auf.

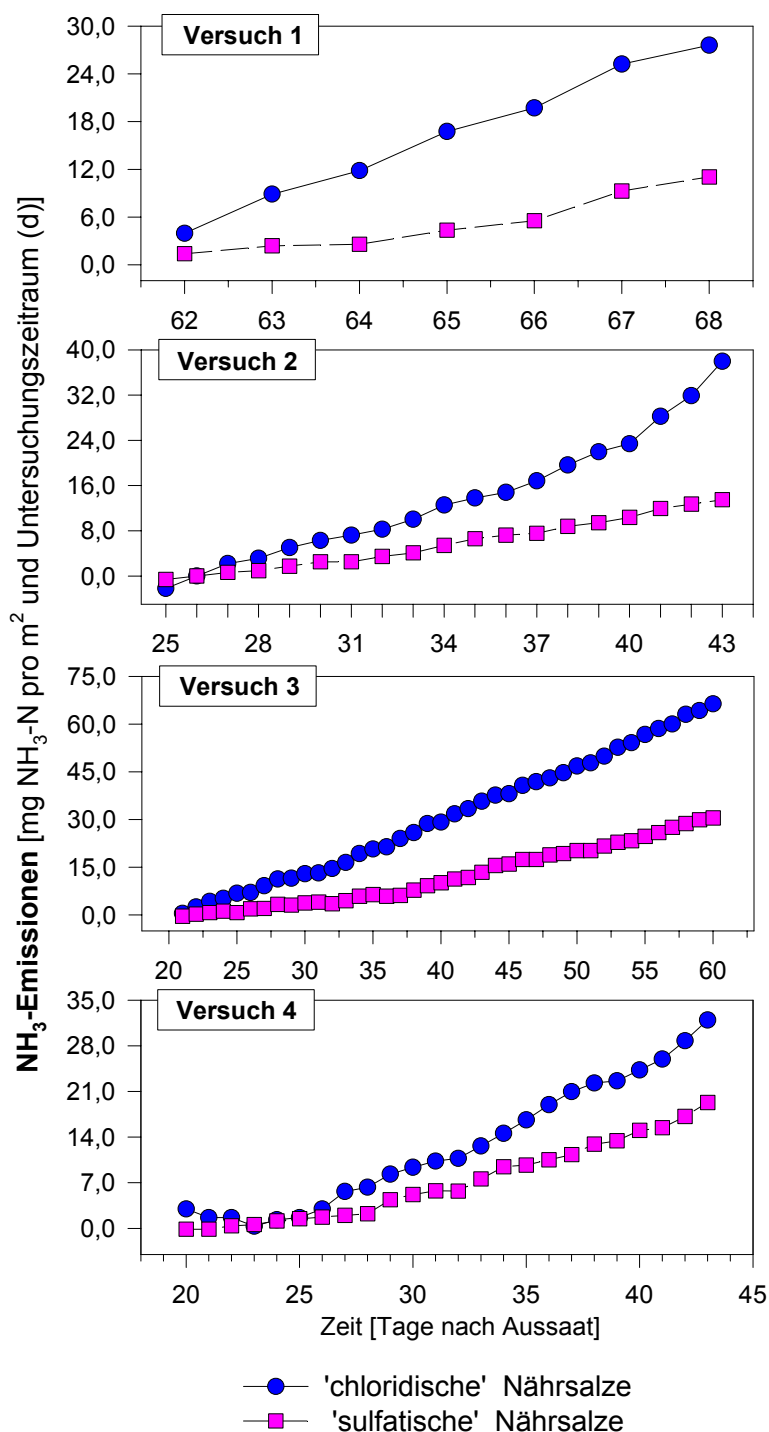


Abb. 23:
 Experiment 5:
 Kumulative NH_3 -
Emissionen aus
 Sommerweizen in
 Abhängigkeit von
 der Art der angebotenen Nährionen

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtsprosses, deren Bestimmung zu verschiedenen Zeiten erfolgte, wurde von der Art der angebotenen Nährionen bei allen Versuchen in gleicher Weise beeinflusst. Bei Angebot »sulfatischer Nährsalze« wurde eine höhere Konzentration der Alkalität gemessen als bei Angebot »chloridischer Nährsalze« (Abb. 24). Ferner bestand eine Beziehung zwischen der Konzentration der Alkalität und dem Zeitpunkt der Probenahme. In den VERSUCHEN 1, 2 und 4 konnte mit zunehmendem Pflanzenalter ein nahezu kontinuierlicher Anstieg der Alkalität beobachtet werden. Dabei trat dieser Anstieg unabhängig von der Art der angebotenen Nährionen auf. Auch in VERSUCH 3 nahm die Konzentration der Alkalität der Pflanzen bis etwa 7 Wochen nach Aussaat stetig zu. Im Anschluss daran trat hier sowohl bei Versorgung mit »sulfatischen Nährsalzen« als auch bei Versorgung mit »chloridischen Nährsalzen« allerdings eine erneute Abnahme der Alkalität ein.

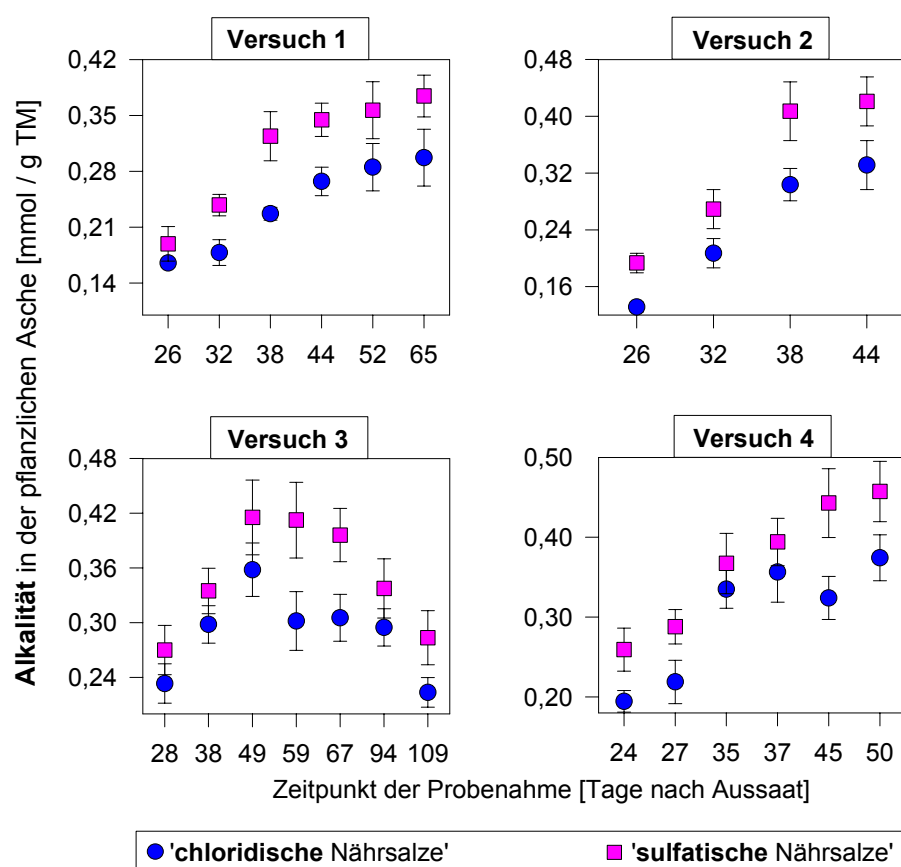


Abb. 24: Experiment 5: Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtsprosses bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

FREIES AMMONIUM

Auch die Konzentration an freiem NH_4^+ im oberirdischen Gesamtspross wurde von der Art der angebotenen Nährionen beeinflusst. In allen Versuchen wurde zu fast allen Beprobungsterminen bei Angebot »chloridischer Nährsalze« eine etwas stärkere Akkumulation an freien NH_4^+ -Ionen festgestellt als bei Angebot »sulfatischer Nährsalze«. Ferner hatte der Zeitpunkt der Beprobung Einfluss auf den Gehalt an freien NH_4^+ -Ionen. Bis zu Beginn des Ährenschiebens konnte bei beiden Ernährungsvarianten ein kontinuierlicher Anstieg der NH_4^+ -Konzentrationen im pflanzlichen Gewebe beobachtet werden. Im Anschluss daran änderte sich das Konzentrationsniveau nur wenig (VERSUCH 4).

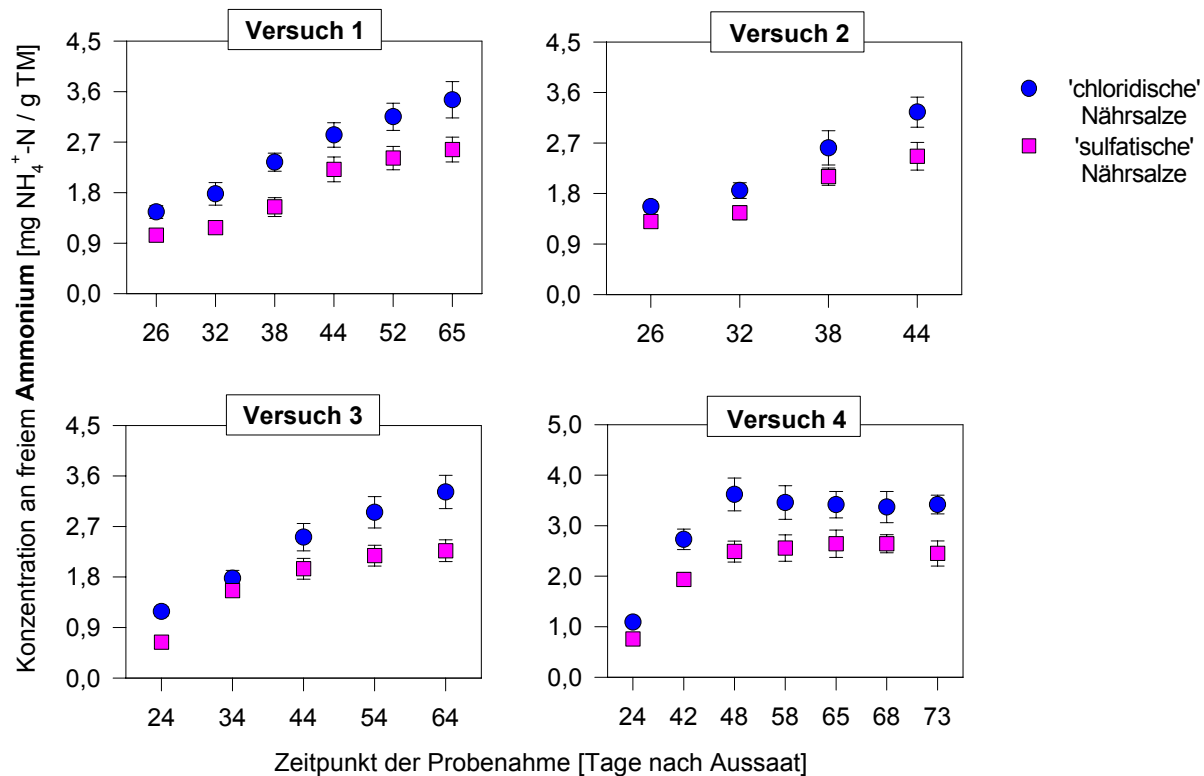


Abb. 25: Experiment 5: Konzentration an **freiem Ammonium** im oberirdischen Gesamtprozess bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Der Gehalt an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtprozess der Versuchspflanzen wurde von der Art der angebotenen Nährionen ebenfalls beeinflusst (Abb. 26). Das Angebot »chloridischer Nährsalze« hatte gegenüber dem Angebot »sulfatischer Nährsalze« eine Erhöhung des Gesamtgehaltes löslicher Aminosäuren zur Folge. Dabei wurden in den VERSUCHEN 1, 2 und 4 - insbesondere bei den etwas älteren Versuchspflanzen - größere Konzentrationsunterschiede zwischen den Varianten »Chlorid- und »Sulfat-Ernährung« festgestellt als bei VERSUCH 3.

Ferner wurde erneut eine Beziehung zwischen dem Gehalt an löslichen Aminosäuren und dem Entwicklungsstatus der Pflanzen beobachtet. Bis zu Beginn des *Ährenschiebens* erhöhte sich mit zunehmendem Pflanzenalter die Akkumulation an löslichen Aminosäuren. Danach folgte ein erneuter Konzentrationsrückgang.

In der Ähre - direkt nach der *Blüte* - wurden bei den Pflanzen der Variante »Chlorid-Ernährung« signifikant höhere Aminosäurekonzentrationen gemessen als bei der Variante »Sulfat-Ernährung« (VERSUCH 3, Abb. 26).

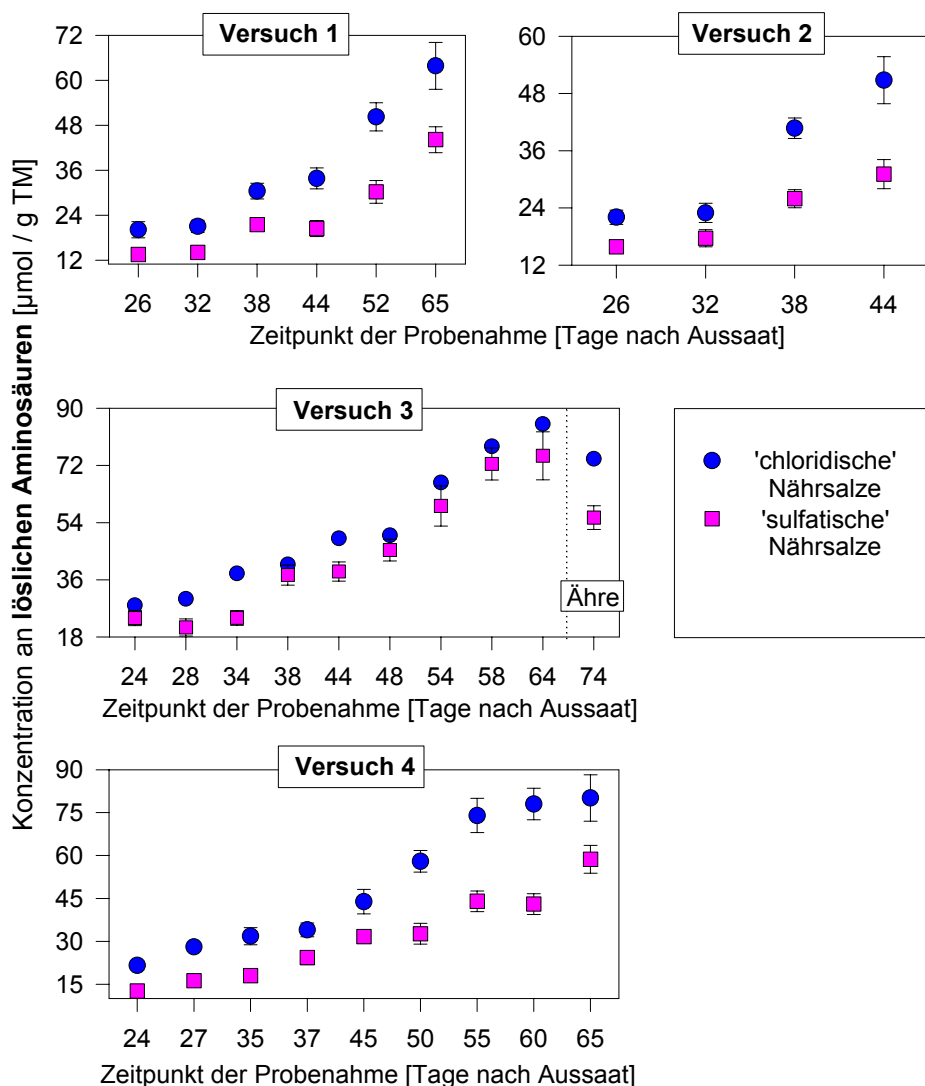


Abb. 26: Experiment 5: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtspross bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

• **Haubengefäßversuche:** Nährstoffversorgung auf »Chlorid- beziehungsweise »Sulfatbasis«

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Bei allen drei Einzelversuchen erfolgte die Anzucht der Pflanzen problemlos. Es bildeten sich von Beginn an homogene Pflanzenbestände, mit allerdings relativ schwach entwickelten Einzelpflanzen. Im weiteren Verlauf verbesserte sich das Wachstum der Pflanzen. Dabei waren zu keinem Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen visuelle Entwicklungs- oder Wachstumsunterschiede zu beobachten.

Zur Beurteilung und Bewertung der pflanzlichen Entwicklung wurden zusätzlich Bonitierungsdaten aus vorangegangenen Untersuchungen herangezogen, bei denen die Wuchshöhe, der Blattflächenindex sowie der visuelle Gesamthabitus als Vergleichsgrundlagen dienten.

In VERSUCH 1 befanden sich die Pflanzen während der NH_3 -Messungen in der *Schossphase*. In den VERSUCHEN 2 und 3 erfolgten die Untersuchungen über die NH_3 -Freisetzung während der *Hauptbestockung* bis zu Beginn der *Schossphase*. Dabei wiesen die Pflanzen in VERSUCH 3, bedingt durch ihre Anzucht in einer Klimakammer, eine zügigere Gesamtentwicklung auf.

ERTRÄGE

Die Produktion an pflanzlicher Biomasse wurde von der Art der angebotenen Nährionen wenig beeinflusst (Tab. 38). Dieses Ergebnis wurde entsprechend den Wachstumsbeobachtungen erwartet.

Bei den VERSUCHEN 1 und 2 wiesen die Pflanzen bei Angebot »chloridischer Nährsalze« etwa 5 % höhere Frisch- und bis zu 7,5 % höhere Trockengewichte auf, als bei Angebot »sulfatischer Nährsalze«. In VERSUCH 3 waren die Frisch- und Trockengewichte der Versuchspflanzen bei Angebot »chloridischer Nährsalze« um 12 % erhöht.

Tab. 38: Experiment 5: **Ertragsbildung** (oben) und **NH₃-Freisetzung** (unten) bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen - »sulfatische bzw. chloridische Nährsalze« - in der Kulturlösung der Pflanzen

Sommerweizen: sulfatische / chloridische Nährionen		Erträge		
		TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
VERSUCH 1	chloridisch	11,12	4,61	0,51
	sulfatisch	10,37	4,57	0,47
VERSUCH 2	chloridisch	6,17	4,87	0,30
	sulfatisch	5,74	4,67	0,27
VERSUCH 3	chloridisch	7,60	5,02	0,38
	sulfatisch	6,78	4,71	0,32

Sommerweizen: sulfatische / chloridische Nähr-Ionen		NH ₃ -Emissionen			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _t -Gehaltes zur Ernte]
VERSUCH 1	chloridisch	0,37 (± 0,03)	28,5 (± 2,08)	0,28 (± 0,02)	0,07 (± 5*10 ⁻³)
	sulfatisch	0,18 (± 0,01)	13,8 (± 1,14)	0,14 (± 0,01)	0,04 (± 3*10 ⁻³)
VERSUCH 2	chloridisch	0,29 (± 0,02)	22,3 (± 1,54)	0,22 (± 0,16)	0,09 (± 6*10 ⁻³)
	sulfatisch	0,13 (± 0,10)	10,0 (± 0,79)	0,10 (± 8*10 ⁻³)	0,05 (± 4*10 ⁻³)
VERSUCH 3	chloridisch	0,41 (± 0,03)	31,5 (± 2,68)	0,32 (± 0,03)	0,11 (± 9*10 ⁻³)
	sulfatisch	0,24 (± 0,02)	18,5 (± 1,33)	0,18 (± 0,01)	0,08 (± 6*10 ⁻³)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

Die N_t-Konzentrationen im oberirdischen Gesamtpross der Pflanzen wurden von der Art der angebotenen Nährionen wenig beeinflusst. Bei den VERSUCHEN 1 und 2 lag die N-Aufnahme bei beiden Ernährungsvarianten auf vergleichbarem Niveau. In VERSUCH 3 wurden bei Angebot von auf »Sulfat basierenden Nährsalzen« allerdings über 20 % höhere N_t-Gehalte im oberirdischen Gesamtpross der Pflanzen gemessen als bei Angebot von auf »Chlorid basierenden Nährsalzen« (Tab. 38).

NH₃-EMISSIONEN

Die Höhe der NH₃-Emissionen der Pflanzen wurde von der Art der angebotenen Nährionen in allen drei Versuchen deutlich und in übereinstimmender Weise beeinflusst. Die Versorgung mit »sulfatischen Nährsalzen« führte gegenüber der Versorgung mit »chloridischen Nährsalzen« zu einer Reduzierung der NH₃-Freisetzung (Abb. 27). Die NH₃-Emissionskurven verliefen bei allen drei Versuchen unabhängig von der Art der Nährionen stetig ansteigend und weitgehend homogen.

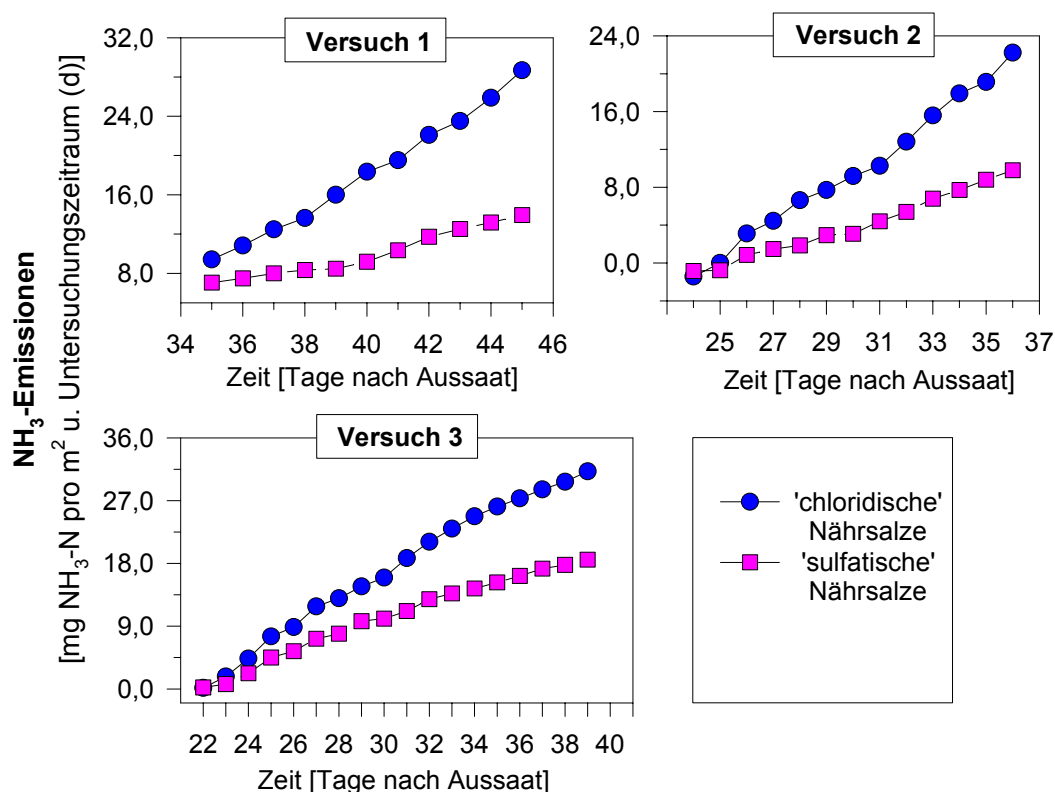


Abb. 27: Experiment 5: Kumulative **NH₃-Emissionen** aus Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

In VERSUCH 1 emittierten die Pflanzen der Variante »Sulfaternährung« insgesamt 53 % weniger NH₃ als die Pflanzen der Variante »Chloridernährung«.

In VERSUCH 2 konnten die Gesamt-NH₃-Emissionsverluste bei Angebot »sulfatischer Nährsalze« um 56 % gegenüber dem Angebot »chloridischer Nährsalze« gesenkt werden.

In VERSUCH 3 betrug die Reduktion der NH₃-Freisetzung durch das Angebot »sulfatischer Nährsalze« 35 %.

Unter Einbeziehung des N_t-Gehaltes in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte lag die NH₃-Emissionsminderung bei »Sulfat- gegenüber »Chlorid-Ernährung« auf ähnlich hohem Niveau (VERSUCH 1: bei 48 %, VERSUCH 2: bei 53 %, VERSUCH 3: bei 20 %) (Tab. 38).

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Die Art der angebotenen Nährionen hatte bei allen drei Versuchen Einfluss auf die Alkalität in der pflanzlichen Asche. Bei Angebot »sulfatischer Nährsalze« wiesen die Versuchspflanzen höhere Alkalitätsmesswerte auf als bei Angebot »chloridischer Nährsalze«. Ferner konnte eine Beziehung zwischen der Konzentration der Alkalität und dem Entwicklungsstadium der Pflanzen beobachtet werden. Mit zunehmendem Pflanzenalter nahm die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche zu (Abb. 28 unten).

FREIES AMMONIUM

Die Konzentration an freien NH₄⁺-Ionen im oberirdischen Gesamtspross wurde von der Art der angebotenen Nährionen erneut deutlich beeinflusst (Abb. 29). In allen drei Versuchen wurden bei Angebot »chloridischer Nährsalze« signifikant höhere NH₄⁺-Konzentrationen gemessen als bei Angebot »sulfatischer Nährsalze«. Ferner bestand erneut eine Beziehung zwischen dem Entwicklungsstadium und der Konzentration an NH₄⁺ im pflanzlichen Gewebe. Mit zunehmendem Pflanzenalter konnte bei allen drei Versuchen ein nahezu kontinuierlicher NH₄⁺-Konzentrationsanstieg festgestellt werden.

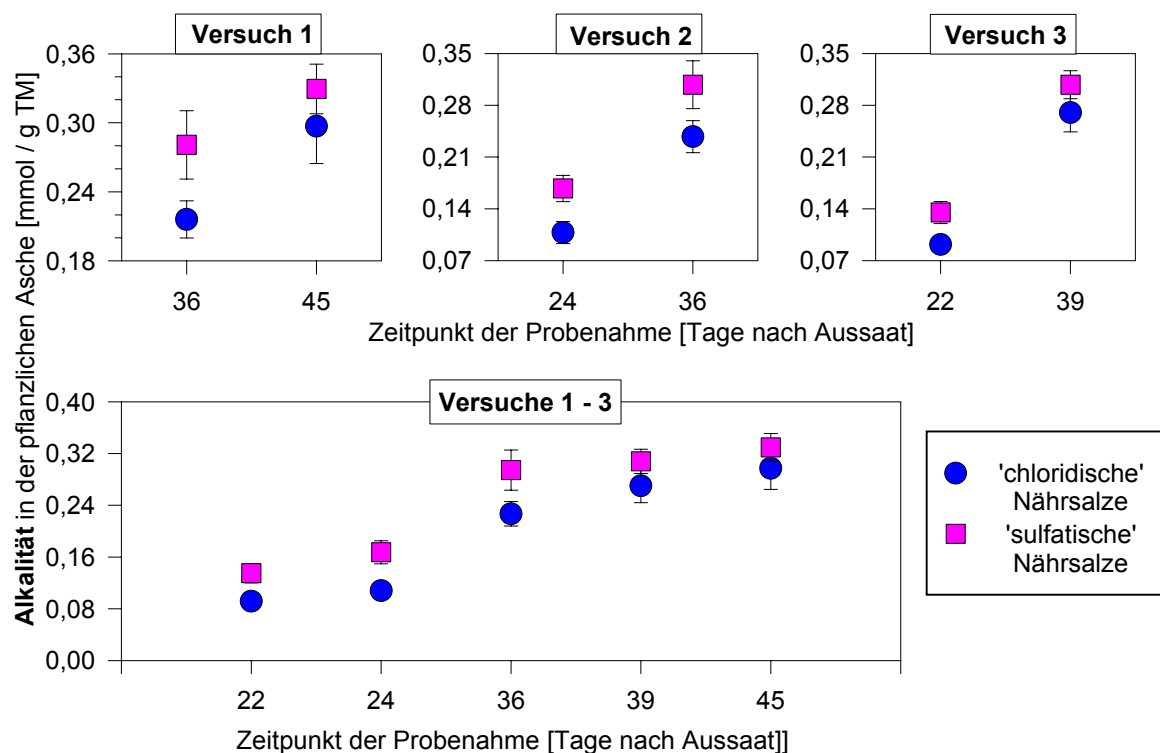


Abb. 28: Experiment 5: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

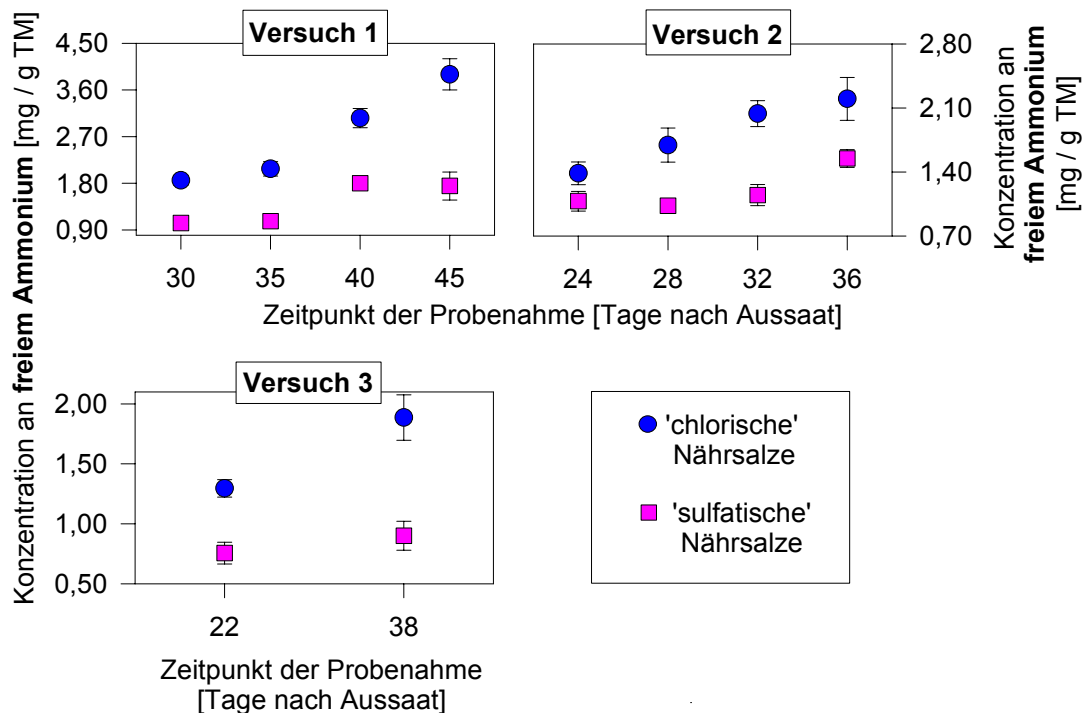


Abb. 29: Experiment 5: Konzentration an **freiem Ammonium** im oberirdischen Gesamtprozess von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

Die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im apoplasmatischen Blattgewebe (Apoplastenflüssigkeit), deren Bestimmung in VERSUCH 3 zu Versuchsende erfolgte, wurde von der Art der Nährionen ebenso deutlich beeinflusst (Abb. 30). Die Versorgung mit auf »Chlorid basierenden« Nährsalzen führte gegenüber der Versorgung mit auf »Sulfat basierenden« Nährsalzen zu deutlich höheren apoplasmatischen NH_4^+ -Konzentrationen. Der Einsatz »sulfatischer Nährsalze« konnte folglich einer Akkumulation an freien NH_4^+ -Ionen im apoplasmatischen Blattgewebe bei Sommerweizen entgegenwirken. Zwischen dem ersten und dem zweiten 'Zentrifugengang' (1500g → 2500g) trat methodenbedingt eine Reduktion der Gesamt- NH_4^+ -Konzentration ein.

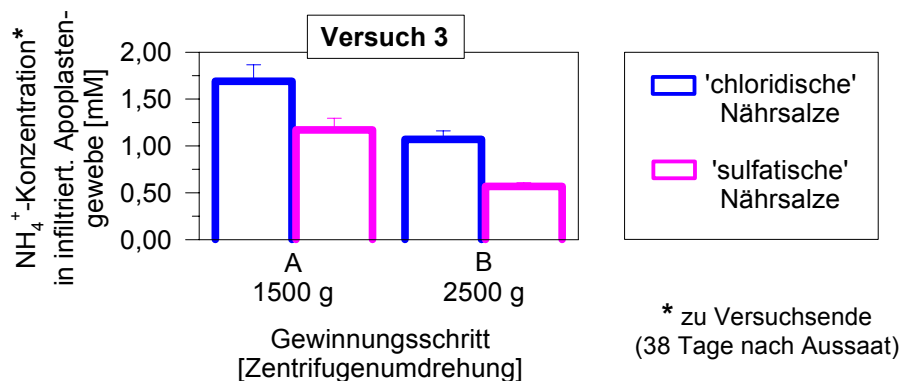


Abb. 30: Experiment 5: Konzentration an freiem Ammonium im apoplasmatischen Gewebe bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtspross der Versuchspflanzen wurde von der Art der angebotenen Nährionen beeinflusst. In allen drei Versuchen wurden bei Angebot »chloridischer gegenüber »sulfatischer Nährsalze« höhere Aminosäurekonzentrationen gemessen (Abb. 31a).

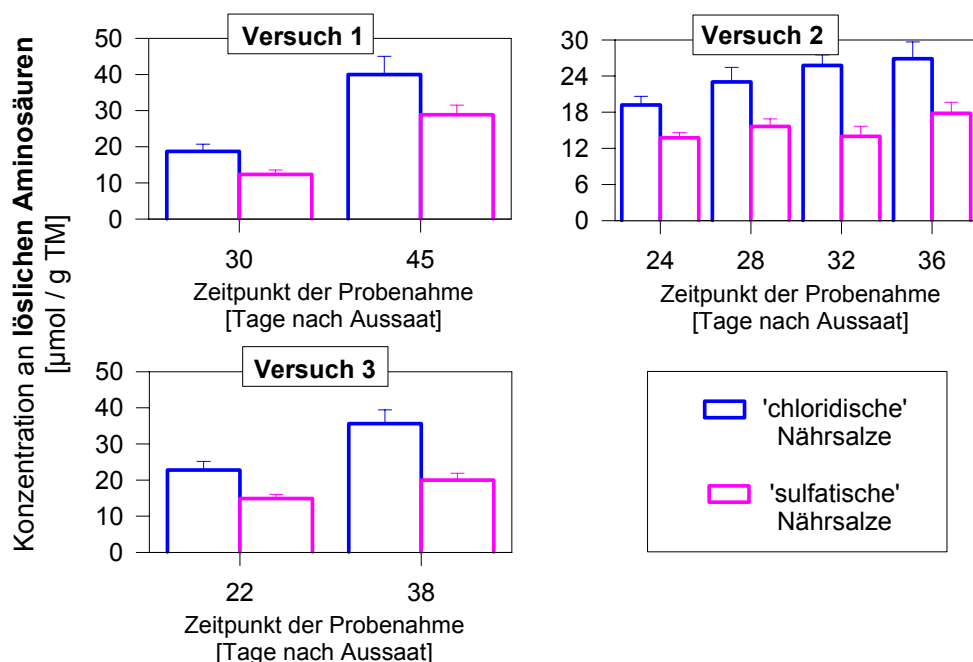


Abb. 31a: Experiment 5: Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtspross bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährionen

Ferner wurde erneut eine Beziehung zwischen dem pflanzlichen Entwicklungsstadium und der Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtpross festgestellt. Mit zunehmendem Pflanzenalter wurde ein leichter Anstieg der Gesamtaminosäurekonzentration beobachtet (Abb. 31b, Versuche 1-3 zusammengefasst).

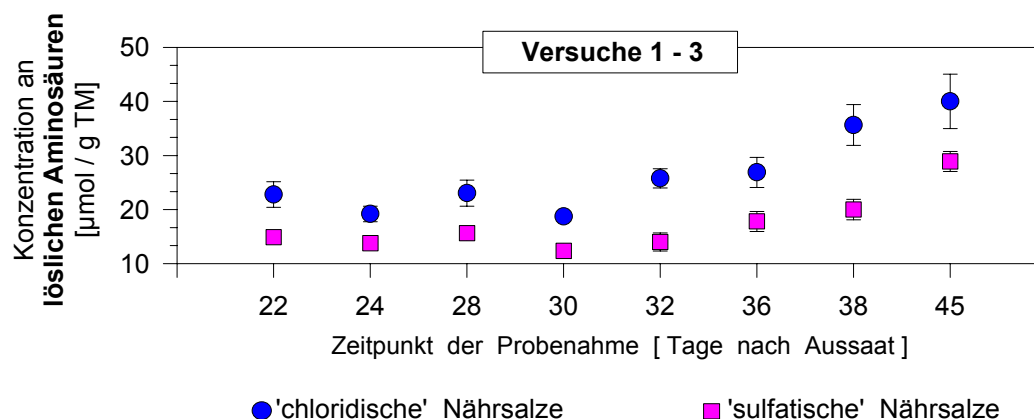


Abb. 31b: Experiment 5: Versuche 1-3 zusammengefasst: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtpross bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Art der angebotenen Nährsalze

3.1.6. Experiment 6: Mineralbodenversuch mit Sommerweizen und Ackerbohnen unter Einsatz der Windtunnelmethode

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Die Anzucht der Versuchspflanzen verlief bei beiden Arten problemlos. Es entwickelten sich von Beginn an homogene und vitale Pflanzenbestände. Dabei gab es Bonitierungsdaten zufolge zwischen der 1. und 2. Aussaatgeneration sowohl bei Sommerweizen als auch bei Ackerbohne hohe Übereinstimmung im Hinblick auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen, was für die Vergleichbarkeit der zu untersuchenden NH_3 -Freisetzung eine wichtige Voraussetzung war.

Die Ackerbohnenpflanzen waren durch ein kräftiges Blattgrün gekennzeichnet, was auf eine effektive N_2 -Fixierung der Knöllchenbakterien schließen ließ. Auch das kontinuierliche Streckenwachstum der Sprossachse und das ebenso beständige Blattflächenwachstum deuteten auf eine optimale N-Versorgung hin.

Zu Beginn der 1. Messperiode, 3 Wochen nach Aussaat, stand der Sommerweizen in der *Hauptbestockungsphase*. Zwei Wochen später, nach Ablauf des Untersuchungszeitraumes, befanden sich beide Pflanzenarten in der *Streckungsphase* (Sprosswachstum). Dabei wies insbesondere die Ackerbohne sehr hohe Zuwachsraten auf.

Zu Beginn der 2. Messperiode begannen die Ackerbohnen zu blühen. Die pflanzliche Wuchshöhe betrug bis zu 50 cm. Sommerweizen hatte zu diesem Zeitpunkt die Phase des *Ährenschiefens* erreicht. Bereits 10 Tage später begannen auch hier einzelne Pflanzen zu blühen. Nach Ablauf der 2. Messperiode blühten auch die letzten Weizenpflanzen. Bei einigen Pflanzen setzte bereits die Kornreife (*Milchreife*) ein. Die Ackerbohnenpflanzen zeigten zu diesem Zeitpunkt im unteren Bereich schon verblühte und im oberen Bereich noch in voller Blüte stehende Fruchtstände. Ferner wurden im unteren Sprossbereich verstärkt chlorotische Blattverfärbungen mit leichten Blattverlusten beobachtet.

ERTRÄGE

In Bezug auf die Ertragsleistung gab es deutliche pflanzenartspezifische Unterschiede. Ackerbohne wies gegenüber Weizen bei der 1. Aussaatgeneration über 100 % und bei der 2. Aussaatgeneration über 90 % höhere Frischgewichte auf. Dagegen waren die Trockengewichte bei Weizen infolge wesentlich höherer TS-Gehalte um 33 % (1. Aussaat) und 55 % (2. Aussaat) gegenüber Ackerbohne erhöht (Tab. 39).

Der N_t-Gehalt in der pflanzlichen Trockenmasse zu Versuchsende lag bei Ackerbohne auf deutlich geringerem Niveau als bei Weizen. Folglich lag der N-Entzug pro Versuchsgefäß bei Weizen wesentlich höher als bei Ackerbohne.

Tab. 39: Experiment 6: **Ertragsbildung** bei Sommerweizen und Ackerbohnen

Sommerweizen und Ackerbohnen in Mineralboden		Erträge		
		TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
1. Aussaat	Sommerweizen	32,96	3,49	1,15
	Ackerbohne	24,73	2,81	0,69
2. Aussaat	Sommerweizen	33,65	3,62	1,22
	Ackerbohne	21,68	3,01	0,65

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

NH₃-EMISSIONEN

Wie in Abbildung 32 dargestellt, traten im Hinblick auf die Freisetzung von NH₃ zwischen den untersuchten Pflanzenarten deutliche Unterschiede auf. Ackerbohne emittierte gegenüber Sommerweizen signifikant höhere Mengen an NH₃.

Tab. 40: Experiment 6: **NH₃-Emissionsverluste** aus Sommerweizen- und Ackerbohnenpflanzen

NH ₃ -Emissionen aus Sommerweizen und Ackerbohne (Mineralbodenversuch)		1. Messperiode		2. Messperiode	
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[mg/Gefäß]	[mg/m ²]
1. Aussaat	Sommerweizen	0,67 (±)	11,8 (±)	3,03 (±)	53,1 (±)
	Ackerbohne	2,15 (±)	37,7 (±)	4,92 (±)	86,3 (±)
2. Aussaat	Sommerweizen	0,79 (±)	13,9 (±)	3,59 (±)	62,9 (±)
	Ackerbohne	1,95 (±)	34,2 (±)	5,51 (±)	96,6 (±)

NH ₃ -Emissionen aus Sommerweizen und Ackerbohne (Mineralbodenversuch)		Summe [aus 1. und 2. Messperiode]			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d.N _t -Gehaltes* zur Ernte]
1. Aussaat	Sommerweizen	3,70 (±)	64,9 (±)	0,65 (±)	0,32 (±)
	Ackerbohne	7,07 (±)	123,9 (±)	1,24 (±)	1,02 (±)
2. Aussaat	Sommerweizen	4,38 (±)	76,8 (±)	0,77 (±)	0,36 (±)
	Ackerbohne	7,64 (±)	130,8 (±)	1,31 (±)	1,15 (±)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung; * siehe Tabelle 39

Bei der 1. Aussaatgeneration waren nach Ablauf der 1. Messperiode die NH₃-Emissionsverluste bei Ackerbohne gegenüber Sommerweizen um mehr als das Dreifache erhöht. Während

der 2. Messperiode, deren Beginn 14 Tage nach Ablauf der ersten einsetzte, emittierte Ackerbohne gegenüber Sommerweizen 63 % mehr $\text{NH}_3\text{-N}$ (Tab. 40). Im Unterschied zur 1. Messperiode wurde bei Weizen während der 2. Messperiode bereits von Beginn an eine deutlich höhere NH_3 -Freisetzung festgestellt.

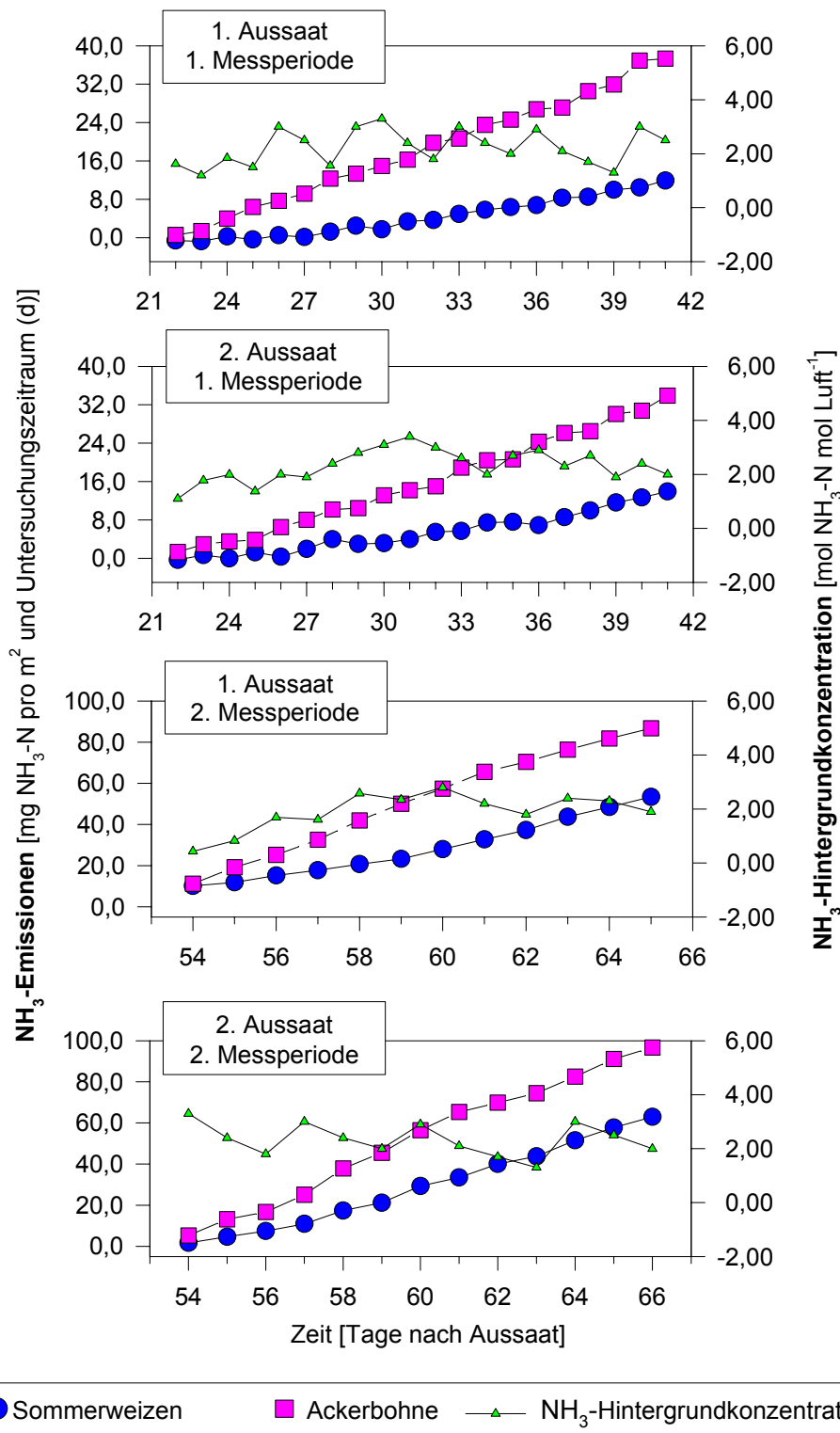


Abb. 32:
Experiment 6:
Kumulative NH_3 -
Emissionen aus
Sommerweizen
und Ackerbohne

Bei den Versuchspflanzen der 2. Aussaatgeneration wurde ein vergleichbares NH_3 -Emissionsverhalten festgestellt. Ackerbohne emittierte signifikant mehr NH_3 als Sommerweizen. Wäh-

rend der 1. Messperiode lag die NH_3 -Freisetzung bei Ackerbohne um 150 %, während der 2. Messperiode noch um mehr als 50 % höher als bei Sommerweizen. Unter Einbeziehung des N_T -Gehaltes in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte waren die NH_3 -Emissionen bei Ackerbohne gegenüber Sommerweizen bei der 1. Aussaatgeneration sogar um das 6-fache, bei der 2. Aussaatgeneration um das 3 1/2-fache erhöht (Tab. 40, letzte Spalte).

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche lag pflanzenartspezifisch bei Ackerbohne auf signifikant höherem Niveau als bei Sommerweizen (Abb. 33). Mit zunehmendem Pflanzenalter (bis fast 10 Wochen nach Aussaat) wurde bei beiden Pflanzenarten ein Konzentrationsanstieg der Alkalität beobachtet. Diese *entwicklungsabhängige* Erhöhung der Alkalität war bei Weizen deutlich stärker als bei Ackerbohne.

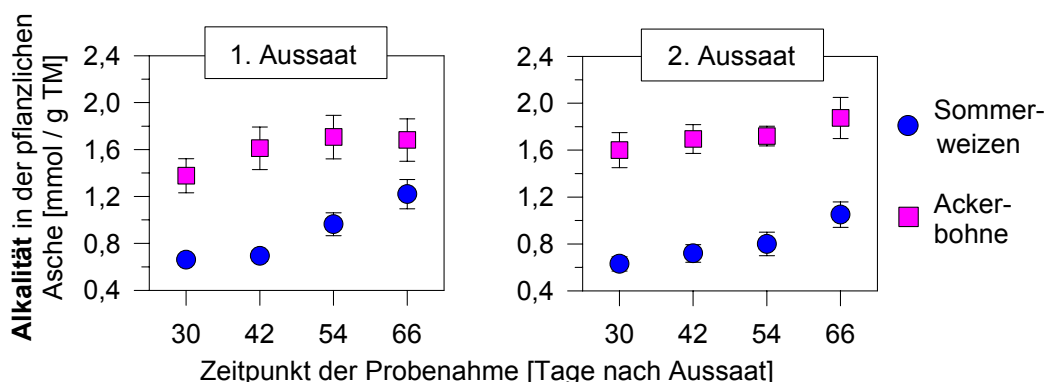


Abb. 33: Experiment 6: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtsprosses von Sommerweizen und Ackerbohne zu verschiedenen Beprobungsterminen

FREIES AMMONIUM

Die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im oberirdischen Gesamtspross, deren Bestimmung 55 und 75 Tage nach Aussaat in einem Frischpflanzenhomogenat erfolgte, lag bei Ackerbohne pflanzenartspezifisch signifikant höher als bei Sommerweizen (Abb. 34). Darüber hinaus wurde bei den Ackerbohnen - 1. und 2. Aussaatgeneration - zwischen der ersten und der zweiten Beprobung (in der Zeit zwischen 50 und 75 Tagen nach Aussaat) ein Anstieg der NH_4^+ -Konzentrationen beobachtet. Auch bei Weizen aus der 1. Aussaatgeneration wurde eine NH_4^+ -Konzentrationserhöhung festgestellt, während bei der 2. Weizenaussaatgeneration ein Konzentrationsrückgang verzeichnet wurde.

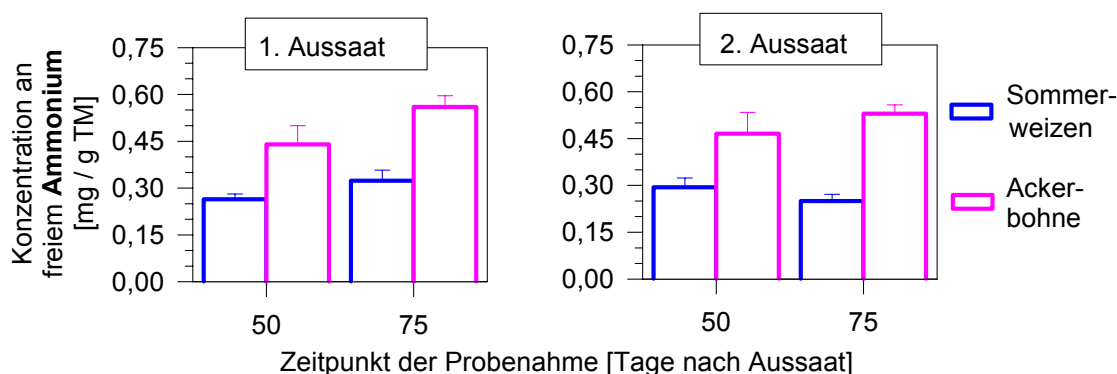


Abb. 34: Experiment 6: Konzentration an **freien NH_4^+ -Ionen** im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen und Ackerbohne

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Bei Ackerbohne lag die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtspross zu Versuchsende (nach 75 Tagen Vegetationszeit) - pflanzenartspezifisch - gegenüber Sommerweizen auf viel höherem Niveau (Abb. 35). Dabei betrug die Konzentrationsdifferenz bei der 1. Aussaatgeneration 57 % und bei der 2. Aussaatgeneration sogar 84 %.

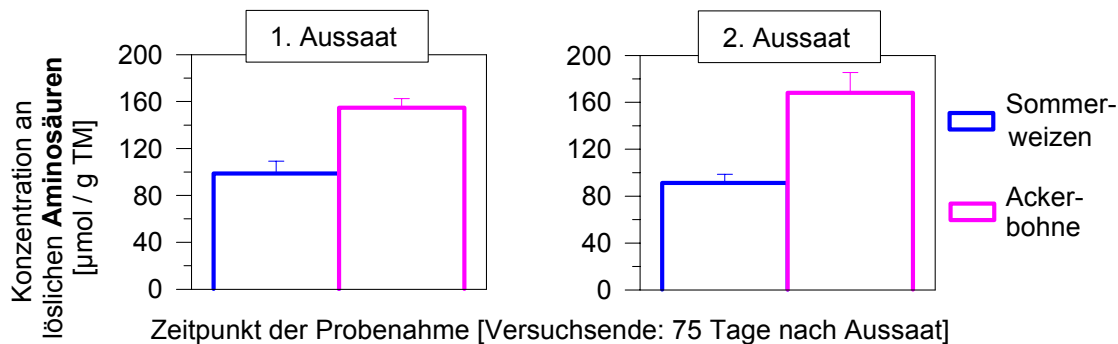


Abb. 35: Experiment 6: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen und Ackerbohne

3.1.7. Experiment 7: Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen und Ackerbohnen unter Einsatz der Haubengefäße

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Die Anzucht der Weizenpflanzen verlief optimal. Bei den Ackerbohnen zeichnete sich bereits während der Keimung eine auffallend hohe *Inhomogenität* ab. Durch die gezielte Auswahl der Keimpflanzen wurde die Zusammenstellung gleichmäßiger Pflanzenbestände erreicht. Das Umsetzen in die Haubengefäße hatte bei beiden Pflanzenarten leichte, vorübergehende Wachstumsstagnationen zur Folge.

Zu Beginn der NH_3 -Messungen, gut vier Wochen nach Aussaat, wiesen beide Pflanzenarten eine erstaunlich hohe Übereinstimmung in ihrer Wuchshöhenentwicklung auf. Auch 26 Tage später, nach Ablauf der Messungen, wurden keine größeren Wachstumsdifferenzen festgestellt. Weizen stand zu diesem Zeitpunkt bereits in der Phase des *Ährenschiebens*. Die einzelnen Pflanzen wiesen einen robusten Habitus auf. Die Ackerbohnenpflanzen zeichneten sich durch ein besonders kräftiges Blattgrün und einen ebenfalls gesunden und widerstandsfähigen Gesamthabitus aus.

ERTRÄGE

Ähnlich wie im vorangegangenen Experiment 6 gab es in Bezug auf die Ertragsbildung deutliche pflanzenartspezifische Unterschiede. So wies Ackerbohne gegenüber Weizen 180 % höhere Frischgewichte auf, während die Trockengewichte bei Weizen gegenüber Ackerbohne leicht erhöht waren.

Bei Weizen wurde gegenüber Ackerbohne eine um 40 % höhere N_t -Aufnahme pro Versuchsfäß verzeichnet. Die N_t -Konzentrationen im pflanzlichen Gesamtspross zu Versuchsende waren bei Weizen gegenüber Ackerbohne um mehr als 20 % erhöht (Tab . 41).

Tab. 41: Experiment 7: **Ertragsbildung** bei Sommerweizen und Ackerbohnen in Nährlösung

Sommerweizen u. Ackerbohnen in Nährlösung (Gefäßtyp A)	Erträge		
	TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
Sommerweizen	15,70	4,18	0,66
Ackerbohne	13,75	3,41	0,47

NH₃-EMISSIONEN

In Bezug auf die Gesamt-NH₃-Freisetzung gab es erneut große pflanzenartspezifische Unterschiede. Ackerbohne emittierte gegenüber Sommerweizen insgesamt die dreifache Menge an NH₃-N (Tab. 42). Unter Einbeziehung der pflanzlichen Entwicklung (zeitlicher Verlauf) konnte gezeigt werden, dass bis etwa 5 Wochen nach Aussaat kaum Unterschiede im Hinblick auf die NH₃-Abgabe zwischen beiden Pflanzenarten vorlagen (Abb. 36). Erst im Anschluss daran war die NH₃-Freisetzungsrate bei Ackerbohne gegenüber Sommerweizen stark angestiegen.

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE UND KONZENTRATION AN LÖSLICHEN AMINOSÄUREN

Die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche des Gesamtprozesses zu Versuchsende war bei Ackerbohne gegenüber Sommerweizen erneut signifikant erhöht (Abb. 37).

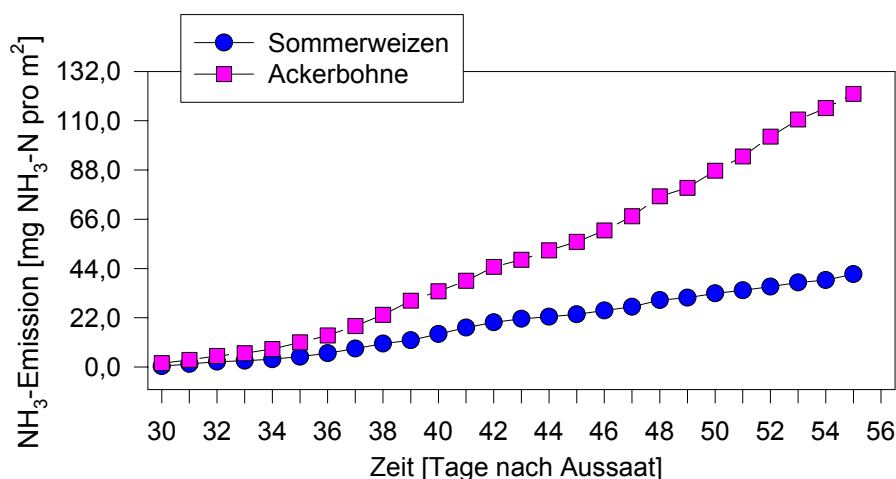
Auch in Bezug auf den Gehalt an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtprozess zu Versuchsende wurden bei Ackerbohne gegenüber Sommerweizen deutlich höhere Konzentrationen gemessen.

Diese Ergebnisse stimmen mit denen aus Experiment 6 überein.

Tab. 42: Experiment 7: **NH₃-Emissionen** aus Sommerweizen- und Ackerbohnenpflanzen

Sommerweizen u. Ackerbohnen in Nährlösung	NH ₃ -Emissionen			
	[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _t -Gehaltes* zur Ernte]
Sommerweizen	1,88 (± 0,14)	41,68 (± 3,04)	0,42 (± 0,03)	0,3 (± 0,24)
Ackerbohnen	5,49 (± 0,38)	121,95 (± 8,01)	1,22 (± 0,08)	1,2 (± 0,08)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung; * siehe Tabelle 40

**Abb. 36:** Experiment 7: Kumulative NH₃-Emissionen aus Sommerweizen und Ackerbohne

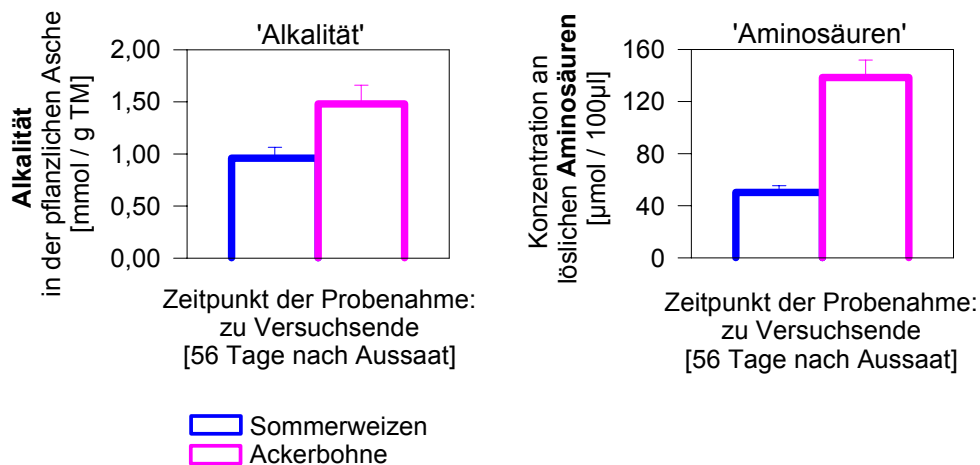


Abb. 37: Experiment 7: links: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche, rechts: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtspross bei Sommerweizen und Ackerbohne

3.1.8. Experiment 8 und 9: Nährlösungskulturversuch mit Ackerbohnen bei mineralischer (NO_3^- - und NH_4^+ -N-Versorgung) und symbiontischer N-Ernährung

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Die Anzucht der Versuchspflanzen war schwieriger als in den bisherigen Versuchen. Die Keimung verlief ungleichmäßig und zögernd. Das anschließende Umsetzen der jungen Keimpflanzen in die Haubengefäße hatte eine vorübergehende Wachstumsstagnation zur Folge. Auf das Einstellen der endgültigen Nährlösungskonzentration reagierten die Pflanzen ebenfalls empfindlich. Unabhängig von der N-Angebotsform traten erneut Verzögerungen im Wachstum auf. Erst nach Adaption an das neue Nährmedium setzte bei der überwiegenden Anzahl der Versuchspflanzen ein Wachstumsschub ein. Die Ursache für diese anfänglichen Wachstumsschwierigkeiten blieb ungeklärt. Vor Beginn der NH_3 -Messungen wurden die zu schwach entwickelten Pflanzen entfernt. Während der NH_3 -Messungen wiesen die Pflanzen - vermutlich aufgrund erhöhter Temperaturentwicklung bei geschlossenen Hauben - erstaunlich hohe Wachstumsraten auf.

In EXPERIMENT 8 betrug die pflanzliche Wuchshöhe zu Beginn der NH_3 -Messungen, 3 ½ Wochen nach Aussaat, bis zu 25 cm. Die Anzahl der Blätter pro Pflanzenspross lag zu diesem Zeitpunkt zwischen acht und zehn.

In EXPERIMENT 9 (VERSUCH 1) lagen zu Beginn der NH_3 -Messungen, exakt drei Wochen nach Aussaat, visuelle Wachstumsunterschiede in Abhängigkeit von der mineralischen N-Angebotsform vor. Bei NO_3^- -N-Versorgung waren Sprosslänge und Blattflächenindex der Versuchspflanzen höher als bei NH_4^+ -N-Versorgung. Die symbiontisch ernährten Pflanzen zeigten eine mit den NO_3^- -N ernährten Pflanzen übereinstimmende Entwicklung.

In EXPERIMENT 9 (VERSUCH 2) führte das Angebot von NH_4^+ -N ebenfalls zu Wachstumseinschränkungen, die sich in Form niedrigerer Wuchshöhen und kleinerer Blattflächen darstellten. Auch die symbiontisch ernährten Pflanzen wiesen hier gegenüber den NO_3^- -N ernährten Pflanzen geringere Wachstumsraten auf. Zu Beginn der NH_3 -Messungen, vier Wochen nach Aussaat, lag die pflanzliche Wuchshöhe bei Angebot von NH_4^+ -N noch unter 20 cm, während sie bei symbiontischer N-Ernährung 22 cm und bei Angebot von NO_3^- -N bis zu 25 cm betrug.

ERTRÄGE

Die Form der mineralischen N-Versorgung hatte einen deutlichen Einfluss auf die Ertragsbildung der Ackerbohne.

In EXPERIMENT 8 führte die Versorgung mit NO_3^- - gegenüber NH_4^+ -N zu 43 % höheren Frisch- und 38 % höheren Trockengewichten. Die N_t -Aufnahme pro Versuchsgefäß lag bei Angebot von NO_3^- -N um 75 % höher als bei Angebot von NH_4^+ -N. Die N_t -Konzentration in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte war bei Angebot von NO_3^- - gegenüber NH_4^+ -N um 27 % erhöht (Tab. 43a).

In EXPERIMENT 9 (VERSUCH 1) wiesen die Pflanzen bei Angebot von NO_3^- -N 33 % höhere Frisch- und 40 % höhere Trockengewichte als bei Angebot von NH_4^+ -N auf. Gegenüber symbiontischer N-Ernährung beliefen sich die Mehrerträge bei NO_3^- -N-Versorgung auf 13 % bei der Frischsubstanz- und fast 10 % bei der Trockensubstanzbildung. Die N_t -Aufnahme sowie die N_t -Konzentration in der pflanzlichen Trockenmasse des oberirdischen Gesamtprozesses zur Zeit der Ernte lagen bei NO_3^- -N ernährter und symbiontisch ernährter Ackerbohne auf nahezu gleich hohem Niveau, während sie bei NH_4^+ -N-Versorgung deutlich darunter lagen (Tab. 43a).

In EXPERIMENT 9 (VERSUCH 2) führte die Versorgung mit NO_3^- -N gegenüber der Versorgung mit NH_4^+ -N zu 35 % höheren Frisch- und 32 % höheren Trockengewichten. Die symbiontisch ernährten Pflanzen erreichten ein etwas geringeres Ertragsniveau als die NO_3^- -N ernährten Pflanzen, aber ein deutlich höheres als die NH_4^+ -N ernährten Pflanzen. Die N_t -Aufnahme sowie die N_t -Konzentration im oberirdischen Gesamtprozess (TS) zur Zeit der Ernte war bei Angebot von NH_4^+ -N erneut deutlich geringer als bei Angebot von NO_3^- -N und symbiontischer N-Ernährung.

Tab. 43a: Experiment 8 und 9: **Ertragsbildung** bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art und der Form der N-Versorgung

Ackerbohne (in Nährlösung): N ₂ -Fixierung / NO ₃ ⁻ -N / NH ₄ ⁺ -N		Erträge		
		TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
EXPERIMENT 8	NO ₃ ⁻ -N	5,60	3,77	0,21
	NH ₄ ⁺ -N	4,08	2,97	0,12
EXPERIMENT 9 • VERSUCH 1	N ₂ -Fixierung	5,45	4,08	0,22
	NO ₃ ⁻ -N	5,96	4,01	0,24
	NH ₄ ⁺ -N	4,25	3,03	0,13
EXPERIMENT 9 • VERSUCH 2	N ₂ -Fixierung	8,17	4,28	0,35
	NO ₃ ⁻ -N	8,99	4,20	0,38
	NH ₄ ⁺ -N	6,80	3,12	0,21

Angegeben sind Mittelwerte

NH₃-EMISSIONEN

Die NH₃-Freisetzung aus Ackerbohne wurde von der N-Ernährung der Pflanzen beeinflusst.

In EXPERIMENT 8 emittierten die Pflanzen bei Angebot von NH_4^+ -N über den 12 Tage umfassenden Untersuchungszeitraum insgesamt 50 % mehr NH₃-N als bei Angebot von NO_3^- -N (Abb. 38, oben). Unter Einbeziehung des N_t -Gehaltes in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte waren die NH₃-Emissionen bei NH_4^+ -N-Versorgung sogar um 160 % erhöht (Tab. 43, unten rechts).

Auch in EXPERIMENT 9 (VERSUCHE 1 und 2) war die NH₃-Freisetzung bei NH_4^+ -N-Ernährung stark erhöht. So waren die NH₃-Gesamt-Emissionsverluste bei Versorgung mit NO_3^- -N gegenüber der Versorgung mit NH_4^+ -N zwischen 26 % (VERSUCH 2) und 34 % (VERSUCH 1) reduziert (Tab. 43b, Abb. 38a). Bei symbiontischer Ernährung war die NH₃-Freisetzung gegenüber

NH_4^+ -N-Ernährung nur unwesentlich erhöht (Tab. 43b, Abb. 38a, 38b). Unter Einbeziehung des N_t -Gehaltes in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte wiesen die NH_4^+ -N gegenüber den symbiontisch ernährten Ackerbohnen 50 % höhere NH_3 -Emissionsverluste auf (Tab. 43b, unten rechte Spalte).

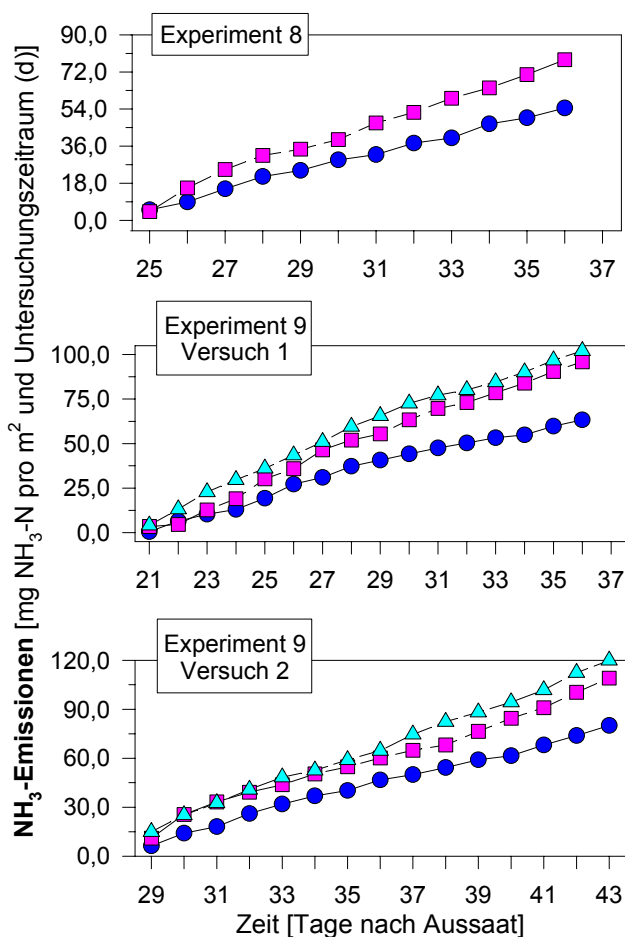


Abb. 38a: Experiment 8 und 9: Kumulative NH_3 -Emissionen bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art und der Form der N-Versorgung

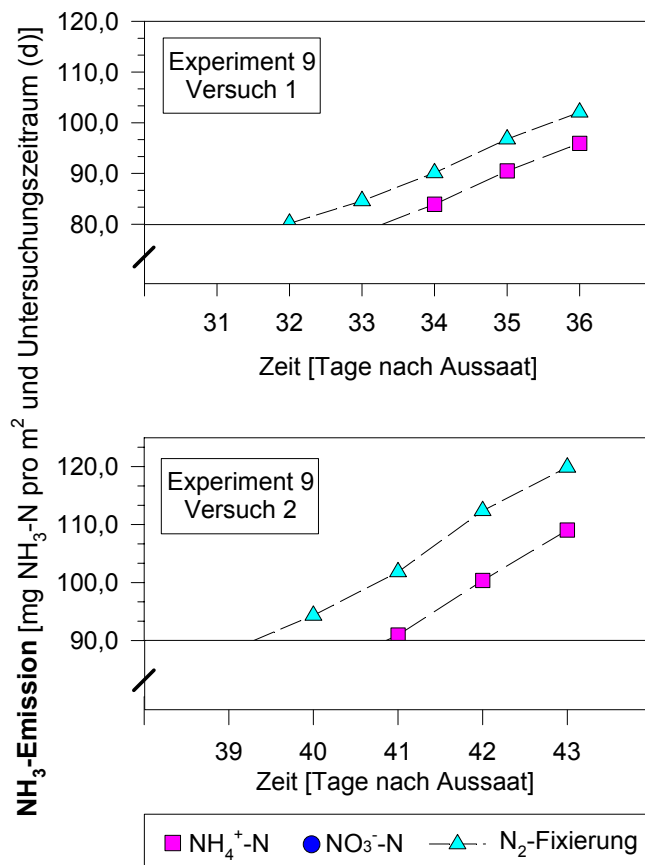


Abb. 38b: Experiment 9: Höhe der absoluten NH_3 -Emissionen bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art der N-Versorgung (NH_4^+ -N, N_2 -Fix.) gegen Ende des Messzeitraumes

Tab. 43b: Experiment 8 und 9: Höhe der Gesamt-NH₃-Emissionen bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art und der Form der N-Versorgung

Ackerbohne (in Nährlösung): N ₂ -Fixierung / NO ₃ ⁻ -N / NH ₄ ⁺ -N		NH ₃ -Emissionen			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _r -Gehaltes zur Ernte]
EXPERIMENT 8	NO ₃ ⁻ -N	2,57 (± 0,21)	53,7 (± 4,46)	0,53 (± 0,04)	1,22 (± 0,11)
	NH ₄ ⁺ -N	3,81 (± 0,28)	79,3 (± 5,79)	0,79 (± 0,06)	3,17 (± 0,24)
EXPERIMENT 9 • VERSUCH 1	N ₂ -Fixierung	4,89 (± 0,43)	102,0 (± 9,50)	1,02 (± 0,10)	2,22 (± 0,20)
	NO ₃ ⁻ -N	3,03 (± 0,24)	63,1 (± 4,92)	0,64 (± 0,05)	1,26 (± 0,10)
	NH ₄ ⁺ -N	4,59 (± 0,34)	95,6 (± 7,07)	0,96 (± 0,07)	3,53 (± 0,27)
EXPERIMENT 9 • VERSUCH 2	N ₂ -Fixierung	5,75 (± 0,45)	119,8 (± 10,0)	1,20 (± 0,10)	1,64 (± 0,13)
	NO ₃ ⁻ -N	3,84 (± 0,26)	80,0 (± 5,44)	0,79 (± 0,05)	1,01 (± 0,08)
	NH ₄ ⁺ -N	5,21 (± 0,42)	108,6 (± 8,80)	1,09 (± 0,09)	2,48 (± 0,20)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtprozesses war in Abhängigkeit von der N-Ernährung der Ackerbohnen unterschiedlich hoch (Abb. 39).

In EXPERIMENT 8 wurde bei Versorgung mit NO₃⁻-N eine signifikant höhere Konzentration der Alkalität gemessen als bei Versorgung mit NH₄⁺-N. Ferner wurde zwischen dem ersten und dem zweiten Untersuchungszeitpunkt - bei NO₃⁻-N und NH₄⁺-N-Ernährung gleichermaßen - ein leichter Anstieg der Alkalitätskonzentration beobachtet (Abb. 39, oben).

In VERSUCH 1 von EXPERIMENT 9 war die Konzentration der Alkalität, deren Bestimmung nur zu Versuchsende erfolgte, bei Angebot von NO₃⁻-N signifikant höher als bei Angebot von NH₄⁺-N und als bei symbiontischer N-Ernährung. Gegenüber NH₄⁺-N-Ernährung wurde bei den symbiontisch ernährten Pflanzen eine höhere Konzentration der Alkalität im pflanzlichen Gewebe gemessen. (Abb. 39, unten).

Auch in VERSUCH 2 von EXPERIMENT 9 wurde bei NO₃⁻-N-Versorgung eine signifikant höhere Alkalitätskonzentration gemessen als bei symbiontischer N-Ernährung. Wie im vorangestellten Versuch erfolgte die Bestimmung nach Ablauf des Untersuchungszeitraumes. Zur NH₄⁺-N-Variante lagen nur unzureichende Messwerte vor, die keine statistisch gesicherte Auswertung gewährleisten.

FREIES AMMONIUM

Die Konzentration an freien NH₄⁺-Ionen im oberirdischen Gesamtprozess wurde von der N-Ernährung der Ackerbohnen ebenfalls beeinflusst. Die Versorgung mit NH₄⁺-N führte gegenüber der Versorgung mit NO₃⁻-N zu einer NH₄⁺-Anreicherung im Gewebe. Die chemische Analyse erfolgte mit Proben aus Frischpflanzenhomogenaten.

In EXPERIMENT 8 wurden bei Angebot von NH₄⁺-N bis zu 44 % höhere NH₄⁺-Konzentrationen gemessen als bei Angebot von NO₃⁻-N. Der Zeitpunkt der Untersuchung hatte nur wenig Einfluss auf die NH₄⁺-Akkumulation. Zwischen dem ersten und dem zweiten Untersuchungszeitpunkt nahmen die Konzentrationen leicht zu (Abb. 40 oben).

In EXPERIMENT 9 (VERSUCHE 1 und 2) lagen die NH₄⁺-Gehalte bei NH₄⁺-N-Versorgung ebenfalls deutlich höher als bei NO₃⁻-N-Versorgung. Die symbiontisch ernährten Ackerbohnen wiesen jeweils die geringsten Konzentrationen an freien NH₄⁺-Ionen auf (Abb. 40 unten).

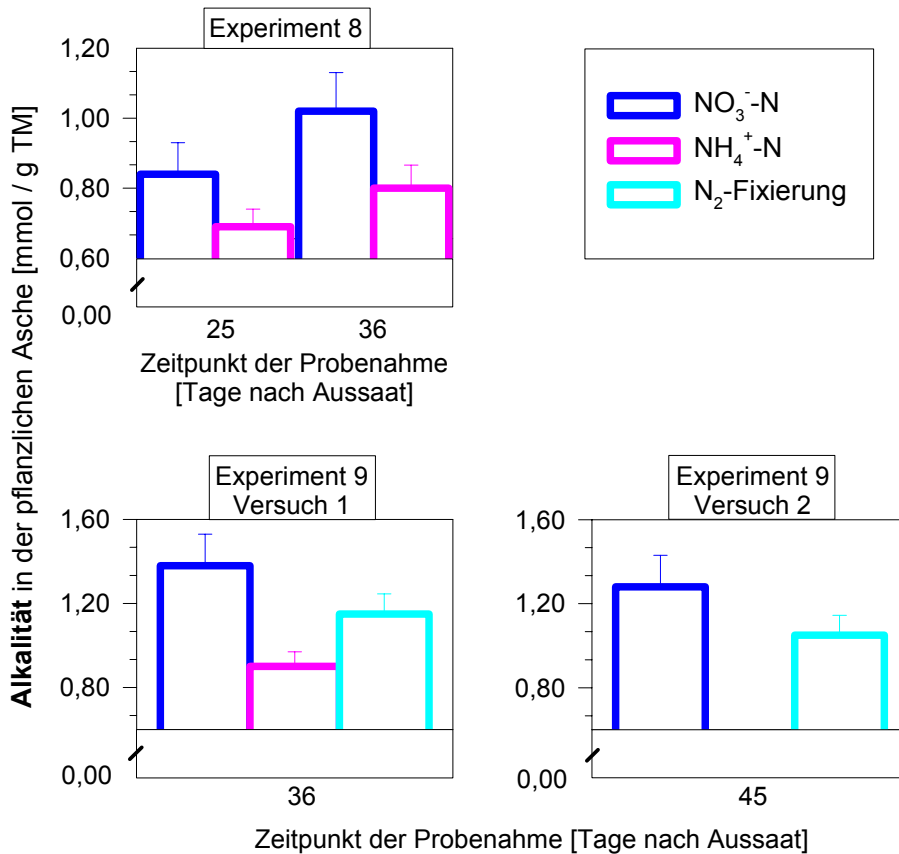


Abb. 39: Experiment 8 und 9.: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtprozesses bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art und der Form der N-Versorgung

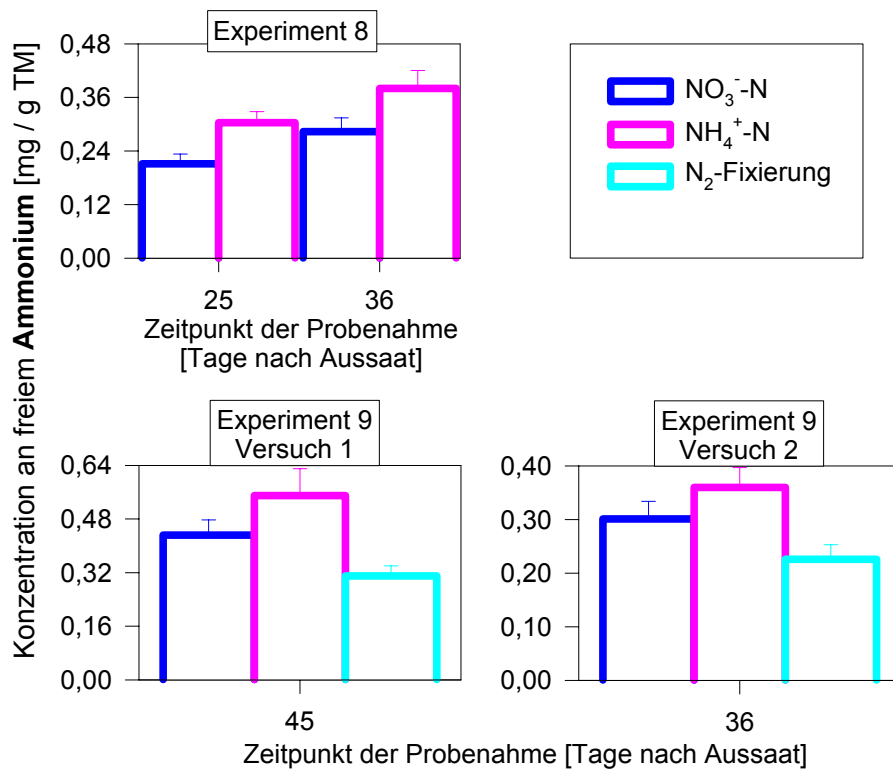


Abb. 40: Experiment 8 und 9.: Konzentration an **freiem Ammonium** im oberirdischen Gesamtprozess bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art und der Form der N-Versorgung

LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Die N-Ernährung hatte auch Einfluss auf die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtspross von den Ackerbohnen (Abb. 41). Bei NH_4^+ -N-Ernährung war die Aminosäurekonzentration gegenüber NO_3^- -N- und symbiontischer N-Ernährung erhöht.

In EXPERIMENT 8 wurden bei Angebot von NH_4^+ -N zum Zeitpunkt der 1. Beprobung 9 % und zum Zeitpunkt der 2. Beprobung 16 % höhere Konzentrationen gemessen als bei Angebot von NO_3^- -N. Eine Beziehung zwischen dem Alter der Versuchspflanzen und der Höhe der Aminosäurekonzentration im Sprossgewebe konnte dagegen nicht festgestellt werden (Abb. 41 oben). Auch in VERSUCH 1 von EXPERIMENT 9 lag die Konzentration an löslichen Aminosäuren im Sprossgewebe bei Angebot von NH_4^+ -N höher als bei Angebot von NO_3^- -N. Bei symbiontischer N-Ernährung waren im Vergleich zur Versorgung mit NO_3^- -N die Aminosäurekonzentrationen um 7 % reduziert.

In EXPERIMENT 9 (VERSUCH 2) wiesen die Pflanzen bei Angebot von NH_4^+ -N 8 % höhere Konzentrationen an Aminosäuren auf als bei Angebot von NO_3^- -N. Bei den symbiontisch ernährten Ackerbohnen wurden erneut die geringsten Konzentrationen an löslichen Aminosäuren gemessen.

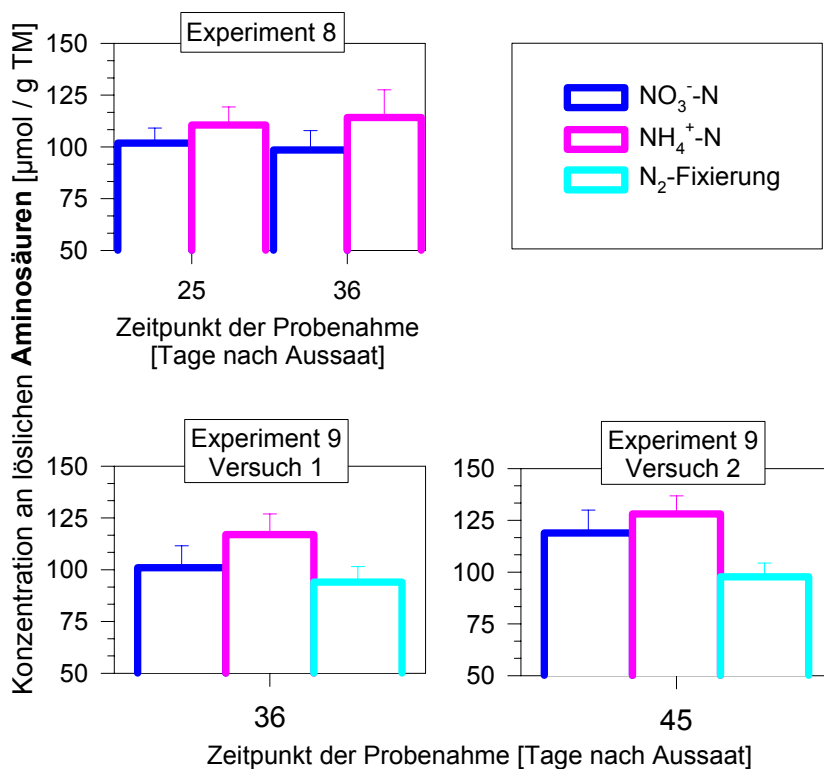


Abb. 41: Experiment 8 und 9: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtspross bei Ackerbohne in Abhängigkeit von der Art und der Form der N-Versorgung

3.2.9.	Experiment 10:	Mineralbodenversuch mit Sommerweizen und Körnermais unter Einsatz der Windtunnelmethode
3.2.10.	Experiment 11:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen und Körnermais unter Einsatz der Windtunnelmethode
3.2.11.	Experiment 12:	Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen und Körnermais unter Einsatz der Haubengefäßmethode

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Die Anzucht von Weizen und Mais verlief in EXPERIMENT 10 zügig und problemlos. Dabei wies Mais - als charakteristische C₄-Pflanzenart - bereits in der frühen Jugendphase auffallend hohe Wachstumsraten auf. Dieser erhöhte Zuwachs an pflanzlicher Biomasse bei Mais gegenüber Weizen erschwerte die Gegenüberstellung der zu untersuchenden NH₃-Freisetzung beider Pflanzenarten. Im weiteren Entwicklungsverlauf nahm die Diskrepanz in Bezug auf die Höhe der Wachstumsrate zwischen beiden Pflanzenarten noch zu, so dass die Maispflanzen aus der zweiten, 10 Tage jüngeren Aussaatgeneration für die Erfassung der NH₃-Emissionen eingesetzt werden mussten. Infolgedessen erfolgte die Aussaat von Mais in den EXPERIMENTEN 11 und 12 zehn Tage später als die Aussaat von Weizen.

Zu Beginn der NH₃-Messungen hatte Weizen in EXPERIMENT 10 das *Schossstadium* erreicht. Nach Ablauf der Untersuchungen, 2 ½ Wochen später, betrug die pflanzliche Wuchshöhe 28 cm. Die 10 Tage jüngeren Maispflanzen wiesen zu diesem Zeitpunkt bereits eine Wuchshöhe von bis zu 35 cm auf und zeichneten sich durch einen besonders kräftigen Habitus aus.

Die Versuchspflanzen in EXPERIMENT 11 und 12 wurden unter kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer angezogen. Dies hatte eine von Beginn an überdurchschnittlich zügig verlaufende Entwicklung der Pflanzen zur Folge. Das Umsetzen in den Windtunnel - in EXPERIMENT 11 - verursachte leichte Adaptationsschwierigkeiten, die sich in Form vorübergehender Wachstumsstagnationen darstellten.

Zu Beginn der NH₃-Emissionsmessungen betrug die Wuchshöhen der Versuchspflanzen in EXPERIMENT 11 18-20 cm und in EXPERIMENT 12 16-18 cm. Dabei wiesen sowohl Weizen als auch Mais in beiden Experimenten auffallend homogene Bestände auf, deren Einzelpflanzen kräftig und durch ein sattes Blattgrün gekennzeichnet waren. Zu Versuchsende aber waren die pflanzlichen Wuchshöhen bei Mais wegen seiner hoher Wachstumsraten gegenüber Weizen erneut deutlich erhöht.

ERTRÄGE

Infolge des verschiedenartigen Stoffwechsels von C₃- und C₄-Pflanzen ergaben sich im Hinblick auf die Ertragsleistung entsprechende Unterschiede zwischen den Pflanzenarten. So war die Produktion an pflanzlicher Frischmasse (FS) bei Mais gegenüber Weizen deutlich erhöht, während es sich in Bezug auf die Produktion an pflanzlicher Trockenmasse (TS) entgegengesetzt verhielt. Dementsprechend erzielte Weizen gegenüber Mais signifikant höhere Trockengewichte (Tab. 44 [TS-Erträge]).

In EXPERIMENT 10 erreichte Mais 100 % höhere Frischgewichte als Weizen. Infolge des deutlich geringeren TS-Gehaltes bei Mais waren allerdings die Trockengewichte gegenüber Weizen um 38 % reduziert.

In EXPERIMENT 11 lag der Mehrertrag an pflanzlichem Frischgewicht bei Mais gegenüber Weizen bei 80 %. Dagegen waren auch hier die Trockengewichte bei Mais gegenüber Weizen deutlich geringer (knapp 30 %).

In EXPERIMENT 12 waren die Frischgewichte bei Mais gegenüber Weizen ebenfalls sehr stark erhöht (um annähernd 80 %), während die Trockengewichte - aufgrund des geringeren TS-Gehaltes - erneut niedriger ausfielen als bei Weizen (um mehr als 20 %).

Die N_t -Konzentrationen im oberirdischen Gesamtspross zu Versuchsende differierten zwischen den beiden Pflanzenarten in EXPERIMENT 10 nur wenig (< 5 %), obwohl die N_t -Aufnahme pro Versuchsgefäß bei Weizen im Vergleich zu Mais um fast 65 % höher war. Der Grund für dieses Ergebnis liegt in den deutlich höheren TS-Erträgen bei Weizen gegenüber Mais.

In EXPERIMENT 11 wurde bei Weizen gegenüber Mais eine um 58 % höhere N_t -Aufnahme pro Versuchsgefäß verzeichnet. Die N_t -Konzentration im oberirdischen Gesamtspross zur Zeit der Ernte lag bei Weizen aber um nur 12 % höher als bei Mais.

In EXPERIMENT 12 nahm Weizen im Vergleich zu Mais fast 30 % mehr Stickstoff pro Gefäß auf. Doch im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen waren hier die N_t -Konzentrationen bei Mais gegenüber Weizen leicht erhöht (um 6,5 %).

Tab. 44: Experimente 10-12: **Ertragsbildung** (oben) und Höhe der **NH₃-Emissionen** (unten) bei Sommerweizen und Körnermais

Sommerweizen und Körnermais		Erträge		
		TS [g/Gefäß]	N_t [%]	N_t [g/Gefäß]
Experiment 10 Windtunnelversuch Mineralboden	WEIZEN	8,79	4,33	0,38
	MAIS	5,49	4,19	0,23
Experiment 11 Windtunnelversuch Nährlösung	WEIZEN	8,30	4,89	0,41
	MAIS	5,90	4,37	0,26
Experiment 12 Haubengefäßversuch Nährlösung	WEIZEN	8,45	4,99	0,42
	MAIS	6,14	5,31	0,33

Sommerweizen und Körnermais		NH ₃ -Emissionen			
		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N_t -Gehaltes zur Ernte]
Experiment 10 Windtunnelversuch Mineralboden	WEIZEN	1,49 (± 0,10)	25,9 (± 1,79)	0,26 (± 0,02)	0,39 (± 0,03)
	MAIS	0,10 (± 7*10 ⁻³)	1,9 (± 0,14)	0,02 (± 1*10 ⁻³)	0,04 (± 3*10 ⁻³)
Experiment 11 Windtunnelversuch Nährlösung	WEIZEN	1,20 (± 0,09)	31,6 (± 2,43)	0,32 (± 0,02)	0,30 (± 0,02)
	MAIS	-0,47 (± 0,03)	-12,4 (± 0,88)	-0,12 (± 9*10 ⁻³)	-0,18 (± 0,01)
Experiment 12 Haubengefäßversuch Nährlösung	WEIZEN	1,00 (± 0,08)	40,0 (± 3,36)	0,40 (± 0,03)	0,24 (± 0,02)
	MAIS	0,04 (± 3*10 ⁻³)	1,6 (± 0,14)	0,02 (± 1*10 ⁻³)	0,01 (± 9*10 ⁻⁴)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

NH₃-EMISSIONEN

Bei der vergleichenden Gegenüberstellung der NH₃-Freisetzung aus Sommerweizen und Körnermais ergaben sich klare pflanzenartspezifische Unterschiede (Abb. 42).

In EXPERIMENT 10 emittierte Weizen über den 18 Tage umfassenden Untersuchungszeitraum 1,5 mg NH₃-N pro Versuchsgefäß, während bei Mais eine Gesamt-NH₃-Freisetzung von nur 0,1 mg NH₃-N pro Versuchsgefäß verzeichnet wurde.

Auch in Bezug auf den Verlauf der NH₃-Emissionskurven gab es zwischen beiden Pflanzenarten wenig Übereinstimmung (Abb. 42). Bei Weizen wurde ein von Beginn an kontinuierlicher Kurvenanstieg aufgezeichnet, während bei Mais die NH₃-Emissionen insgesamt gegen Null tendierten. Trotzdem war zu erkennen, dass bei Mais nach Abschluss des ersten Untersuchungsabschnittes mit überwiegend negativen Messwerten eine Phase mit fast ausschließlich positiven Messwerten (NH₃-Abgabe) folgte.

In EXPERIMENT 11 lag die über einen Zeitraum von 14 Tagen insgesamt emittierte NH₃-Menge bei Weizen ebenfalls über 1 mg NH₃-N pro Versuchsgefäß. Demgegenüber nahm Mais im sel-

ben Zeitraum fast 0,5 mg NH₃-N pro Versuchsgefäß aus der Atmosphärenluft auf, was in der Bilanz zu *negativen Netto-NH₃-Emissionen* führte. Die in Abbildung 42 dargestellten NH₃-Emissionskurven veranschaulichen das unterschiedliche NH₃-Emissionsverhalten beider Pflanzenarten. Bei Weizen konnte erneut ein nahezu kontinuierliches Ansteigen der NH₃-Emissionskurve beobachtet werden. Dagegen traten bei Mais bis 4 Wochen nach Aussaat fast ausschließlich *negative NH₃-Meßwerte* (= NH₃-Aufnahme) auf, die ein Abfallen der Emissionskurve unter Null zur Folge hatten. Im letzten Untersuchungsabschnitt ergaben die Messungen *positive Werte* (= NH₃-Abgabe), was zu einem leichten Emissionskurvenanstieg führte. Auch in EXPERIMENT 12 emittierte Weizen über den 18 Tage umfassenden Untersuchungszeitraum pro Versuchsgefäß insgesamt 1 mg NH₃-N. Die NH₃-Emissionskurve verlief hier nahezu kontinuierlich ansteigend. Demgegenüber tendierten die Gesamt-NH₃-Emissionen bei Mais erneut gegen Null.

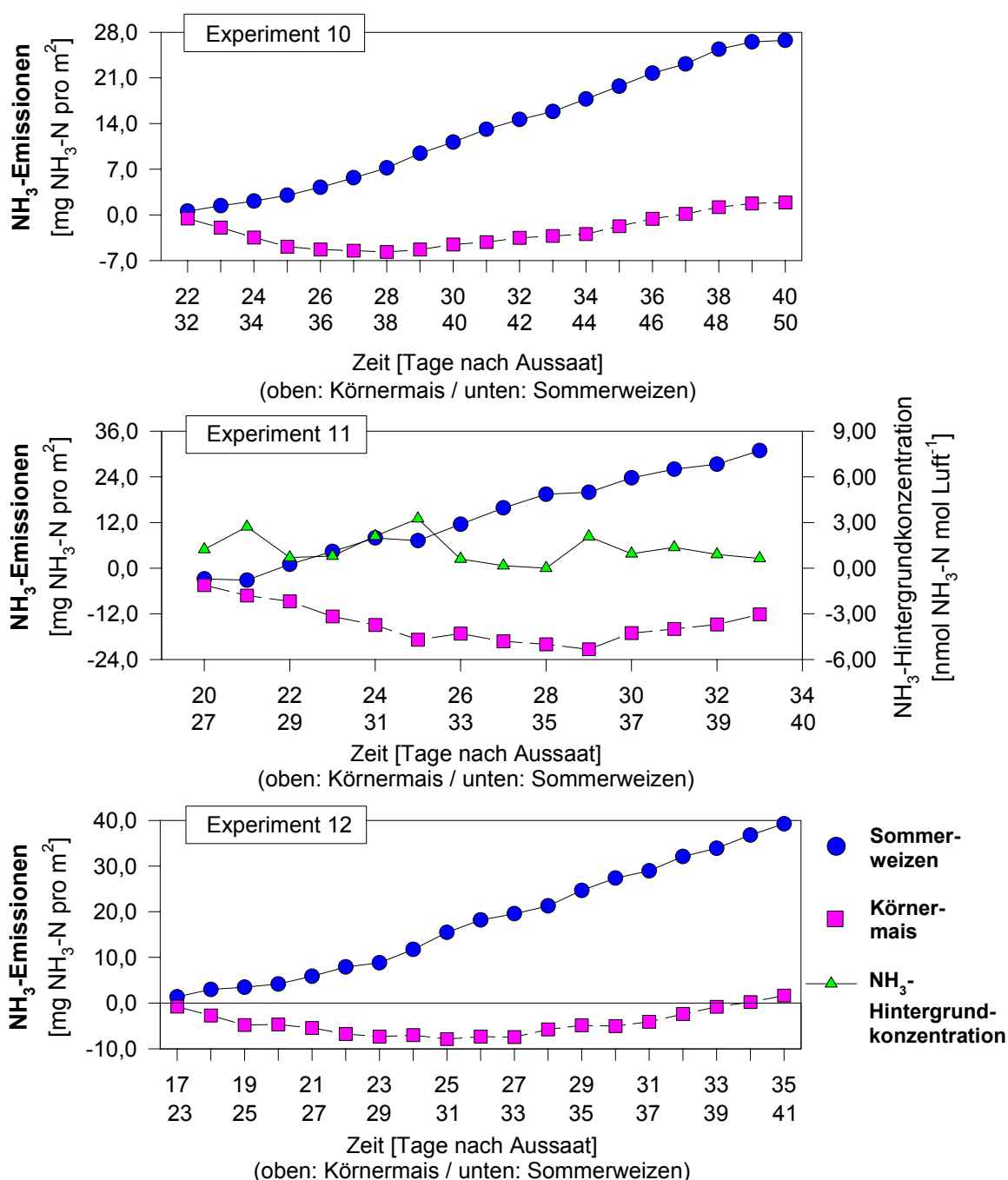


Abb. 42: Experiment 10-12: Kumulative NH₃-Emissionen aus Sommerweizen und Körnermais

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

In Bezug auf die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtsprosses gab es klare pflanzenartspezifische Unterschiede. Bei Mais wurde in allen Untersuchungen eine signifikant höhere Alkalität gemessen als bei Weizen (Abb. 43).

Ferner wurde bei beiden Pflanzenarten die Konzentration der Alkalität von der Entwicklung (Alter) der Versuchspflanzen beeinflusst. Bei Weizen wurde mit zunehmendem Pflanzenalter ein nahezu kontinuierlicher Anstieg der Alkalität festgestellt. In EXPERIMENT 10 betrug dieser Konzentrationsanstieg zwischen dem ersten und dritten Messwert 16 % und in EXPERIMENT 11 fast 50 %. Bei Mais wurde in EXPERIMENT 10 keine kontinuierliche Erhöhung der Alkalitätskonzentration mit zunehmendem Alter der Pflanzen beobachtet. Dennoch wurde zwischen dem ersten und dem dritten Messwert eine Konzentrationserhöhung von 10 % verzeichnet. Dagegen wurde in EXPERIMENT 11 auch bei Mais über den Zeitraum der drei Untersuchungen hinweg ein stetiger Alkalitätsanstieg festgestellt.

In EXPERIMENT 12 wies Mais gegenüber Weizen zu Versuchsende eine 40 % höhere Alkalitätskonzentration im oberirdischen Sprossgewebe auf.

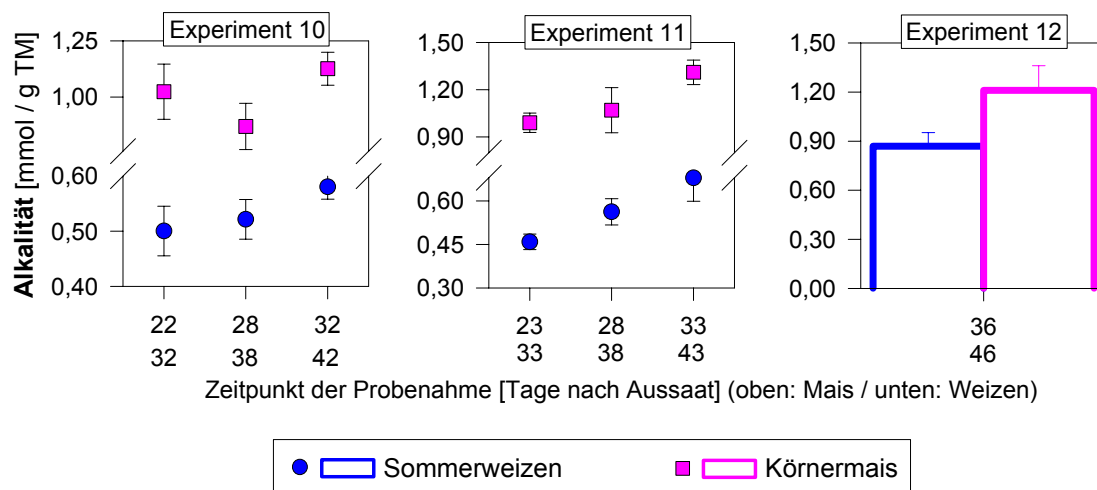


Abb. 43: Experimente 10-12: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche des oberirdischen Gesamtsprosses bei Sommerweizen und Körnermais

KONZENTRATION AN FREIEM AMMONIUM

Auch die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im oberirdischen Gesamtspross der Versuchspflanzen lag pflanzenartspezifisch auf unterschiedlich hohem Niveau. So wurden bei Sommerweizen in nahezu allen Untersuchungen signifikant höhere NH_4^+ -Konzentrationen gemessen als bei Körnermais (Abb. 44).

In EXPERIMENT 10 lagen die NH_4^+ -Konzentrationsunterschiede zwischen Weizen und Mais zum Zeitpunkt der ersten Beprobung bei 17%, zum Zeitpunkt der zweiten Beprobung bei 42%. In EXPERIMENT 11 wies Weizen zum Zeitpunkt der zweiten Beprobung sogar 70 % höhere NH_4^+ -Konzentrationen auf als Mais.

In EXPERIMENT 12 wurden bei Weizen gegenüber Mais 30 % höhere NH_4^+ -Konzentrationen im Sprossgewebe gemessen.

Das Entwicklungsstadium hatte ebenfalls Einfluss auf die Akkumulation freier NH_4^+ -Ionen im pflanzlichen Gewebe. Mit zunehmendem Pflanzenalter wurde bei beiden Pflanzenarten ein

Konzentrationsanstieg festgestellt. Zur Veranschaulichung der Konzentrationsveränderungen in Abhängigkeit von dem Pflanzenalter wurden in Abbildung 45 die Messwerte aus den drei verschiedenen Experimenten in einer Grafik dargestellt.

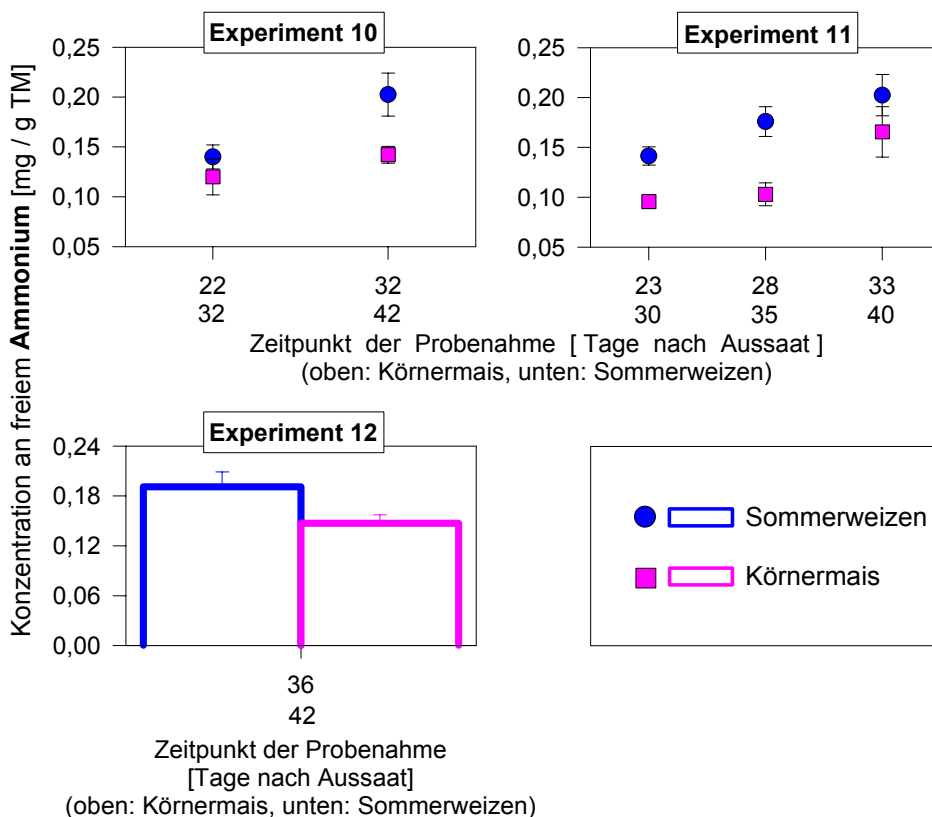


Abb. 44: Experimente 10-12: Konzentration an freiem Ammonium im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen und Körnermais

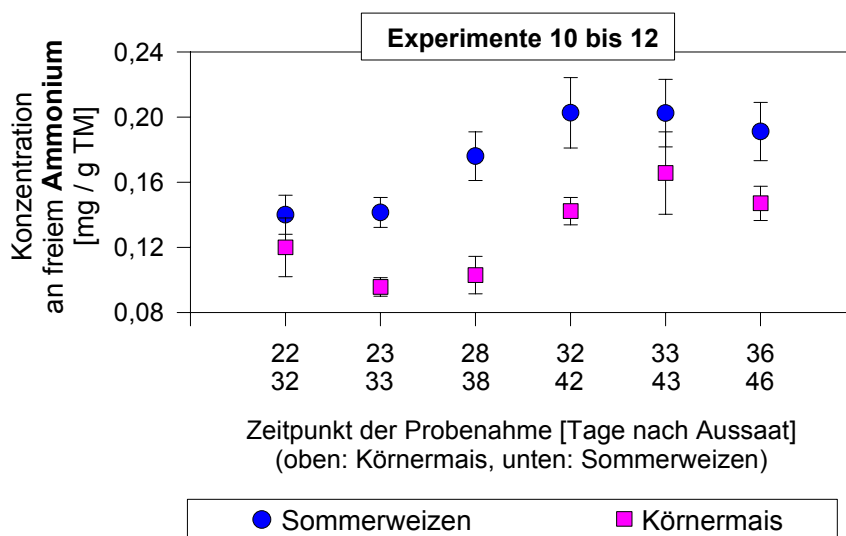


Abb. 45: Experimente 10-12: Konzentration an freiem Ammonium im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen und Körnermais in Abhängigkeit von dem Beprobungszeitpunkt

pH-WERT IM APOPLASMATISCHEN GEWEBE

Die Bestimmung des pH-Wertes in der Apoplastenflüssigkeit des Blattgewebes, die nach Abschluss der NH_3 -Messungen erfolgte, ergab, dass Körnermais mit pH 5,82 gegenüber Sommerweizen mit pH 6,77 einen etwas niedrigeren pH-Wert aufwies. Damit war das Milieu im apoplastischen Gewebe bei Weizen *alkalischer* als bei Mais (Abb. 46).

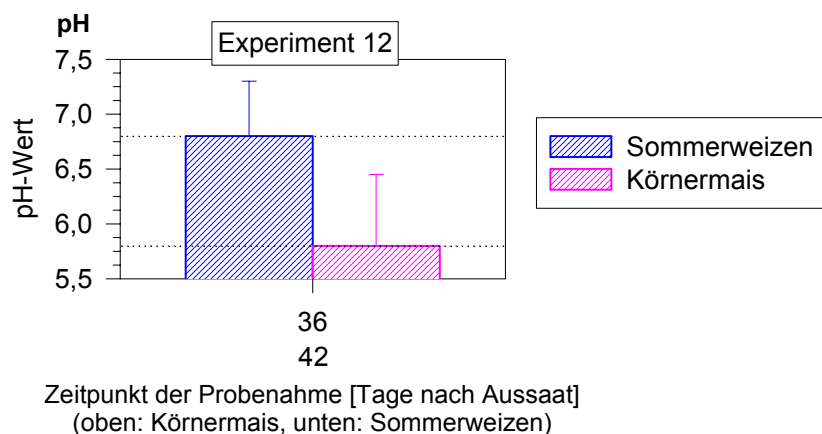


Abb. 46:
Experiment 12:
pH-Wert im
Apoplasten von
Sommerweizen
und Körnermais

KONZENTRATION AN LÖSLICHEN AMINOSÄUREN

Auch die Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtpross lag in Abhängigkeit von der Pflanzenart auf unterschiedlich hohem Niveau. Zu jedem Untersuchungszeitpunkt war die Aminosäurekonzentration im oberirdischen Gesamtpross bei Weizen gegenüber Mais signifikant erhöht (Abb. 47a).

Ferner konnte bei beiden Pflanzenarten eine Beziehung zwischen dem Zeitpunkt der Beprobung und der Konzentration an löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe beobachtet werden. Zwischen dem 22. und dem 36. Tag nach Aussaat - bei Mais - beziehungsweise zwischen dem 30. und dem 42. Tag nach Aussaat - bei Weizen - wurde ein Konzentrationsanstieg festgestellt (Abb. 47b).

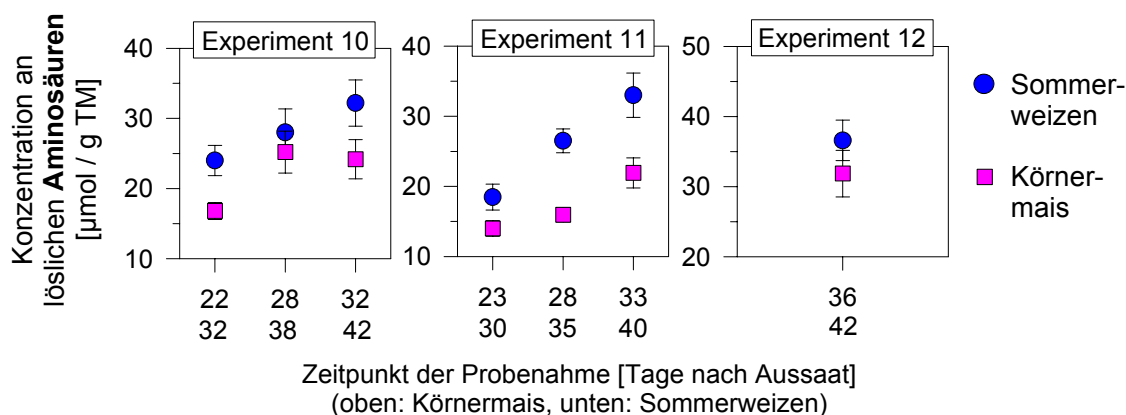


Abb. 47a: Experimente 10-12: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtpross von Sommerweizen und Körnermais

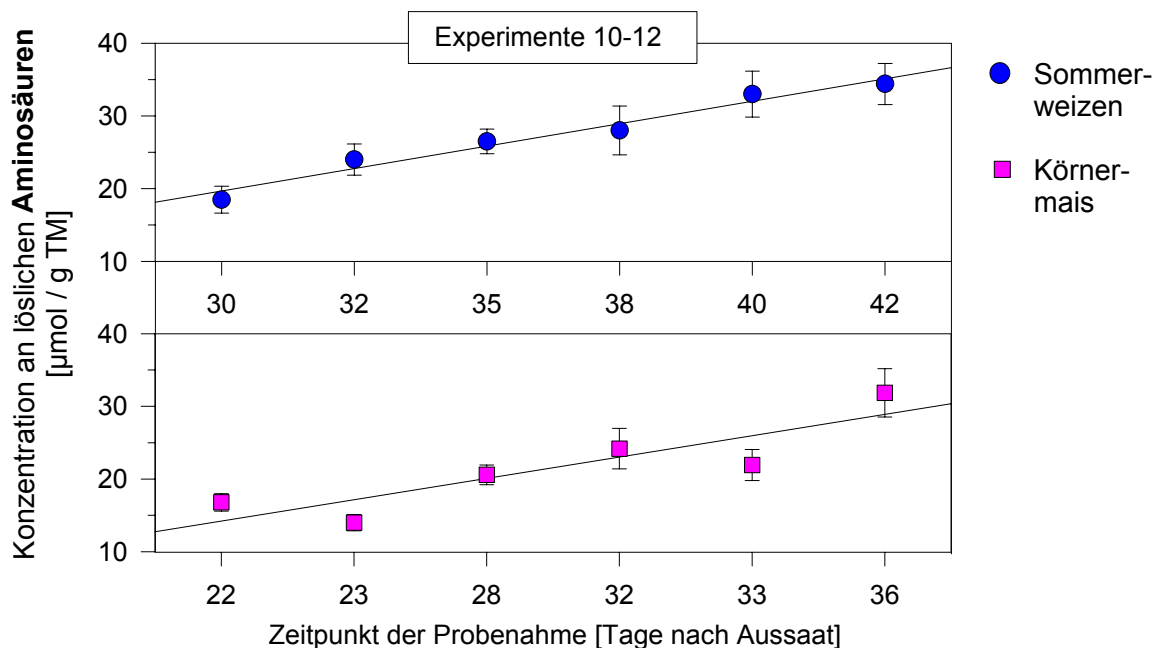


Abb. 47b: Experimente 10-12: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen und Körnermais

3.2.12. Experiment 13: Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei 'offener' und 'abgedeckter' Substratoberfläche

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Der Verlauf der Pflanzenanzucht war bei allen drei Versuchen ähnlich. Nach einer zügigen und gleichmäßigen Keimung des Saatguts folgte nach dem Einsetzen der Keimlinge in die mit Mineralboden gefüllten Versuchsgefäße eine Wachstumsstagnation. Diese anfänglichen Entwicklungsschwierigkeiten der Pflanzen traten unabhängig von den versuchstechnischen Bedingungen auf. Doch zu Beginn der NH_3 -Emissionsmessungen waren die Versuchspflanzen an das Kulturmedium weitgehendst adaptiert. Die weitere vegetative Entwicklung der Pflanzen verlief ohne Auffälligkeiten. Während der NH_3 -Messungen wurden besonders hohe Wachstumsraten verzeichnet, was vermutlich auf die Temperaturerhöhung unter den Hauben zurück zu führen war.

In Abhängigkeit von der Art der Substratoberflächengestaltung traten während der gesamten Versuchsdauer keine visuellen Wachstumsdifferenzen zwischen den Versuchspflanzen auf.

In VERSUCH 1 standen die Pflanzen während der NH_3 -Messungen zwischen *Bestockungs-* und *Schossphase*. Einzelne Pflanzen hatten zu Versuchsende die Phase des *Ährenschiebens* erreicht. Bei den VERSUCHEN 2 und 3 erfolgte die Durchführung der NH_3 -Emissionsmessungen von Beginn der *Bestockung* bis zu Beginn des *Schossens* der Pflanzen.

ERTRÄGE

In Tabelle 45a sind die Erträge und N_t -Konzentrationen der drei Einzelversuche wiedergegeben. Übereinstimmend mit den Wachstumsbeobachtungen der Pflanzen wurden bei der vergleichenden Gegenüberstellung der Trockengewichte keine Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten »offene Substratoberfläche« und »abgedeckte Substratoberfläche« festgestellt. Auch der N_t -Gehalt in der pflanzlichen Trockenmasse zur Zeit der Ernte und die N-Aufnahme der Pflanzen pro Versuchsgefäß lag bei beiden Varianten auf nahezu gleich hohem Niveau.

Damit hatte die "versuchstechnische Gestaltung der Substratoberfläche" keinen Einfluss auf das Wachstum und die Entwicklung der Versuchspflanzen.

Tab. 45a: Experiment 13: **Ertragsbildung** bei Sommerweizen bei »offener« und »abgedeckter« Substratoberfläche

Sommerweizen: Substratoberfläche: 'ABGEDECKT' / 'OFFEN'			Erträge		
			TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
VERSUCH 1	Substrat- oberfläche: 'abgedeckt'	10,08	5,22	0,53	
	oberfläche: 'offen'	10,44	5,35	0,56	
VERSUCH 2	Substrat- oberfläche: 'abgedeckt'	5,26	5,46	0,29	
	oberfläche: 'offen'	5,95	5,37	0,32	
VERSUCH 3	Substrat- oberfläche: 'abgedeckt'	5,26	5,51	0,29	
	oberfläche: 'offen'	5,01	5,40	0,27	

Angegeben sind Mittelwerte

NH₃-EMISSIONEN

Die Höhe der NH₃-Emissionen wurde in den VERSUCHEN 1 und 2 von der Art der Gefäßvariante - »abgedeckte/offene Substratoberfläche« - zunächst wider Erwarten nicht beeinflusst.

So lagen die absoluten NH₃-Freisetzungsverluste bei der Variante »abgedeckte Substratoberfläche« auf gleichem Niveau wie bei der Variante »offene Substratoberfläche«, bei der Gasaustauschprozesse zwischen Boden und oberirdischem Pflanzenbewuchs erfolgen konnten.

Die Verlauf der NH₃-Freisetzung in Bezug auf die Entwicklung (Alter) der Versuchspflanzen entsprach den Ergebnissen aus vorangegangenen Untersuchungen mit Sommerweizen.

Die NH₃-Emissionsergebnisse der VERSUCHE 1 und 2 zeigten, dass aus dem in dieser Untersuchung eingesetzten Kultursubstrat (schluffiger Sandboden) keine NH₃-Ausgasungsverluste stammten. Das erfasste NH₃-N wurde ausschließlich von den Pflanzen emittiert.

Dagegen hatte das »Abdichten« beziehungsweise das »Offenhalten« der Substratoberfläche in VERSUCH 3 klaren Einfluss auf die Höhe der NH₃-Emissionen. Wie in Abbildung 47 (unten) dargestellt, traten bei der Variante »offene Substratoberfläche« gegenüber der Variante »abgedeckte Substratoberfläche« signifikant höhere NH₃-Verluste auf. Damit hatten hier die variantenbedingten Unterschiede bei der "Gestaltung der Substratoberfläche" deutlichen Einfluss auf die Gesamt-NH₃-Emissionsverluste.

Dieses Versuchsergebnis stellt zunächst einen Widerspruch zu den Ergebnissen der beiden vorangestellten Versuchen dar, bei denen keine variantenbedingte Unterschiede in der Höhe der NH₃-Emissionen auftraten. Doch im Unterschied zu den VERSUCHEN 1 und 2, bei denen als Kultursubstrat der »schluffige Sandboden aus Erlangen« zum Einsatz kam, wurde bei VERSUCH 3 der »C-Löss-Oberboden« verwendet. Beide Mineralbodentypen verfügen über völlig unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften (Tab. 4; Tab. 26) mit entsprechend unterschiedlichem Einfluss auf die Ausgasung von NH₃. Für die in VERSUCH 3 bei der Variante »offene Substratoberfläche« erhöhten NH₃-Emissionsverluste waren die spezifischen Eigenschaften des hier verwendeten des »C-Löss-Mineralbodens« verantwortlich. Aus dem Boden stammendes NH₃, das durch mikrobielle, chemische oder physikalische Prozesse gebildet wurde, konnte bei der Variante »offene Substratoberfläche« ungehindert in das Haubeninnere diffundieren und wurde mit dem, von den Pflanzen emittierten NH₃ erfasst. Die hier erhobenen Messwerte beinhalteten sowohl das aus den Pflanzen emittierte, als auch das im Boden gebildete und entwichene NH₃. Dahingegen wurde bei der Variante »abgedeckte Substratoberfläche« ausschließlich das von den Pflanzen emittierte NH₃ erfasst.

Durch Subtrahieren der NH_3 -Messwerte der Variante »abgedeckte Substratoberfläche« von den NH_3 -Messwerten der Variante »offene Substratoberfläche« lässt sich die Menge an NH_3 -N errechnen, die aus dem Boden ausgetreten war. Über den gesamten Messzeitraum von 16 Tagen beliefen sich diese NH_3 -Ausgasungsverluste auf insgesamt 1,67 mg NH_3 -N pro Versuchsgefäß beziehungsweise pro 12 kg Boden.

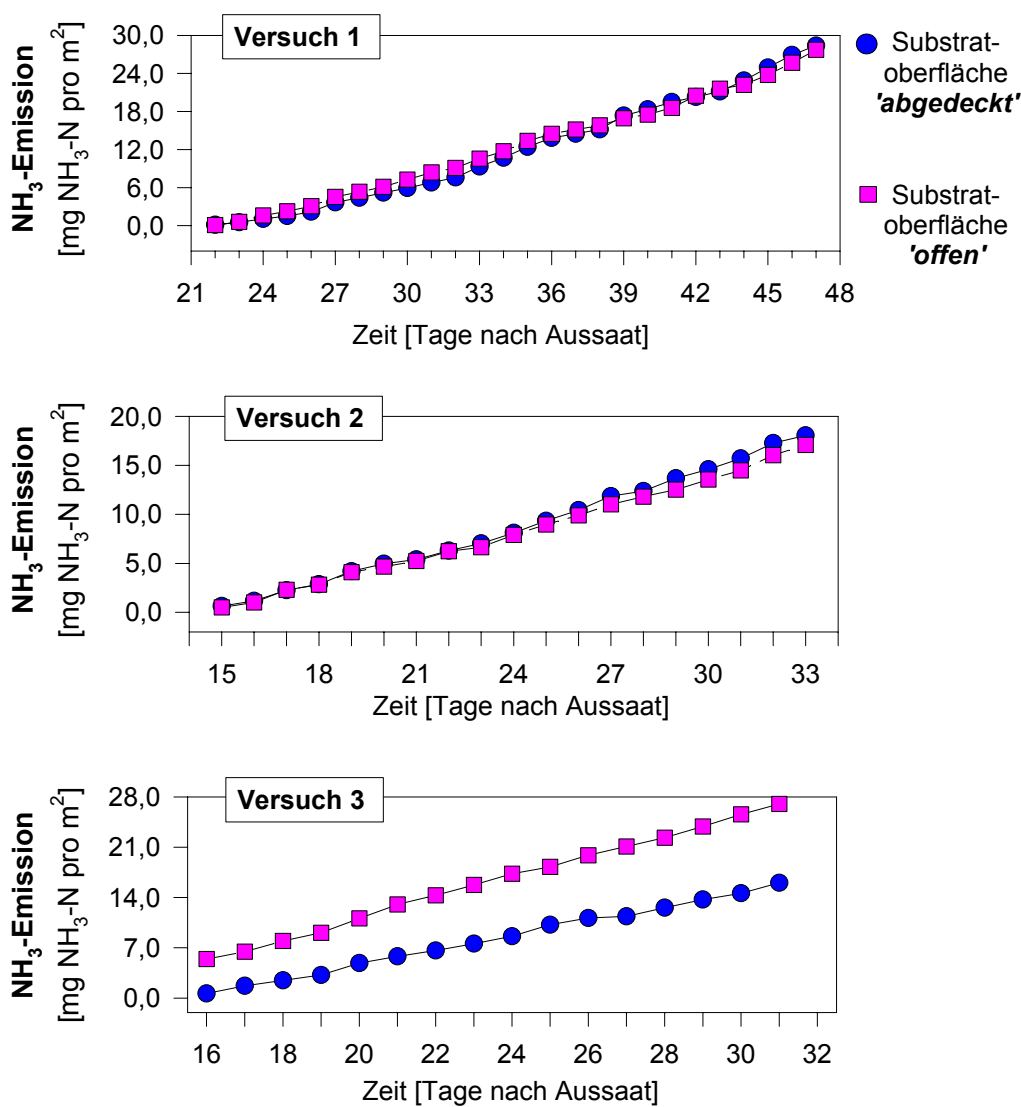


Abb. 47: Experiment 13: Kumulative NH_3 -Emissionen aus Sommerweizen bei 'abgedeckter' und 'offen gehaltener' Substratoberfläche

Tab. 45b: Experiment 13: Höhe der **NH₃-Emissionen** bei Sommerweizen bei »offener« und »abgedeckter« Substratoberfläche

Sommerweizen:			NH ₃ -Emissionen			
Substratoberfläche: 'ABGEDECKT'/'OFFEN'			[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[% d. N _T -Gehaltes zur Ernte]
VERSUCH 1	Substratoberfläche: 'abgedeckt'		1,28 (± 0,08)	28,5 (± 1,91)	0,29 (± 0,02)	0,24 (± 0,02)
	Substratoberfläche: 'offen'		1,25 (± 0,09)	27,8 (± 2,03)	0,28 (± ,002)	0,22 (± 0,02)
VERSUCH 2	Substratoberfläche: 'abgedeckt'		0,83 (± 0,07)	18,5 (± 1,52)	0,19 (± 0,02)	0,28 (± 0,02)
	Substratoberfläche: 'offen'		0,79 (± 0,06)	17,4 (± 1,23)	0,17 (± 0,01)	0,25 (± 0,02)
VERSUCH 3	Substratoberfläche: 'abgedeckt'		0,70 (± 0,05)	15,5 (± 1,13)	0,16 (± 0,01)	0,24 (± 0,02)
	Substratoberfläche: 'offen'		1,21 (± 0,11)	26,8 (± 2,36)	0,27 (± 0,02)	0,47 (± 0,04)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Wie erwartet, lag die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche, deren Bestimmung nach Ablauf der NH₃-Messungen erfolgte, bei allen drei Versuchen unabhängig von 'Gestaltung der Substratoberfläche' auf gleich hohem Niveau.

Gegenüber den VERSUCHEN 2 und 3 konnte bei VERSUCH 1 - mit älterem Pflanzenmaterial - ein Anstieg der Alkalitätskonzentration im pflanzlichen Gewebe verzeichnet werden. Damit trat mit zunehmendem Alter der Pflanzen - von 32/33 auf 46 Tage (Abb. 48, unten) - wie in den vorangegangenen Versuchen eine Erhöhung der Konzentration der Alkalität ein.

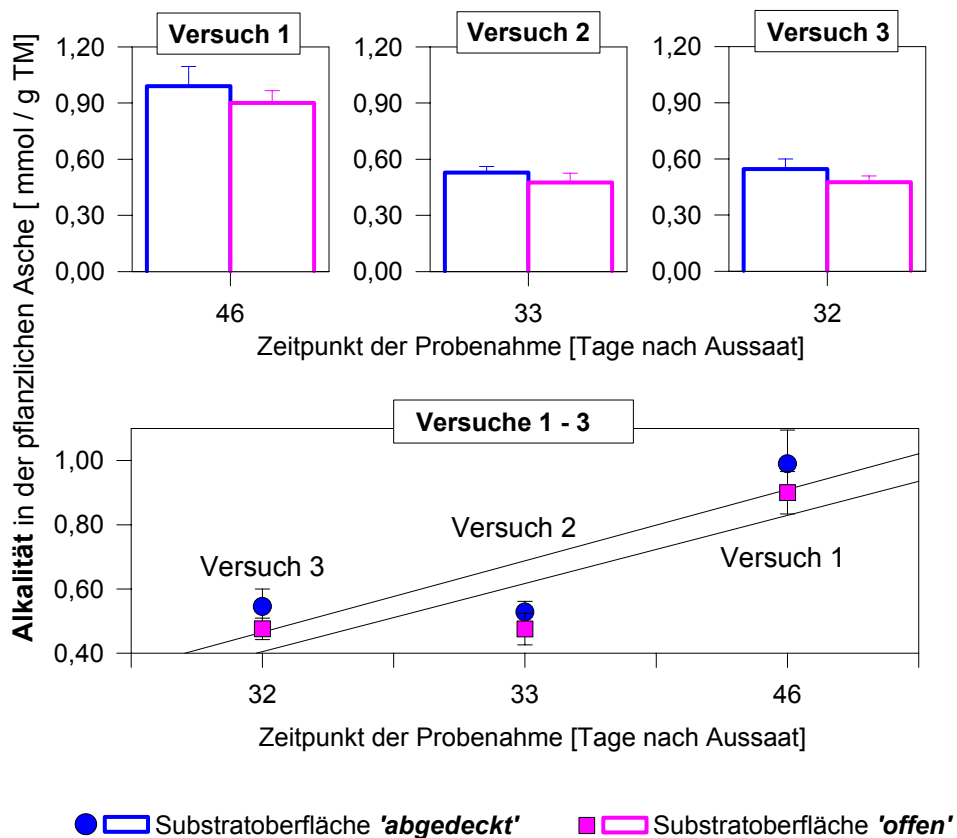


Abb. 48: Experiment 13: Versuche 1-3: Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche bei Sommerweizen zu verschiedenen Beprobungsterminen

FREIES AMMONIUM UND LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Auch die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen und löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe des oberirdischen Gesamtprozesses zu Versuchsende blieb von der 'versuchstechnischen Gestaltung der Substratoberfläche' unbeeinflusst (Abb. 49 und 50).

Ähnlich wie in vorangegangenen Versuchen änderte sich NH_4^+ -Konzentration mit dem Pflanzenalter. Mit zunehmendem Alter der Pflanzen wurde - bei der Gegenüberstellung von VERSUCH 1 und den VERSUCHEN 2 und 3 - eine leichte Erhöhung der Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen festgestellt (Abb. 49 unten). Die Konzentrationen an löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe blieb indessen vom Untersuchungszeitpunkt und folglich vom Alter der Pflanzen unbeeinflusst (Abb. 50 unten).

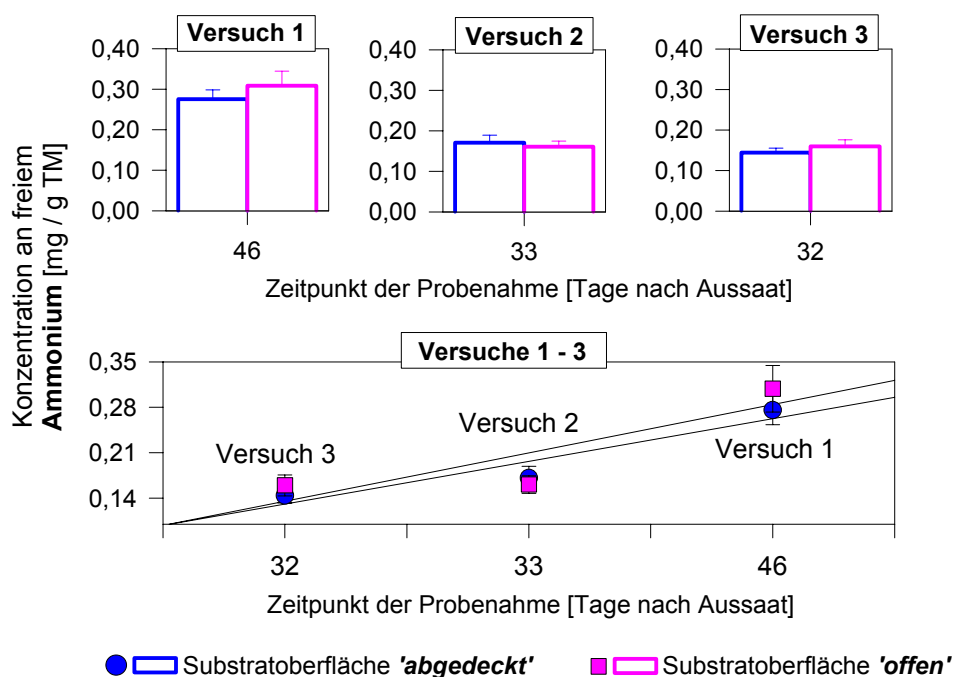


Abb. 49: Experiment 13: Konzentration an freiem Ammonium im oberirdischen Gesamtprozess von Sommerweizen zu verschiedenen Beprobungsterminen

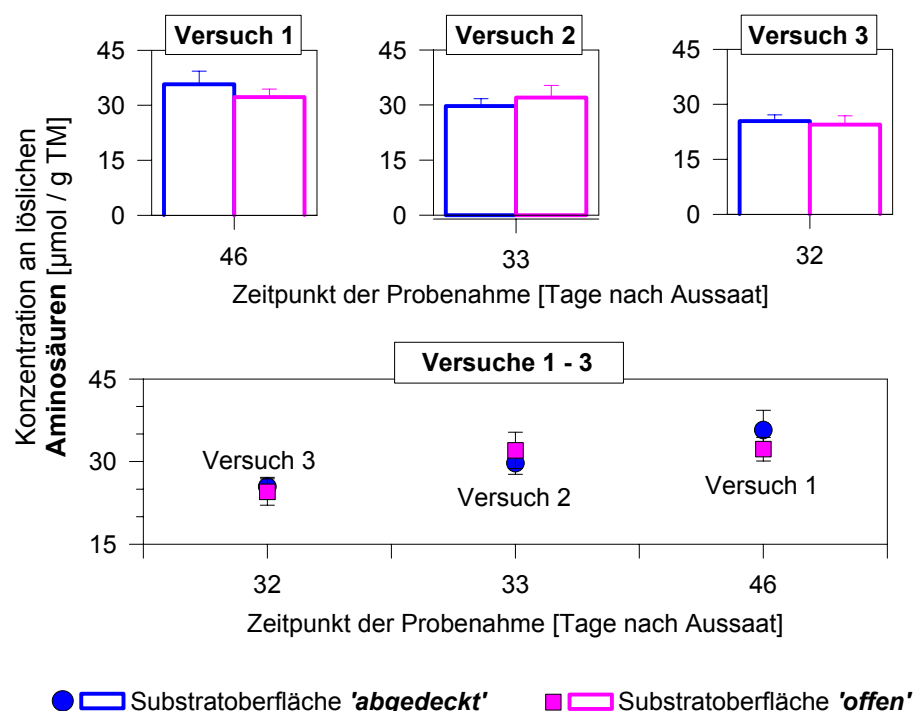


Abb. 50: Experiment 13: Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Gesamtprozess von Sommerweizen zu verschiedenen Beprobungsterminen

3.1.13. Experiment 14: Mineralbodenversuch mit Sommerweizen bei optimaler und bei unzureichender Wasserversorgung

WACHSTUMSBEOBACHTUNGEN

Da die Versuchsdurchführung von Experiment 14 parallel zu Experiment 13 erfolgte, verliefen Keimung und die sich daran anschließende Entwicklung der Versuchspflanzen bis zum Zeitpunkt der Wasserstressbehandlung völlig übereinstimmend. Die entsprechenden Wachstumsbeobachtungen sind in Experiment 13 aufgeführt.

Mit Einstellung der Wasserstresssituation verschlechterte sich das Wachstum der Pflanzen gegenüber der Kontrollvariante mit optimaler Wasserversorgung. So blieben die Zuwachsraten gegenüber den Kontrollpflanzen deutlich zurück. Ferner traten bei unzureichender Wasserversorgung (= Wasserstressvariante) vereinzelt chlorotische Blattaufhellungen auf.

Zu Versuchsende wiesen die Pflanzen der Kontrollvariante gegenüber denen unter Wasserstress kultivierten Pflanzen einen sichtbaren Entwicklungsvorsprung mit entsprechenden Unterschieden in der Wuchshöhe auf.

Zu Beginn der NH_3 -Messungen befanden sich die Pflanzen bei beiden Versuchen in der *Bestockungsphase*. Bereits zu diesem Zeitpunkt waren pflanzliche Wachstumsunterschiede zwischen Wasserstress- und Kontrollvariante gut sichtbar. Nach Ablauf der NH_3 -Messungen standen die Pflanzen in der Phase des *Schossens*. Dabei dauerten die Messungen in VERSUCH 1 eine Woche länger. Dies hatte zur Folge, dass die Wachstumsunterschiede zwischen Wasserstress- und Kontrollvariante noch stärker hervortraten.

ERTRÄGE

Die Wasserversorgung der Versuchspflanzen hatte großen Einfluss auf die Ertragsbildung (TS-Gewichte). Wasserstress führte zu Ertragseinbußen von bis zu 30 % (Tab. 46, VERSUCH 1).

Die N_t -Aufnahme pro Versuchsgefäß wurde durch Wasserstress um 21 % (VERSUCH 1) und um 12 % (VERSUCH 2) reduziert. Trotzdem waren die N_t -Konzentrationen in der pflanzlichen Trockenmasse zu Versuchsende bei den unter Wasserstress kultivierten Pflanzen gegenüber der Kontrollvariante um 14 % (VERSUCH 1) und 18 % (VERSUCH 2) erhöht (Tab. 46).

Tab. 46: Experiment 14: **Ertragsbildung** bei Sommerweizen bei unzureichender und optimaler Wasserversorgung

Sommerweizen: Versuch »H ₂ O-Stress«	Erträge		
	TS [g/Gefäß]	N _t [%]	N _t [g/Gefäß]
VERSUCH 1 · H ₂ O-STRESS	7,97	5,15	0,41
	11,42	4,52	0,52
VERSUCH 2 · H ₂ O-STRESS	4,01	5,37	0,22
	5,43	4,56	0,25

Angegeben sind Mittelwerte

NH₃-EMISSIONEN

Die Höhe der NH_3 -Freisetzung wurde von der Wasserversorgung der Pflanzen deutlich beeinflusst (Abb. 51). Unter Wasserstress emittierten die Pflanzen bei beiden Versuchen 50 % weniger NH_3 als unter optimaler Wasserversorgung. Bei dieser vergleichenden Gegenüberstellung der Gesamt- NH_3 -Emissionen müssen allerdings die Erträge berücksichtigt werden, da unter Wasserstress weniger pflanzliche Biomasse produziert wurde. In Tabelle 47 sind die auf 1 g TS bezogenen NH_3 -Emissionsverluste wiedergegeben. Hier liegen die Unterschiede zwischen Wasserstressvariante und Kontrolle auf deutlich geringerem Niveau. In VERSUCH 1 waren die

NH₃-Emissionsverluste pro 1 g TS unter Wasserstress um 23,5 % und in VERSUCH 2 im 32 % gegenüber der jeweiligen Kontrolle reduziert.

Tab. 47: Experiment 14: **NH₃-Emissionsverluste** bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Wasserversorgung (Haubengefäßversuch)

Sommerweizen:		NH ₃ -EMISSIONEN			
Versuch »H ₂ O-Stress«		[mg/Gefäß]	[mg/m ²]	[kg/ha]	[mg/g TS]
VERSUCH 1	• H ₂ O-STRESS	0,83 (± 0,06)	18,4 (± 1,32)	0,18 (± 0,01)	0,10 (± 7*10 ⁻³)
	• KONTROLLE	1,57 (± 0,10)	34,9 (± 2,27)	0,35 (± 0,02)	0,14 (± 0,01)
VERSUCH 2	• H ₂ O-STRESS	0,52 (± 0,04)	11,5 (± 0,97)	0,11 (± 9*10 ⁻³)	0,13 (± 0,01)
	• KONTROLLE	1,03 (± 0,07)	22,9 (± 1,63)	0,23 (± 0,02)	0,19 (± 0,01)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

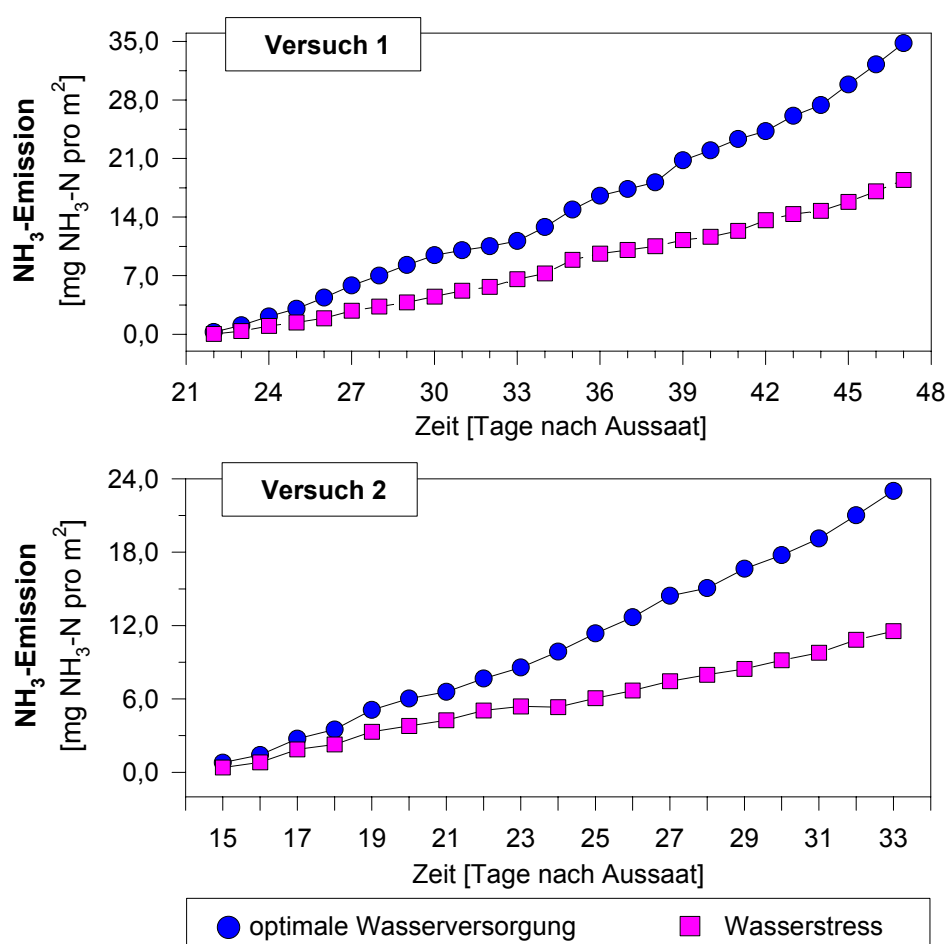


Abb. 51: Experiment 14: Kumulative **NH₃-Emissionen** aus Sommerweizen bei optimaler und unzureichender Wasserversorgung

ALKALITÄT IN DER PFLANZLICHEN ASCHE

Die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche, deren Bestimmung nach Ablauf der NH₃-Messungen erfolgte, blieb von der Wasserversorgung der Pflanzen nahezu unbeeinflusst.

In VERSUCH 1 führte Wasserstress zu einer leichten Erhöhung der Alkalität im oberirdischen Pflanzenspross (Abb. 52). Für dieses Ergebnis war keine statistische Absicherung der Mittelwerte gegeben. In VERSUCH 2 wurden zwischen »Wasserstress- und »Kontrollvariante« keine Unterschiede in der Konzentration der Alkalität festgestellt. Dagegen wurde erneut mit zunehmendem Pflanzenalter - im Zeitraum von 33 bis 46 Tagen nach Aussaat - ein Anstieg der Alkalität in der pflanzlichen Asche verzeichnet (Abb. 52 unten).

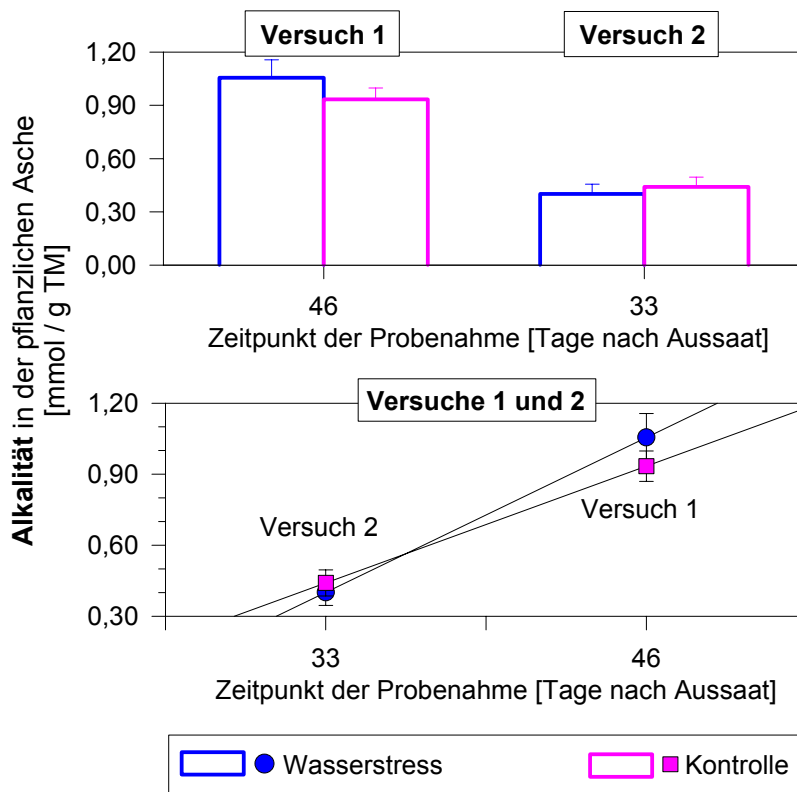


Abb. 52: Experiment 14: Einfluss von Wasserstress auf die Konzentration der **Alkalität** in der pflanzlichen Asche bei Sommerweizen

FREIES AMMONIUM UND LÖSLICHE AMINOSÄUREN

Auf die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen und löslichen Aminosäuren im oberirdischen Sprossgewebe hatte die Wasserversorgung der Pflanzen dagegen deutlichen Einfluss. Die Analysen erfolgten nach Ablauf der NH_3 -Emissionsmessungen, 46 Tage (VERSUCH 1) und 33 Tage (VERSUCH 2) nach Aussaat.

Wasserstress führte zu einer Akkumulation von freien NH_4^+ -Ionen (Abb. 53). In VERSUCH 1 wurden bei den Pflanzen der Wasserstressvariante 52 % und in VERSUCH 2 sogar über 90 % höhere NH_4^+ -Konzentrationen gegenüber den Kontrollpflanzen gemessen.

Ein vergleichbares Ergebnis ergab die Bestimmung der Konzentration an löslichen Aminosäuren im oberirdischen Sprossgewebe. Wasserstress hatte ebenso eine Akkumulation von Aminosäuren zur Folge (Abb. 54). So wurden in VERSUCH 1 im Pflanzenspross der Wasserstressvariante 25 % und in VERSUCH 2 über 80 % höhere Aminosäurekonzentrationen gegenüber der Kontrolle gemessen.

Ferner wurde festgestellt, dass 46 Tage nach Aussaat deutlich höhere Konzentrationen an NH_4^+ -Ionen und löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe vorlagen, als 33 Tage nach Aussaat. Damit bestand erneut eine Beziehung zwischen dem Entwicklungsstadium der Pflanzen und den Konzentrationen an NH_4^+ -Ionen und Aminosäuren.

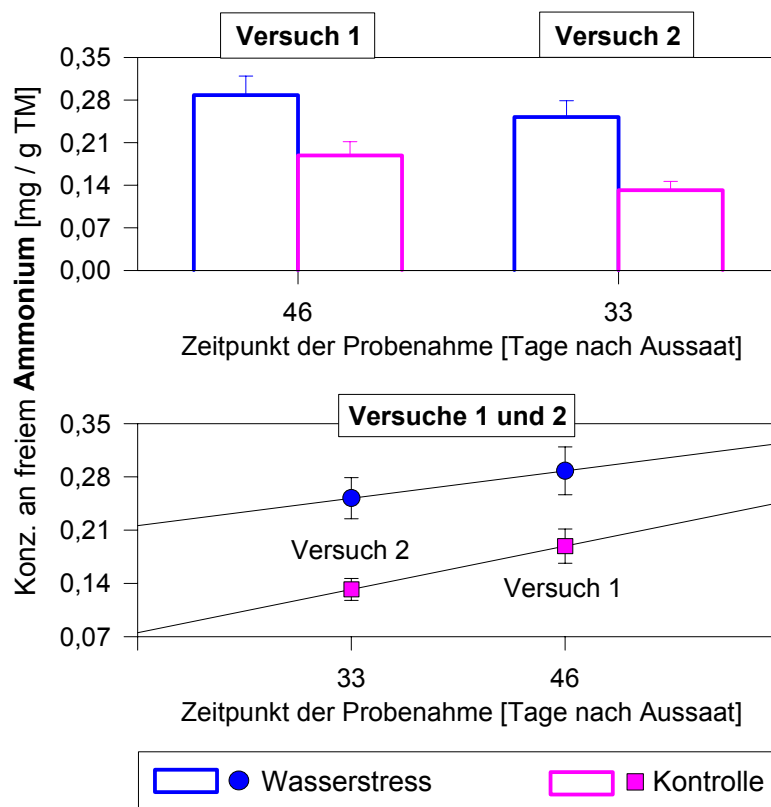


Abb. 53: Experiment 14: Konzentration an **freiem Ammonium** im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen unter Wasserstress

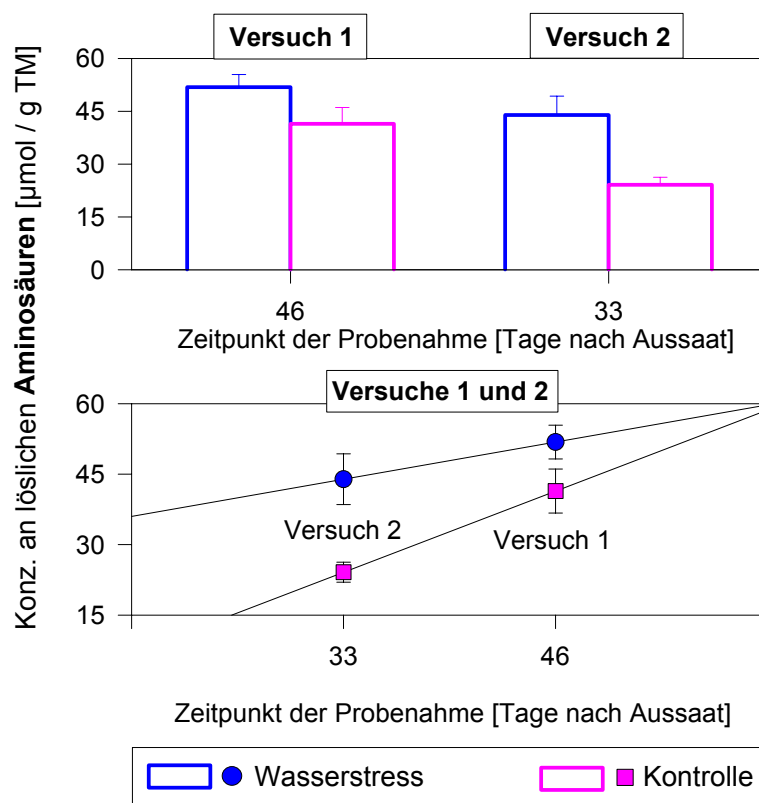


Abb. 54: Experiment 14: Konzentration an **löslichen Aminosäuren** im oberirdischen Gesamtspross von Sommerweizen unter Wasserstress

3.2. Experiment 15: Nährlösungskulturversuch mit Sommerweizen zur Erfassung von N₂O-Veränderungen

Wie in den Abbildungen 55 und 56 dargestellt, wurden innerhalb des Versuchssystems zwischen Pflanzen und der sie umgebenden Atmosphärenluft N₂O-Flüsse gemessen, die allerdings trotz lang anhaltender Akkumulationszeiten insgesamt gesehen auf sehr niedrigem Niveau lagen. Dennoch waren in Abhängigkeit von der über das Nährmedium angebotenen mineralischen N-Form deutliche Unterschiede in Bezug auf die Rate und zum Teil auch auf die Richtung der N₂O-Flüsse zu beobachten. Bei Angebot von NO₃⁻-N wurden bei allen vier Versuchen zu jedem Untersuchungszeitpunkt erhöhte N₂O-Konzentrationen gemessen (Tab. 48), was auf eine Freisetzung von N₂O aus Pflanzen schließen lässt. Dagegen wurden bei Angebot von NH₄⁺-N sowohl erhöhte als auch reduzierte N₂O-Konzentrationen gemessen. Dabei waren die N₂O-Konzentrationserhöhungen hier gegenüber der NO₃⁻-N-Variante deutlich geringer. Das lässt vermuten, dass die Pflanzen bei Angebot von NH₄⁺-N weniger N₂O freisetzen als bei Angebot von NO₃⁻-N. Die zu einigen Untersuchungszeitpunkten beobachtete Konzentrationsabnahme lässt auf eine pflanzliche N₂O-Aufnahme oder -Umsetzung schließen.

Die Messwertschwankungen zwischen, aber auch innerhalb der Versuche, deuten die Sensibilität des N₂O-Nachweises und des gesamten Versuchssystems an. Dennoch spricht die Bestimmung der N₂O-Hintergrundkonzentrationen (Abb. 55 und 56) mit nahezu konstanten Werten für eine hohe Messgenauigkeit der chemischen Analyse am Gaschromatographen. Darüber hinaus zeigte das Gesamtergebnis in Bezug auf die Freisetzung von N₂O trotz der erwähnten Messwertschwankungen signifikante Unterschiede zwischen den NO₃⁻-N und den NH₄⁺-N ernährten Pflanzen.

In den VERSUCHEN 2, 3 und 4, bei denen unmittelbar vor der letzten Untersuchung der pflanzliche Spross entfernt wurde (Dekapitation), trat - im Gegensatz zur vorangegangenen Untersuchung - in allen Fällen eine klare N₂O-Konzentrationserhöhung auf. Dieser Konzentrationsanstieg konnte bei beiden N-Angebotsformen gleichermaßen beobachtet werden.

Über den Einfluss des Entwicklungsstadiums der Pflanzen auf die N₂O-Flüsse zwischen Pflanze und der sie umgebenden Atmosphäre kann aufgrund der hohen Messwertschwankungen zwischen den einzelnen Versuchen keine Aussage gemacht werden. Selbst das Aufzeigen einer Tendenz ist nicht möglich.

In VERSUCH 1 lagen die Messwerte über den Zeitraum der vier Beprobungstermine auf nahezu gleichbleibendem Niveau. Da die Messungen dicht hintereinander - als *zeitlich versetzte* Wiederholungen - erfolgten, wird durch dieses Ergebnis die Zuverlässigkeit des Versuchs- und Messsystems bekräftigt.

Tab. 48 Teil I: Experiment 15: Bestimmung von »**N₂O-Konzentrationsveränderungen zwischen Pflanze und Atmosphäre**« bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der N-Angebotsform und dem Entwicklungsstadium der Pflanzen (Vers. 1-2)

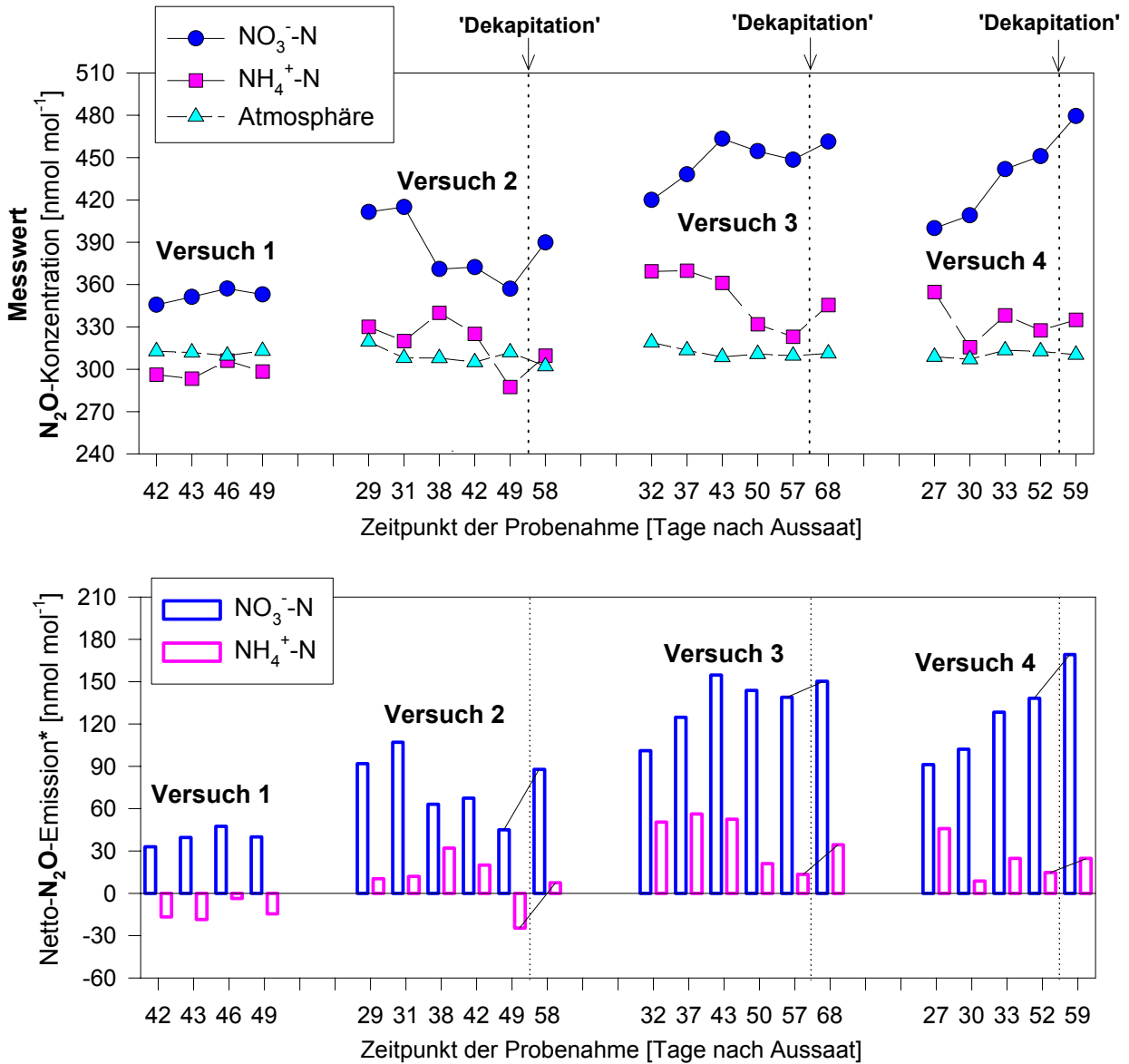
N₂O-Nachweis: Sommerweizen NO ₃ ⁻ -N / NH ₄ ⁺ -N							
	Probe	Probe-	Pflanzen-	Entwicklungs-	Variante	N ₂ O-Konzentration	
	Nr.	nahme	alter	stadium der		Messwert	abzüglich
	[Datum]	[Tage nach		Pflanzen		[nmol mol ⁻¹]	Hintergrund-
		Aussaart]					konzentration
							[nmol mol ⁻¹]
VERSUCH 1 Aussaart: 26.06.97	1	07.08.97	42 - 43	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	345,7 (± 29,4)	32,9 (± 2,9)
					NH ₄ ⁺ -N	296,1 (± 27,5)	-16,7 (± 1,6)
					Atmosphäre	312,8 (± 25,4)	-
	2	08.08.97	43 - 43	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	351,3 (± 36,2)	39,5 (± 3,5)
					NH ₄ ⁺ -N	293,3 (± 25,5)	-18,5 (± 1,5)
					Atmosphäre	311,8 (± 19,9)	-
	3	11.08.97	46 - 47	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	357,2 (± 27,5)	47,5 (± 3,8)
					NH ₄ ⁺ -N	306,1 (± 27,2)	-3,6 (± 0,3)
					Atmosphäre	309,7 (± 15,3)	-
	4	14.08.97	49 - 50	Blatthäutchen-	NO ₃ ⁻ -N	353,0 (± 26,5)	40,0 (± 3,4)
					NH ₄ ⁺ -N	298,4 (± 20,3)	-14,6 (± 1,0)
					Atmosphäre	313,0 (± 17,7)	-
VERSUCH 2 Aussaart: 30.09.97	1	29.10.97	29 - 30	Ende der Be-	NO ₃ ⁻ -N	411,5 (± 32,8)	91,9 (± 7,8)
					NH ₄ ⁺ -N	330,0 (± 29,7)	10,4 (± 1,0)
					Atmosphäre	319,6 (± 16,8)	-
	2	31.10.97	31 - 32	Ende der Be-	NO ₃ ⁻ -N	415,0 (± 38,2)	107,0 (± 9,9)
					NH ₄ ⁺ -N	320,0 (± 26,9)	12,0 (± 1,1)
					Atmosphäre	308,0 (± 14,8)	-
	3	03.11.97	38 - 39	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	371,0 (± 26,7)	63,1 (± 4,8)
					NH ₄ ⁺ -N	340,0 (± 29,9)	32,1 (± 2,9)
					Atmosphäre	307,9 (± 13,3)	-
	4	11.11.97	42 - 43	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	372,4 (± 28,6)	67,4 (± 5,1)
					NH ₄ ⁺ -N	325,0 (± 27,0)	20,0 (± 1,7)
					Atmosphäre	305,0 (± 15,1)	-
	5	18.11.97	49 - 50	Blatthäutchen-	NO ₃ ⁻ -N	357,0 (± 24,3)	45,0 (± 3,1)
					NH ₄ ⁺ -N	287,4 (± 21,2)	-24,6 (± 1,9)
					Atmosphäre	312,0 (± 16,1)	-
	6	27.11.97	58 - 59	Beginn des	NO ₃ ⁻ -N	389,9 (± 35,0)	87,8 (± 7,8)
					NH ₄ ⁺ -N	309,6 (± 23,5)	7,5 (± 0,6)
					Atmosphäre	302,1 (± 13,3)	-

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

Tab. 48 Teil I: Experiment 15: Bestimmung von »N₂O-Konzentrationsveränderungen zwischen Pflanze und Atmosphäre« bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der N-Angebotsform und dem Entwicklungsstadium der Pflanzen (Vers. 3-4)

N₂O-Nachweis: Sommerweizen NO₃⁻-N / NH₄⁺-N							
	Probe	Probe-	Pflanzen-	Entwicklungs-	Variante	N ₂ O-Konzentration	
	Nr.	nahme	alter	stadium der		Messwert	abzüglich
	[Datum]	[Tage nach		Pflanzen		[nmol mol ⁻¹]	Hintergrund-
		Aussaart]					konzentration
							[nmol mol ⁻¹]
VERSUCH 3 Aussaart: 16.12.97	1	18.01.98	32 - 33	Beginn des Schossens	NO ₃ ⁻ -N	420,02 (± 32,3)	101,10 (± 7,9)
					NH ₄ ⁺ -N	369,41 (± 32,5)	50,50 (± 4,4)
					Atmosphäre	318,91 (± 18,9)	-
	2	23.01.98	37 - 38	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	438,19 (± 30,2)	124,70 (± 8,9)
					NH ₄ ⁺ -N	369,79 (± 30,2)	56,30 (± 4,7)
					Atmosphäre	313,49 (± 17,1)	-
	3	29.01.98	43 - 44	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	463,40 (± 42,6)	154,73 (± 14,4)
					NH ₄ ⁺ -N	361,15 (± 29,9)	52,48 (± 4,3)
					Atmosphäre	308,67 (± 16,2)	-
	4	05.02..98	50 - 51	Blatthäutchen-Stadium	NO ₃ ⁻ -N	454,55 (± 31,8)	143,78 (± 12,0)
					NH ₄ ⁺ -N	331,81 (± 29,8)	21,04 (± 1,9)
					Atmosphäre	310,77 (± 15,9)	-
	5	12.02.98	57 - 58	Beginn des Ähren-schiebens	NO ₃ ⁻ -N	548,54 (± 41,1)	138,98 (± 11,0)
					NH ₄ ⁺ -N	322,98 (± 26,4)	13,42 (± 1,1)
					Atmosphäre	309,56 (± 16,6)	-
	6	23.02.98	68 - 69	Blüte	NO ₃ ⁻ -N	461,35 (± 31,3)	150,24 (± 11,8)
					NH ₄ ⁺ -N	345,48 (± 26,6)	34,37 (± 2,8)
					Atmosphäre	311,11 (± 15,1)	-
VERSUCH 4 Aussaart: 27.03.98	1	23.04.98	27 - 28	Ende der Bestockung	NO ₃ ⁻ -N	400,00 (± 33,2)	91,18 (± 7,4)
					NH ₄ ⁺ -N	354,73 (± 25,9)	45,91 (± 3,5)
					Atmosphäre	308,82 (± 14,2)	-
	2	26.04.98	30 - 31	Ende der Bestockung / Schossbeginn	NO ₃ ⁻ -N	409,13 (± 36,0)	102,13 (± 9,3)
					NH ₄ ⁺ -N	315,64 (± 21,4)	8,64 (± 0,6)
					Atmosphäre	307,00 (± 18,1)	-
	3	29.04.98	33 - 34	Schossphase	NO ₃ ⁻ -N	441,86 (± 40,6)	128,43 (± 12,1)
					NH ₄ ⁺ -N	338,19 (± 24,3)	24,76 (± 1,9)
					Atmosphäre	313,43 (± 16,6)	-
	4	18.05.98	52 - 53	Blatthäutchen-stadium	NO ₃ ⁻ -N	451,01 (± 36,1)	138,29 (± 11,9)
					NH ₄ ⁺ -N	327,49 (± 24,9)	14,77 (± 1,1)
					Atmosphäre	312,72 (± 14,8)	-
	5	25.05.98	59 - 60	Ährenschieben	NO ₃ ⁻ -N	479,50 (± 33,1)	169,19 (± 12,2)
					NH ₄ ⁺ -N	335,00 (± 28,5)	24,69 (± 2,0)
					Atmosphäre	310,31 (± 17,7)	-

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung



* Messwert abzüglich der Hintergrundkonzentration

Abb. 55: Experiment 15, Versuche 1-4: N₂O-Flüsse zwischen Versuchspflanzen und Umgebungsluft, oben: Messwert, unten: Netto-N₂O-Emission (Messwert abzüglich Hintergrundkonzentration)

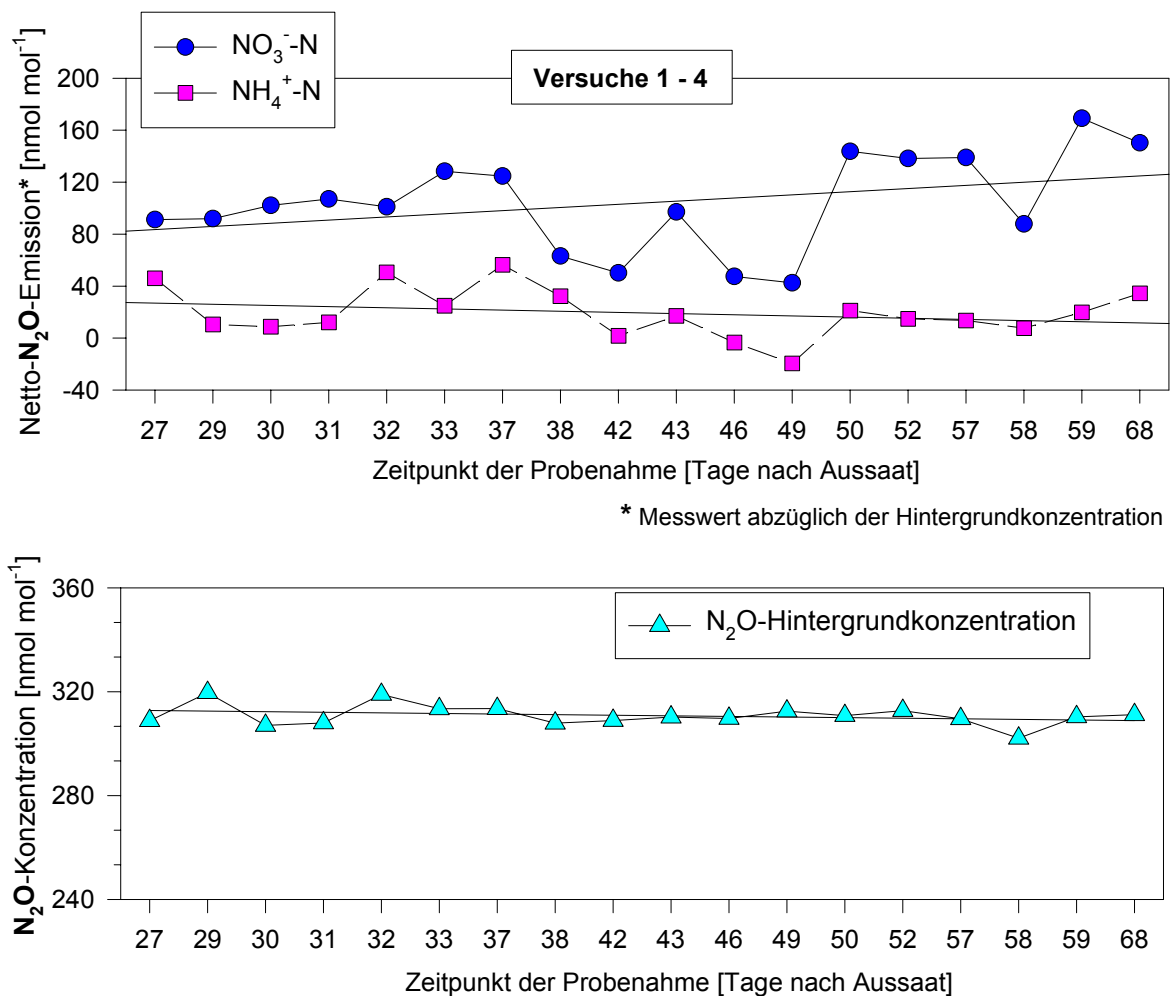


Abb. 56: Experiment 15, Versuche 1-4 zusammengefasst: oben: **Netto-N₂O-Emissionen** (Messwert abzüglich Hintergrundkonzentration) in Abhängigkeit von dem Alter der Versuchspflanzen, unten: Hintergrundkonzentration während der Beprobungstermine

ERTRÄGE

Den Wachstumsbeobachtungen entsprechend wurde die Ertragsleistung der Versuchspflanzen von der N-Versorgungsform beeinflusst. Bei Angebot von NO₃⁻-N erzielten die Pflanzen bis zu 19 % höhere Frisch- und bis zu 12 % höhere Trockengewichte gegenüber dem Angebot von NH₄⁺-N.

Die N_t-Aufnahme der Pflanzen pro Versuchsgefäß war bei Angebot von NO₃⁻-N gegenüber dem Angebot von NH₄⁺-N leicht erhöht (8 % [VERSUCH 3] bis 22 % [VERSUCH 1]). In Bezug auf die N_t-Konzentrationen in der pflanzlichen Trockenmasse zu Versuchsende zeigten die Pflanzen in VERSUCH 1 bei NH₄⁺-N-Ernährung ein leichtes Minus von knapp 10 % gegenüber NO₃⁻-N-Ernährung. In den übrigen Versuchen konnten keine signifikanten N-Konzentrationsunterschiede festgestellt werden (Tab. 49 Teil 1).

Um sicherzustellen, dass die beobachteten Unterschiede der N₂O-Freisetzung zwischen NO₃⁻- und NH₄⁺-N-Variante nicht auf eventuelle Wachstumsunterschiede zurückzuführen waren, wurde die Ertragsbildung ausgewertet und in Beziehung zu den gemessenen N₂O-Konzentrationsveränderungen gesetzt (Tab. 49 Teil 2). Dabei konnte ein Variantenvergleich nur innerhalb eines Versuches erfolgen. Die verschiedenen Versuche waren untereinander nicht vergleichbar, da es keine direkten Parallelen in Bezug auf den Zeitpunkt der Versuchsdurchführung (N₂O-Messungen) gab.

Tab. 49: Experiment 15: Teil 1: **Ertragsbildung** von Sommerweizen bei Angebot von NO_3^- - und NH_4^+ -Stickstoff

Sommerweizen in Nährlösung: NO_3^- -N / NH_4^+ -N		Pflanzenalter [d]	Erträge		
			TS [g/Gefäß]	N_t [%]	N_t [g/Gefäß]
Versuch 1	NO_3^- -N	50	12,07 ($\pm 0,7$)	4,75 ($\pm 0,32$)	0,57
	NH_4^+ -N		10,81 ($\pm 0,8$)	4,34 ($\pm 0,30$)	0,47
Versuch 2	NO_3^- -N	59	18,17 ($\pm 1,2$)	4,55 ($\pm 0,36$)	0,83
	NH_4^+ -N		15,91 ($\pm 1,1$)	4,58 ($\pm 0,33$)	0,73
Versuch 3	NO_3^- -N	69	26,61 ($\pm 1,8$)	3,97 ($\pm 0,23$)	1,06
	NH_4^+ -N		24,45 ($\pm 1,6$)	4,04 ($\pm 0,25$)	0,99
Versuch 4	NO_3^- -N	60	18,53 ($\pm 1,1$)	4,46 ($\pm 0,28$)	0,83
	NH_4^+ -N		16,62 ($\pm 1,2$)	4,33 ($\pm 0,30$)	0,72

Tab. 49: Experiment 15: Teil 2: **N_2O -Freisetzung** aus Sommerweizen bei Angebot von NO_3^- - und NH_4^+ -Stickstoff

Sommerweizen in Nährlösung: NO_3^- -N / NH_4^+ -N		Pflanzenalter [d]	N_2O -Emissionen		
			Messwert* [nmol mol^{-1}]	N_2O -Messwert pro g TS oder pro g N_t [$\text{nmol mol}^{-1} \text{ g TS}^{-1}$] [$\text{nmol mol}^{-1} \text{ g } N_t^{-1}$]	
Versuch 1	NO_3^- -N	50	40,00	3,31	69,78
	NH_4^+ -N		-14,60	-1,35	-31,13
Versuch 2	NO_3^- -N	59	87,80	4,83	106,18
	NH_4^+ -N		7,50	0,47	10,29
Versuch 3	NO_3^- -N	69	150,24	5,65	142,24
	NH_4^+ -N		34,37	1,41	34,80
Versuch 4	NO_3^- -N	60	169,19	9,13	204,76
	NH_4^+ -N		24,69	1,49	34,32

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung; *Mittelwert des Messwertes der letzten Messung abzüglich der Hintergrundkonzentration (vgl. Tab. 48, letzte Spalte)

Es konnte deutlich gezeigt werden, dass die Versorgung mit NO_3^- -N die N_2O -Freisetzung gegenüber der Versorgung mit NH_4^+ -N begünstigte. Ein in Bezug auf die N-Angebotsform ernährungsbedingter Wachstumseffekt lag nicht vor. Das ergaben die Ergebnisse unter Berücksichtigung der TS-Gewichte und des N_t -Gehaltes (= N-Aufnahme) der Pflanzen (Tab. 49, 2. Teil, letzte und vorletzte Spalte).

4. DISKUSSION

4.1. BEITRAG DER PFLANZENEMISSIONEN AN DEN GESAMTEMISSIONEN (NH₃)

Wie in der Einleitung beschrieben, existieren in der Literatur in Bezug auf die exakte Quantifizierung des von Pflanzen emittierten NH₃ unterschiedliche Angaben. So variieren die erfassten NH₃-Emissionsverluste verschiedener Arbeiten oft um ein Vielfaches. Die Ursachen für die Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der direkten, aerodynamischen Messmethoden (Windtunnel, IHF, Passive Sammler, Denuder) und der indirekten, ¹⁵N-Bilanzierungsmethode (Mannheim, 1996), sind unklar. Es bleibt gleichermaßen offen, welche der verwendeten Messmethoden die realen NH₃-Emissionen aus Pflanzen wiedergeben. Während bei den aerodynamischen Messmethoden NH₃ direkt erfasst wird, erfolgt die NH₃-N-Verlusterfassung bei der ¹⁵N-Bilanzierungsmethode indirekt über die Wiederfindungs- und Verdünnungsrate des eingesetzten markierten Dünger-N. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Menge des nicht wiedergefundenen ¹⁵N vollständig der NH₃-Abgabe aus Pflanzen entspricht. Autoren, die diese Methode anwendeten, schließen andere N-Verluste durch Auswaschung, Leaching und Denitrifikation aus. Die über die ¹⁵N-Bilanzierungsmethode errechneten beziehungsweise geschätzten NH₃-Emissionsverluste liegen auf sehr hohem Niveau. In Untersuchungen von Bertelsen und Jensen (1992) betragen die durch eine ¹⁵N-Bilanzierung ermittelten NH₃-Emissionen bei Erbse bis zu 53 kg NH₃-N ha⁻¹. In Versuchen von Francis et al. (1993) emittierten Maispflanzen sogar bis zu 81 kg NH₃-N pro Hektar und Vegetationszeit. Nur bei Schjoerring et al. (1993a) stimmten die Ergebnisse der NH₃-Emissionen bei direkter und indirekter Bestimmung annähernd überein. So wurden hier bei Gerste mit Hilfe der IHF- und der ¹⁵N-Bilanzierungsmethode Gesamt-NH₃-Emissionsverluste von 0,5-1,5 kg ha⁻¹ erfasst. Bei der IHF-Methode (INTEGRATED HORIZONTAL FLUX-METHOD) wird der NH₃-Konzentrationsgradient über der Versuchsfläche bestimmt. Der NH₃-Flux wird aus dem Produkt aus der Windgeschwindigkeit und der NH₃-Konzentration in unterschiedlichen Lufthorizonten errechnet. Die Anwendung dieser Methode findet im Freiland statt. Braschkat (1996) prüfte die Übereinstimmung dieser Methode mit der Windtunnelmethode und fand eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse beider Messeinrichtungen.

In der eigenen Arbeit wurden die Untersuchungen zur Erfassung der NH₃-Freisetzung aus Pflanzen entweder mit dem Windtunnelsystem oder unter Einsatz der Haubengefäßmethode durchgeführt. Eine vergleichende Gegenüberstellung beider Messmethoden war nicht vorgesehen. Demzufolge erfolgten auch keine Parallelversuche. Das Überprüfen einzelner Versuchsergebnisse wurde als ausreichend erachtet. Ein retrospektiver Vergleich der Ergebnisse beider Methoden ist nur bedingt und unter Vorbehalt möglich. So bleibt zu berücksichtigen, dass kein identisches Pflanzenmaterial - in Bezug auf Anzucht und Alter - zeitgleich im Windtunnel und in den Haubengefäßen eingesetzt wurde, die Zeitdauer der Untersuchungen nie exakt die gleiche Länge aufwies und darüber hinaus auch die Jahreszeit während der Versuchsdurchführung oft nicht übereinstimmte. Dennoch zeigten die Messergebnisse der Versuche, bei denen sowohl die Windtunnel- als auch die Haubengefäßmethode zum Einsatz kamen, eine akzeptable Übereinstimmung. Zum Beispiel in Experiment 4 und 5 (Abb. 14, 18, 23, 27). In Tabelle 50 wurden für eine nachträgliche vergleichende Gegenüberstellung von Windtunnel- und Haubengefäßmethode die Messergebnisse der NH₃-Emissionsverluste aus Pflanzen - bezogen auf die Fläche von einem Hektar - aus verschiedenen Versuchen zusammengestellt.

Der Grund für die hohe Übereinstimmung beider Messmethoden war nicht zuletzt die von vornherein angeordnete Zielsetzung, gleiche Versuchsbedingungen zu schaffen. Das betraf insbesondere die exakte Berechnung der Anzahl an Versuchspflanzen pro Versuchsgefäß in Bezug auf das Volumen der Hauben- bzw. Windtunnelabdeckung. Auch die Luftaus-

tauschrate im Messbereich musste bei beiden Methoden übereinstimmen. Mit Hilfe von Schwebekörper-Durchflussmessgeräten (Flowmeter, Fa. Fischer & Porter) konnte die Zu- und Abluft genau eingestellt und kontrolliert werden. Die Wahl des Materialeinsatzes für die Herstellung der Haubengefäße erfolgte in Anlehnung an die schon länger existierende Windtunnelanlage. Die Haubengefäßmethode mit deutlich vereinfachter Technik konnte somit als Ergänzung zum Windtunnelsystem eingesetzt werden.

Tab. 50: Gegenüberstellung der unter Einsatz des Windtunnels und der Haubengefäße erhobenen NH_3 -Emissionsmesswerte aus Sommerweizen (Exp. 4 und 5)

Experiment 4: Sommerweizen		Pflanzenalter zu Beginn der Messungen	Messdauer [d]	NH_3-Emissionen [kg/ha]
Varianten: NO_3^- -N / NO_4^+ -N				
WINDTUNNEL- Versuch (2)	NO_3^- -N	7 Wochen	7	0,05 ($\pm 4,7 \cdot 10^{-3}$)
	NH_4^+ -N			0,34 ($\pm 0,032$)
HAUBENGEFÄß- Versuch (3)	NO_3^- -N	4 Wochen	7	0,03 ($\pm 2,2 \cdot 10^{-3}$)
	NH_4^+ -N			0,18 ($\pm 0,012$)
Experiment 5: Sommerweizen		Pflanzenalter zu Beginn der Messungen	Messdauer [d]	NH_3-Emissionen [kg/ha]
Varianten: chloridische / sulfatische Ernährung				
WINDTUNNEL- Versuch (2)	chloridisch	3,5 Wochen	18	0,37 ($\pm 0,03$)
	sulfatisch			0,13 ($\pm 0,01$)
WINDTUNNEL- Versuch (4)	chloridisch	3 Wochen	14	0,32 ($\pm 0,03$)
	sulfatisch			0,19 ($\pm 0,02$)
HAUBENGEFÄß- Versuch (3)	chloridisch	3 Wochen	17	0,32 ($\pm 0,03$)
	sulfatisch			0,18 ($\pm 0,01$)

Angegeben sind Mittelwerte, in Klammern die Standardabweichung

N-BILANZIERUNGSVERSUCH

Die N-Bilanzierung (Kap. 3.1.1., Exp. 1) ergab, dass der Verbleib von etwa einem Zehntel (10,3-12,3 %) des über die Düngung verabreichten Stickstoffs (N-Input) nicht geklärt werden konnte (Tab. 31, Abb. 6). Da aus analyse- und messtechnischen Gründen kein markiertes ^{15}N verwendet wurde, musste der gesamte im Versuchssystem eingesetzte Stickstoff exakt erfasst werden. Werden N-Verlustquellen jeglicher Art im Versuchssystem ausgeschlossen, müssten den Ergebnissen der N-Bilanzierung zufolge rund zehn Prozent des eingesetzten Düngerstoffs von den Pflanzen in Form von NH_3 emittiert worden sein. Damit wären im ungünstigsten Fall je nach N-Versorgungsgrad der Pflanzen rund 32, 75 und 96 kg NH_3 -N pro Hektar entsprechend den Varianten N1, N2 und N3 freigesetzt worden (Tab. 51).

Da es sich bei der Durchführung der Untersuchungen ausschließlich um Gefäßversuche handelte, bei welchen ein deutlich höherer Düngeraufwand als im Freiland betrieben wird, ist das Umrechnen und Übertragen der Ergebnisse auf eine Versuchsfläche von einem Hektar im Grunde nicht üblich. Die Gegenüberstellung der eigenen Daten mit denen aus der Literatur setzt aber eine entsprechende Vergleichsbasis voraus. Daher musste in diesem Fall eine Flächenberechnung auf Hektarbasis erfolgen.

So zeigten die Ergebnisse des Bilanzierungsversuches mit extrem hoher 'N-Freisetzung' in der Tendenz eine Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen von Bertelsen & Jensen (1992) und Francis et al. (1993).

Tab. 51: Experiment 1: Gegenüberstellung von Saldo und gemessenen NH₃-Emissionsverlusten im Bilanzierungsversuch (Sommerweizen in Quarzsandkultur)

	Saldo		absolute NH ₃ -Emissionen (gemessen) [kg/ha]	NH ₃ -Emissionen in Prozent des Saldos [%]
	[g/Gefäß]	[kg/ha]		
N1	0,18	32,3	1,3	4,02
N2	0,43	75,4	2,0	2,65
N3	0,54	95,6	2,3	2,40

Angegeben sind Mittelwerte

Die durch direkte Messung im Windtunnel erhobenen NH₃-Emissionsverluste lagen jedoch auf deutlich geringerem Niveau. Sie betrug maximal 4 Prozent des als Saldo deklarierten, nicht wiedergefundenen Stickstoffs (Tab. 51). Es liegt die Vermutung nahe, dass nur die Menge an NH₃ aus Pflanzen freigesetzt wurde, die durch direkte Messung erfasst worden war. Messtechnische Fehler der Windtunnelanlage werden ausgeschlossen, da die Anlage vor Beginn der Untersuchungen auf ihre Messgenauigkeit hin überprüft beziehungsweise kalibriert wurde. Dabei wurde eine NH₃-Quelle, die durch eine Gasmischstation simuliert wurde, innerhalb des Windtunnels installiert. Die Wiederfindungsraten des eingeleiteten NH₃ streuten zwischen 89 und 94 %. Der Mittelwert der Wiederfindungsraten aller Messungen - von fünf Versuchen mit jeweils zwei Wiederholungen - betrug 93 % bei einer Standardabweichung von 6 %.

Damit wurde eine geringere Wiederfindungsrate verzeichnet als bei Braschkat (1996) und Mannheim (1996), in deren Arbeit die durchschnittliche Wiederfindungsrate bei 101,9 % lag. Das Ergebnis aus der eigenen Arbeit liegt im Toleranzbereich und wurde bei der Auswertung der Versuchsdaten entsprechend berücksichtigt.

Bei der Bewertung der über die N-Bilanzierung errechneten NH₃-Emissionsverluste in der eigenen Arbeit muss an dieser Stelle noch einmal auf das Ausmaß der versuchstechnischen Arbeitsschritte und chemischen Analysen hingewiesen werden. Das über die gesamte Versuchsperiode aufgefangene Sickerwasser musste quantitativ erfasst und für die Analyse in mehreren Schritten verdünnt werden. Das Sandgemisch wurde zu Versuchsende mit entionisiertem Wasser in mehrfacher Wiederholung durchgespült, um den darin noch enthaltenen Reststickstoff zu gewinnen. Das dabei angefallene Wasser musste ebenfalls exakt quantitativ erfasst und analysiert werden. Interessanterweise liegt der Saldo bei allen drei N-Versorgungsvarianten auf vergleichbarem, statistisch abgesichertem Niveau. Dieses Ergebnis spricht für eine überaus präzise Analyse und schränkt damit die Wahrscheinlichkeit eines eventuellen Bilanzierungsfehlers stark ein. Trotzdem wird angenommen, dass die als Saldo errechneten N-Verluste nicht der Menge des von den Pflanzen emittierten NH₃-N entsprechen.

Wie eingangs erwähnt, bestimmt die Tierhaltung im Wesentlichen das Gesamtausmaß der NH₃-Emissionen (Buijsman et al., 1987). Dabei spielt neben der Gewinnung und Lagerung vor allem die Ausbringung von Flüssig- und Festmist eine entscheidende Rolle (Isermann, 1990). Bei der Ausbringung von wirtschaftseigenen Düngern können NH₃-Emissionen von bis zu 40 kg NH₃-N ha⁻¹ auftreten (Mannheim, 1996).

Die in Experiment 1 bei der Bilanzierung als Saldo ermittelten N-Verluste erreichten sogar eine Höhe von umgerechnet mehr als 95 kg NH₃-N ha⁻¹ (Tab. 51). Die Gegenüberstellung dieses Ergebnisses mit den Untersuchungsergebnissen von Mannheim (1996) über NH₃-Emissionen aus tierischen Exkrementen nach Ausbringung macht deutlich, dass die Annahme, die bei der N-Bilanzierung erhobenen N-Verluste wären von den Pflanzen in Form von NH₃-N emittiert worden, nicht realistisch sein kann. Die Größenordnung der mit der Windtunnelmethode direkt erfassten NH₃-Emissionsverluste wird dagegen als sehr realistisch

eingestuft. Darüber hinaus gibt es eine hohe Übereinstimmung mit den NH_3 -Emissionsergebnissen aus anderen Arbeiten, deren Erhebung ebenfalls über direkte Messungen erfolgte (Schjoerring et al., 1992; Schjoerring et al., 1993a; Mannheim, 1996). Damit dürfte die Frage nach der sachgerechten Methode zur Erfassung der NH_3 -Emissionsverluste aus Pflanzen nahezu beantwortet sein.

Die Schwierigkeiten in Bezug auf die Interpretation der Bilanzierungsergebnisse in Experiment 1 lassen das Vorkommen weiterer N-Verluste innerhalb des Versuchssystems vermuten. Neben dem Substrat steht auch die Pflanze als mögliche Quelle weiterer gasförmiger N-Verbindungen zur Diskussion.

N-Verluste aus dem Kultursubstrat (Nährmedium) entstehen durch Denitrifikations- und Nitrifikationsprozesse - gasförmig in Form von N_2 , N_2O und NO_x (Firestone & Davidson, 1989) - oder durch Auswaschung (Leaching) in Form von Nitrat (NO_3^-) (Amberger, 1988). Dieser Art von N-Verlusten wurde aber durch die verschiedenen, bereits ausführlich beschriebenen Maßnahmen, wie zum Beispiel dem Einsatz von Quarzsand, dem geregelten Nährlösungskreislauf sowie dem mehrfach wiederholten Austrag der Sickerlösung, entgegengewirkt. Daher gelten diese Verlustquellen als nahezu ausgeschlossen.

In Experiment 13 wurde der Einfluss der spezifischen bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften des eingesetzten Mineralbodens auf die Entstehung und Freisetzung von NH_3 untersucht. Darüber hinaus wurden die versuchstechnischen Maßnahmen, die zur Verhinderung des Entweichens von bodenbürtigem NH_3 eingesetzt worden waren, kontrolliert. In den Versuchen 1 und 2, bei denen ausschließlich der SCHLUFFIGE SANDBODEN mit einem pH-Wert von 4,5 (Kap. 2.5.2., Tab. 4) als Kulturmedium zum Einsatz kam, gab es in Bezug auf die erfassten NH_3 -Emissionen keine Unterschiede zwischen der Variante »offene Substratoberfläche« und »abgedeckte Substratoberfläche« (Tab. 45, Abb. 47). Dagegen traten in Versuch 3, bei dem als Kulturmedium der tonige C-LÖSS-Mineralboden mit einem pH-Wert von 7,5 und einem Schluffanteil von 67 % eingesetzt wurde, deutliche Unterschiede in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung zwischen beiden Versuchsvarianten auf (Tab. 45, Abb. 47). Bei der Variante »offene Substratoberfläche« konnte das im Boden durch mikrobielle oder physikalisch-chemische Prozesse gebildete NH_3 entweichen und wurde zusammen mit dem aus der Pflanze freigesetzten NH_3 erfasst. Dagegen wurde bei der Variante »abgedeckte Substratoberfläche« durch versuchstechnische Maßnahmen ein Entweichen des im Boden gebildeten NH_3 unterbunden. Hier wurde nur das von den Pflanzen emittierte NH_3 gemessen.

Neben dem pH-Wert spielt hier vor allem der Gehalt an organischer Substanz im Boden eine wichtige Rolle. Infolge von Mineralisierungsprozessen entsteht im Boden $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$. Das Verhältnis von NH_4^+ und NH_3 in wässriger Lösung wird bei konstanter Temperatur vom pH-Wert bestimmt (Court et al., 1964). Oberhalb von pH 7,5 liegt ein relativ großer Anteil an NH_3 in der Bodenlösung vor (Mannheim, 1996). Dabei kann NH_3 aus dem Boden heraus diffundieren und in die Atmosphäre entweichen. Wie die Ergebnisse aus Experiment 13 sowie aus einer Arbeit von Harper et al. (1987) zeigen, ist für die exakte Bewertung der NH_3 -Emissionen aus Pflanzen die Überprüfung des Kulturmediums (Boden) auf eine eventuelle NH_3 -Freisetzung zwingend erforderlich. Harper et al. (1987) beobachteten bei jungen Weizenpflanzen mit hoher N-Versorgung eine hohe NH_3 -Freisetzung. Dabei wurde festgestellt, dass in dieser Untersuchung aus dem Kultursubstrat (Boden) stammendes NH_3 miterfasst worden war.

In der eigenen Arbeit wurde eine eventuelle Freisetzung von N_2 , N_2O und NO_x aus dem Kultursubstrat nicht überprüft. Aufgrund der verschiedenen versuchstechnischen Maßnahmen zur Unterbindung von Prozessen, welche für die Entstehung dieser Art von N-Verlusten verantwortlich sind, wurde von einer Kontrolle abgesehen. Aber selbst unter der Annahme, dass trotz der entsprechenden Maßnahmen N-Verluste aus dem Kultursubstrat hätten auftreten

können, lägen diese zweifelsohne nicht in der Größenordnung des bei der N-Bilanzierung errechneten Saldos.

Da weder N-Verluste aus dem Kultursubstrat noch erhöhte NH_3 -Emissionen aus Pflanzen als Ursache für den unerklärten Verbleib von rund 10 % des im Versuchssystem eingesetzten Stickstoffs in Betracht kommen, muss über die Freisetzung weiterer gasförmiger N-Verbindungen aus Pflanzen nachgedacht werden.

4.2. EMISSIONEN OXIDIERTER STICKSTOFFVERBINDUNGEN

Wie aus der Literatur bekannt, emittieren Pflanzen neben Ammoniak auch flüchtige Amine (da Silva & Stutte, 1981) und oxidierte N-Formen wie Stickoxide (NO_x) und Lachgas (N_2O) (Klepper, 1979; Klepper, 1990; Rockel, 1993; Chang, et al., 1997). Allerdings muss bezweifelt werden, ob Emissionen dieser Art ein solches Ausmaß, wie in Experiment 1 - als Saldo dargestellt (Tab. 51) - erreichen können.

STICKOXIDE (NO und $\text{NO}_2 = \text{NO}_x$)

Rockel (1993) konnte die NO -Abgabe verschiedener Pflanzenarten nachweisen. Die Übertragung der Messergebnisse auf einen Hektar ergab bei Sonnenblumen - mit einem Blattflächenindex von 5 - eine NO -Freisetzung von 1 g NO-N pro Tag. Bei einer durchschnittlichen Vegetationszeit von 100 Tagen würden rein rechnerisch 0,1 kg NO-N freigesetzt werden. Dieses Beispiel macht deutlich, dass der als SALDO deklarierte, nicht wiederauffindbare Anteil des eingesetzten Gesamtstickstoffs in Experiment 1 nur zu einem Bruchteil in Form von NO von den Pflanzen emittiert worden sein kann.

Die eigene Arbeit betreffend wurden am Institut für Bio- und Geowissenschaften im Forschungszentrum in Jülich Versuche zum Nachweis von NO - und NO_2 -Emissionen aus Sommerweizen durchgeführt. Dabei konnten keine NO_x -Flüsse zwischen den Versuchspflanzen und der sie umgebenden Luft nachgewiesen werden. Der Grund für dieses unerwartete Ergebnis blieb ungeklärt. Die Versuche wurden weder im MATERIAL- & METHODEN- noch im ERGEBNIS-Teil der vorliegenden Arbeit aufgeführt. Die Versuchstechnik kann in der Dissertation von Rockel (1993) nachgelesen werden. Da die Freisetzung von NO_x -N eine eher untergeordnete Rolle zu spielen scheint - zumindest in Bezug auf den Erklärungsansatz, was den Verbleib von nicht auffindbarem N betrifft -, galt es die N_2O -Freisetzung näher zu untersuchen.

DISTICKSTOFFOXID (N_2O)

Für den Nachweis eventueller N_2O -Emissionen aus Pflanzen wurde ein dafür erforderliches Haubengefäßsystem nach der CLOSED-CHAMBER-Methode (Mosier et al., 1991) entwickelt, welches es ermöglichte, N_2O -Konzentrationsveränderungen zwischen den Versuchspflanzen und der sie umgebenden atmosphärischen Luft zu erfassen. Unter Berücksichtigung der übergeordneten Gesamthematik 'KLIMARELEVANTE GASE IN DER LANDWIRTSCHAFT' waren diese Versuchsansätze von besonderer Bedeutung.

Nach BMU (1993) beträgt in Deutschland für das Jahr 1990 der Anteil der Landwirtschaft an den Gesamt- N_2O -Emissionen 33,3 %, während 44,4 % aus industriellen Produktionsprozessen stammen. Die restlichen 22,3 % werden dem Straßenverkehr, öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken sowie sonstigen Quellen zugeschrieben. Nach Schätzungen des IPCC (1992) macht der Anteil der mit Stickstoff gedüngten Böden bis in das Jahr 2026 hinein 22 % der gesamten N_2O -Emission aus. Auch für Mosier et al. (1991) stellen landwirtschaftlich genutzte Böden mit die größten »anthropogen verursachten N_2O -Quellen« dar.

Die Entstehung von N_2O erfolgt neben den Stickstoffoxiden (NO_x) und molekularem Luftstickstoff (N_2) bei der mikrobiellen Umsetzung (Denitrifikation, Nitrifikation) von anorganischen Stickstoffverbindungen (NH_4^+ , NO_3^-) in Böden und Gewässern. Im Boden gebildetes

N₂O gelangt über Diffusion durch das Bodenprofil nach oben in die Atmosphäre (Chang et al., 1997).

Untersuchungen zufolge entsteht N₂O im Boden zu etwa 90 % aus der Denitrifikation von Nitrat und in geringerem Maße bei der Nitrifikation aus Ammonium (Schmidt, 1998). Verantwortlich für beide biologischen Prozesse sind Bodenbakterien - denitrifizierende und nitrifizierende Mikroorganismen - (Knowles, 1981; Poth & Focht, 1985).

Bei der Nitrifikation wird Ammonium (NH₄⁺) biologisch zu Nitrat (NO₃⁻) oxidiert. Dieser Prozess ist in zwei Schritte unterteilt. Bakterien der Gattungen *Nitrosomonas* und *Nitrospira* sind für die Umsetzung des Ammoniums (NH₄⁺) in Nitrit (NO₂⁻) verantwortlich. Bakterien der Gattung *Nitrobacter* setzen das Nitrit (NO₂⁻) weiter in Nitrat (NO₃⁻) um (EK, 1994). Die Nitrifikation wird von der Verfügbarkeit an NH₄⁺ entscheidend beeinflusst. Die Zufuhr von nitrifizierbarem Stickstoff (Harnstoff (CO(NH₂)₂), Ammoniak (NH₃) oder Ammoniumsulfat (NH₄)₂SO₄) hat in der Regel eine deutliche Erhöhung der N₂O-Bildung zur Folge (Bremner & Blackmer, 1981, In: Beese, 1994). Auch Eichner (1990) verzeichnete bei Einsatz ammoniumhaltiger N-Dünger einen Anstieg der N₂O-Emissionen. Darüber hinaus wird die N₂O-Freisetzung durch Nitrifikation erheblich vom Wasser- und Sauerstoffhaushalt des Bodens (Porensystem, Humusgehalt, etc.) und den klimatischen Faktoren (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, etc.) beeinflusst (Beese, 1994). Auch der pH-Wert des Bodens stellt in Bezug auf die Nitrifikation eine wichtige Einflussgröße dar. Niedrige pH-Werte, extreme Temperaturen sowie Phosphatmangel können die Nitrifikation hemmen (Haynes, 1986, In: Beese, 1994).

Bei der Denitrifikation wird Nitrat (NO₃⁻) oder Nitrit (NO₂⁻) von fakultativ anaeroben heterotrophen Bakterien verschiedener Gattungen unter anaeroben Bedingungen zu NO, N₂O oder N₂ reduziert. Der Ablauf der Denitrifikation wird insbesondere durch das Vorhandensein notwendiger Substrate sowie durch die Umweltbedingungen beeinflusst. Im terrestrischen Bereich kommt dabei der Verfügbarkeit oder Abwesenheit von Sauerstoff, von geeigneten Reduktionsmitteln sowie von Elektronenakzeptoren (NO₃⁻, NO₂⁻) die größte Bedeutung zu (Beese, 1994). Die Denitrifikation ist folglich ebenfalls vom Luft- und Wasserhaushalt und den Klimafaktoren abhängig. Durch hohe Bodenwassergehalte wird die N₂O-Freisetzung stimuliert. Leicht abbaubare organische Substanz dient den Mikroorganismen als Energiequelle und Elektronenspender und stellt darüber hinaus Material zum Aufbau von Biomasse bereit.

Infolge der Komplexität der Umweltfaktoren und deren Veränderungen über Zeit (Tages- und Jahrgänge) und Raum (inhomogene Bodenverhältnisse und Witterungsbedingungen) lässt sich die Höhe der freigesetzten N₂O-Menge nicht einmal regional annähernd genau abschätzen (EK, 1994). Neben der natürlichen N₂O-Entgasung aus Böden, wie sie vergleichsweise auf Brache oder unbehandelten Flächen vorkommt, spielen insbesondere die anthropogenen nutzungsabhängigen N₂O-Emissionen eine entscheidende Rolle (Fuchs et al., 1995). Bezüglich dieser N₂O-Emissionen wurde in zahlreichen Untersuchungen festgestellt, dass durch N-Mineraldüngung grundsätzlich eine erhöhte N₂O-Freisetzung verursacht wird (Schulte-Kellinghaus, 1988). Schätzungen des IPCC (1996) nach werden mehr als 1,25 % des applizierten Düngerstickstoffs aus dem Boden in Form von N₂O freigesetzt. Nach Sauerbeck (1992) werden sogar 2-3 % des N-Düngeraufwandes als N₂O aus Böden emittiert. Berechnungen zu absoluten N₂O-Emissionen pro Hektar gelten infolge zu großer Messwertschwankungen durch die Heterogenität der Flächen (Böden) als nicht repräsentativ (Kessavalou et al., 1998). Bei einem N-Düngeraufwand von angenommen 200 kg N ha⁻¹ würden bei einer durch Denitrifikations- und Nitrifikationsprozesse verursachten N₂O-Freisetzung von 3 % - rein theoretisch - 6 kg N₂O-N aus dem Boden emittiert. Ein Abschätzen beziehungsweise Hochrechnen der N₂O-Freisetzung auf eine Fläche von einem Hektar dient allein der Überlegung, ob die bei der N-Bilanzierung in der eigenen Arbeit aufgetretenen nicht zuordbaren N-Verluste als N₂O-Emissionen aus dem Versuchssystem hätten entweichen können. Die errechnete

Menge von bis zu 6 kg N₂O-N erscheint sehr hoch. Nach Untersuchungen von Kessavalou et al. (1998) wurden auf Grünland weniger als 1,2 g N ha⁻¹ d⁻¹ und auf Weizenfeldern in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung bis zu 2 g N ha⁻¹ d⁻¹ als N₂O emittiert. In einem Zeitraum von 150 Wachstumstagen wären dementsprechend 0,18 kg N₂O-N ha⁻¹ beziehungsweise bis zu 0,30 kg N₂O-N ha⁻¹ freigesetzt worden. Diese Abschätzungen machen deutlich, dass der nicht wiederauffindbare N-Anteil im Bilanzierungsversuch der eigenen Arbeit - wenn überhaupt - nur zum Teil den durch N₂O-Freisetzung entstehenden Verlusten zugeordnet werden kann, zumal versuchstechnische Maßnahmen zur Vermeidung insbesondere denitrifizierender Bedingungen im System *Pflanze-Gefäß-Substrat* durchgeführt wurden.

Während sich die bisher dargestellte N₂O-Freisetzung auf den Austrag direkt aus dem Boden bezog, kommt als Transportweg von bodenbürtigem N₂O auch die "Emission über die Pflanze" (Pflanzenbestände) in Betracht.

N₂O -FLÜSSE ZWISCHEN PFLANZE UND DER SIE UMGEBENDEN ATMOSPHERE

Die N₂O-Freisetzung aus Pflanzen beziehungsweise die Bedeutung des Transportweges über die Pflanzen in Relation zur direkten Emission von N₂O aus dem Boden über Diffusion ist bisher kaum untersucht worden. Auch über die Mechanismen der N₂O-Abgabe bei verschiedenen Pflanzenarten ist wenig bekannt. Mosier et al. (1990) untersuchten die N₂O-Freisetzung bei Reis. Es wird vermutet, dass N₂O im Boden freigesetzt und über die Pflanze an die Atmosphäre abgegeben wird. Dabei kann sich N₂O entweder mit dem Transpirationsstrom im Wasser gelöst oder gasförmig im sogenannten *Aerenchym* innerhalb der Pflanze bewegen. Ein ähnlicher Freisetzungsmechanismus ist im Nassreisanbau schon in Bezug auf die Methanfreisetzung bekannt. Hier erfolgt der Transport von im Boden gebildetem Methan über das *Aerenchym* in der Pflanze, um über den Spross an die Atmosphäre abgegeben zu werden (Nouchi et al., 1990).

Chang et al. (1997) untersuchten die N₂O-Freisetzung aus Raps und Gerste. Auch ihrer Arbeit nach gelangt im Boden gebildetes und in Wasser gelöstes N₂O über die Wurzeln in den Spross und weiter in die Blätter. Von hier aus wird es durch die Stomata in die Atmosphäre freigesetzt.

Modellrechnungen zufolge darf der über die Pflanze verlaufende Emissionsweg von bodenbürtigem N₂O nicht unterschätzt werden (Dowdell et al., 1979b). Unter entsprechenden Bedingungen, wie einer hohen Transpirationsrate in der Hauptwachstumsphase und einer hohen N₂O-Konzentration in der Bodenlösung, könnte theoretisch ein Flux von 50 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹ über Pflanzenbestände erfolgen. Diese Angaben beruhen ausschließlich auf Modellrechnungen und sind dementsprechend unter Vorbehalt zu bewerten.

In Experiment 15 wurden nach der Closed-Chamber-Methode N₂O-Konzentrationsveränderungen zwischen Weizenpflanzen und der sie umgebenden Atmosphäre nachgewiesen. Dabei lagen die gemessenen Konzentrationen trotz 24-stündiger Akkumulationszeit auf sehr geringem Niveau. Abzüglich der Hintergrundkonzentration lagen einige Messwerte an der Nachweisgrenze (Abb. 55). Dennoch konnte gezeigt werden, dass bei NO₃⁻-N-Ernährung mehr N₂O freigesetzt wurde als bei NH₄⁺-N-Ernährung. Die Versorgung mit NH₄⁺ führte zeitweise auch zu einer Abnahme der N₂O-Konzentration der Haubeninnenluft. In diesem Fall nahmen die Versuchspflanzen N₂O auf. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch die Aufnahme über die Stomata erfolgte, da das Kulturmedium nach oben hin mit einer Knetmasse abgedichtet war und folglich eine Aufnahme über die Topfoberfläche ausgeschlossen werden konnte. Dieses Ergebnis gibt einen Hinweis auf die mögliche Rolle von Pflanzen beziehungsweise Pflanzenbeständen als Senke für atmosphärisches N₂O.

Darüber hinaus könnte in der Beobachtung '*NO₃⁻-N-Ernährung fördere die N₂O-Freisetzung*' eventuell ein Anhaltspunkt in Bezug auf die Ursache der N₂O-Abgabe gesehen werden. So

dürfte hier ein möglicher Versuchsansatz zur weiteren Klärung des Freisetzungsmechanismus' liegen. In der eigenen Arbeit konnten Untersuchungen dieser Art - nicht zuletzt wegen des thematischen Schwerpunktes der "*NH₃-Emissionen aus Pflanzen*" - nicht weiter erfolgen.

Wie bereits erwähnt, entsteht N₂O nach Auffassung verschiedener Autoren im Boden (Kulturmedium) und wird durch die Pflanze - wie durch einen Kamin hindurch - nach oben in Richtung Atmosphäre transportiert und anschließend freigesetzt (Mosier et al., 1991; Chang et al., 1997). Die Pflanze fungiert quasi als Emissionspfad, ähnlich wie bei Methan im Nassreisanbau. In Experiment 15 der eigenen Arbeit wurden die Versuchspflanzen in Nährlösung kultiviert. Das Kulturmedium war noch oben hin abgedichtet, um ein - eventuell auftretendes - direktes Entweichen von N₂O aus der Nährlösung zu unterbinden. So konnte davon ausgegangen werden, dass die erfassten N₂O-Konzentrationsveränderungen ausschließlich durch einen N₂O-Austausch des oberirdischen Pflanzensprosses mit der Umgebungsluft verursacht wurden. Eine »Dekapitation« des pflanzlichen Sprosses führte bei NO₃⁻-N- und NH₄⁺-N-Ernährung zu einer Erhöhung der N₂O-Freisetzung (Abb. 55). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass N₂O in den Wurzeln, im Wurzelbereich (Rhizosphäre) oder im Nährmedium entstanden sein musste. Dass bei NO₃⁻-N-Ernährung eine deutlich höhere N₂O-Freisetzung festgestellt wurde, lässt einen Einfluss der Nitrat-Reduktion vermuten. Ähnliche Vermutungen äußerten Dean & Harper (1986). Sie untersuchten die NO_x- und N₂O-Produktion während der »*in vivo*-Nitratreduktase-Prüfung« und nahmen an, dass im Blatt der untersuchten Sojapflanze gebildetes NO und N₂O aus dem Nitrat im Nährmedium während der Nitratreduktion hervorging. Im Blatt der NR₁-Sojapflanze (Mutante), welcher die wesentlichen Nitratreduktase-Enzyme fehlen, stellten sie dagegen keine NO- und N₂O-Produktion fest.

Auch Denitrifikationsprozesse im Nährmedium können in Experiment 15 der eigenen Arbeit nicht völlig ausgeschlossen werden. Es ist bekannt, dass unter anaeroben Bedingungen durch mikrobielle Reduktion des Nitrats Stickoxide - auch N₂O - und elementarer Stickstoff entstehen können. Anaerobe Bakterien verwenden dabei NO₃⁻ als e⁻-Akzeptor. Als Elektronendonator verbrauchen die Bakterien Kohlenstoff, der aus organischer Substanz stammt. Auch durch das Absterben von Wurzelhaaren wird der benötigte Kohlenstoff bereitgestellt. Die Versorgung mit leicht abbaubarer organischer Substanz (Gerüst-Kohlenstoff) stimuliert die mikrobielle Aktivität und intensiviert dadurch die Atmung in O₂-Mangelzonen der Rhizosphäre (Hojberg & Sorensen, 1993) sowie die N₂O-Produktion durch Denitrifikation und Nitrifikation (Schenk & Daum, 1997). Es ist durchaus denkbar, dass in den eigenen Untersuchungen - trotz Belüftung der Nährlösung - durch die entsprechenden Bakterien N₂O im Kulturmedium gebildet wurde. In Versuchen von Schenk & Daum (1997) wurden in erde-losen Gewächshauskulturen N-Verluste von bis zu 30 % der N-Gesamt-Zufuhr festgestellt, die überwiegend auf gasförmige Verluste in Form von N₂O und N₂ zurückgingen. Zudem wird vermutet, dass den denitrifizierenden Bakterien infolge der »Dekapitation« mehr Kohlenstoff aus den Zellen abgestorbener Wurzelhaare zur Verfügung stand und infolgedessen deren Aktivität deutlich anstieg. Die Folge wäre eine erhöhte N₂O-Freisetzung gewesen. Auch Chang et al. (1997) gehen davon aus, dass N₂O nicht in der Pflanze gebildet, sondern durch diese über die Transpiration in die Atmosphäre befördert wird. Ihre Annahme stützt sich auf Untersuchungsergebnisse mit Raps und Gerste. Wurde der Boden bei Rapskultur »auf Wasserkapazität bewässert« (maximale Haftwassermenge), traten keine messbaren N₂O-Emissionen aus dem oberirdischen Pflanzenspross auf. Dieses Ergebnis wird als Folge des Unterbindens der Denitrifikation gesehen, dem biologischen Prozess, der verschiedenen Arbeiten nach (Blackmer et al., 1980; Mosier et al., 1990) an der N₂O-Entstehung die entscheidende Rolle spielt. Wurde der Boden in der Arbeit von Chang et al. (1997) dagegen wassergesättigt, stieg die N₂O-Konzentration 'innerhalb der Sprosskammer' (Haube) über die Zeit hin stetig an. Am Ende der Messdauer lag die N₂O-Konzentration 'innerhalb der Sprosskammer' höher als direkt oberhalb der Bodenoberfläche (Untergefäß). Daraus wurde abgeleitet, dass die N₂O-Freisetzung nicht aus dem Boden, sondern aus dem pflanzlichen Spross erfolgt

sein musste. Das Begießen des Bodens mit einer N_2O beihaltenden Lösung (in Wasser gelöstem N_2O) führte zu einer sofortigen N_2O -Freisetzung aus dem Pflanzenspross. Darin sahen Chang et al. (1997) den Beweis dafür, dass die Pflanze nur *Transportmittel* von im Boden gebildetem N_2O auf dem Weg in die Atmosphäre ist. Auch in anderen Arbeiten wurden N_2O -Emissionen aus Pflanzen unter Bedingungen intensiver Denitrifikation im Wurzelbereich beobachtet (Dowdell et al., 1979; Amundson & Davidson, 1990; Ueda et al., 1993). Der *Weg durch die Pflanze* wird auch hier als wichtige Route für die Freisetzung von N_2O in die Atmosphäre angesehen.

Daum & Schenk (1996a) untersuchten den Einfluss der N-Konzentration und -form auf die N_2O - und N_2 -Emissionen aus einem erdelosen Kultursystem. Dabei stellten sie fest, dass eine starke N-Unterversorgung zu einer deutlichen Reduktion der N_2O - und N_2 -Emissionen führte. Sie vermuteten den Grund dafür in der durch ein reduziertes Pflanzenwachstum induzierten Abnahme von Wurzelexsudaten, die den Mikroorganismen als C-Quelle dienen. Diese Vermutung deckt sich mit dem Erklärungsansatz über den Anstieg der N_2O -Freisetzung nach der »Dekapitation« der Pflanzen in den eigenen Versuchen (Exp. 15, Abb. 55).

Ferner stellten Daum & Schenk (1996a) fest, dass der N_2O -Anteil an der N-Gesamtemission mit zunehmendem NO_3^- -Angebot anstieg. Die Ursache hierfür sahen sie in einer Beeinträchtigung des letzten Reduktionsschrittes der Denitrifikation durch eine hohe NO_3^- -Konzentration. Alleiniges NH_4^+ -Angebot hatte in den Untersuchungen von Daum & Schenk (1996a) einen starken Abfall der N_2O - und N_2 -Emissionen zur Folge. Diese Ergebnisse bekräftigen die Annahme, dass insbesondere denitrifizierende Mikroorganismen für die N_2O - und N_2 -Freisetzung verantwortlich sind. Auch in den eigenen Versuchen traten bei NH_4^+ -N-Ernährung nur geringe oder negative N_2O -Emissionen auf (Tab. 48, Abb. 55-56). Dieses Ergebnis wirft die Frage auf, welchen Beitrag die Nitrifikation an der N_2O -Entstehung bzw. -Freisetzung leistet. Bei der Nitrifikation wird Ammonium über Nitrit zu Nitrat oxidiert. N_2O kann dabei als Zwischenprodukt auftreten. Der Prozess, der zur Produktion von N_2O während der Nitrifikation führt, ist noch nicht vollständig aufgeklärt (EK, 1995). Es wird angenommen, dass in Experiment 15 keine *Nitrifikationsbedingungen* vorlagen. Eine auf Nitrifikation beruhende N_2O -Freisetzung wird dementsprechend ausgeschlossen. Bekräftigt wird diese Annahme durch Literaturhinweise, wonach die Rolle der Nitrifikation an der N_2O -Gesamtproduktion als sehr gering eingestuft wird (Knowles, 1981; Hutchinson & Brams, 1992; Hutchinson et al., 1992, beide in Beese, 1994).

Durch die Anwendung von Messmethoden, die nur die N_2O -Freisetzung direkt über der Bodenoberfläche erfassen, werden die tatsächlichen N_2O -Flüsse aus landwirtschaftlichen Kulturen - Boden einschließlich Pflanzenbewuchs - unterschätzt (Chang et al., 1997). Vielleicht könnte die Diskrepanz bei der Erfassung der NH_3 -Emissionen zwischen direkter und indirekter Messmethode (Experiment 1) doch - zumindest teilweise - auf nicht erfasste N_2O - und N_2 -Verluste zurückzuführen sein. Die Klärung und Beurteilung dieser Hypothese erfordert einen Vergleich der absoluten N_2O - und NH_3 -Emissionen. Das Datenmaterial aus der eigenen Arbeit reicht aber - im Hinblick auf die Messergebnisse zur Erfassung der N_2O -Emissionen - für einen Vergleich nicht aus, weshalb diesem Klärungsansatz nicht nachgegangen werden konnte.

Über die Ursache der beobachteten N_2O -Konzentrationsveränderungen bei Sommerweizen in der eigenen Arbeit - insbesondere in Abhängigkeit von der N-Versorgungsform - lassen sich nur Vermutungen anstellen. Konkrete Erklärungsansätze bedürfen zusätzlicher Untersuchungen. Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse von Chang et al. (1997) könnten weitere Zusammenhänge erforscht werden.

Somit bleibt weiterhin die Frage offen, welche der genannten flüchtigen N-Verbindungen für den bei der N-Bilanzierung nicht wiederauffindbaren Anteil der eingesetzten Gesamt-N-Dün-

germenge im Versuchssystem verantwortlich waren. Im Falle mehrerer beteiligter flüchtiger N-Verbindungen bleibt ferner deren anteiliger Beitrag ungeklärt. Die Ergebnisse aus der eigenen Arbeit über die Freisetzung von NH_3 , ergänzt durch die Ergebnisse aus der Literatur, zeigen aber zumindest, dass die direkte Messmethode (Windtunnel) gegenüber der indirekten Methode (N-Bilanzierungsmethode) realistischere Messergebnisse lieferte. Dieser Erkenntnisgewinn bildet die Grundlage für die weiteren Untersuchungsansätze über Mechanismen, Abhängigkeiten und biologische Zusammenhänge der NH_3 -Freisetzung innerhalb der Pflanze.

Während im Falle der N_2O -Freisetzung die Pflanze als *Transportmittel* (»Emissionsweg Pflanze«) fungiert, d.h. die N_2O -Bildung nicht innerhalb der Pflanze selbst, sondern im Kultur- beziehungsweise Nährmedium (Boden) erfolgt, stellt die Pflanze in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung den *Produktionsort* dar.

Da die Frage bezüglich der Methode zur Erfassung von NH_3 aus Pflanzen weitgehend geklärt sein dürfte, schließt sich die Frage nach dem Beitrag der *NH_3 -Pflanzenemissionen* an den Gesamt- NH_3 -Emissionen an. Wie bereits beschrieben, entstehen NH_3 -Emissionen vor allem in der Landwirtschaft (EK, 1994). Dabei sind etwa 90 % der Gesamtemissionen - global wie national - der Tierhaltung zuzurechnen. Die restlichen 10 % entstehen vor allem bei der Produktion und Ausbringung von mineralischen N-Düngern (Döhler, 1991). Unberücksichtigt bleiben in dieser Darstellung die NH_3 -Emissionen aus Pflanzen. Den Untersuchungen aus der eigenen Arbeit zufolge liegen die NH_3 -Emissionen aus Pflanzen unter 2,5 kg NH_3 -N pro ha und Vegetationsperiode (Exp. 1, Tab. 50).

Die NH_3 -Emissionen der Landwirtschaft in der BRD von 1986 wurden insgesamt mit 44 kg NH_3 -N pro ha LF beziffert (Isermann, 1990b-d). Davon entfallen 42 kg auf die Tierhaltung und 2-3 kg auf Mineraldünger (Produktion, Lagerung, Anwendung). Über den Anteil der NH_3 -Emissionen aus Nutzpflanzen liegen aus dieser Zeit keine Angaben vor. Eine NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen von 2,5 kg NH_3 -N pro ha und Vegetationsperiode, wie in der eigenen Arbeit gemessen, entspricht 5,6 % der von Isermann bezifferten 44 kg. Nach Berechnungen Isermanns (1990a) würde eine Freisetzung von - angenommen - 5 kg NH_3 -N pro ha und Vegetationsperiode eine NH_3 -Emission aus Pflanzen von ca. 60 000 t NH_3 -N a^{-1} für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Bundesrepublik bedeuten. Dies würde knapp einem neuntel der gesamten, für das Jahr 1986 durch die Landwirtschaft der damaligen BRD verursachten NH_3 -N-Emissionen von 528 000 t NH_3 -N a^{-1} entsprechen. Diesen Berechnungen zufolge läge der Anteil der *NH_3 -Pflanzenemissionen* zwischen 5,5 und 11 % der Gesamt- NH_3 -Emissionen in der Landwirtschaft. Da keine Angaben über NH_3 -Emissionen aus ungedüngten Grünflächen und damit für das natürliche Ökosystem vorliegen, lässt sich kein natürlicher Hintergrund angeben. Um jedoch NH_3 -Emissionen aus Nutzpflanzen in die Gesamt- NH_3 -Emissionen der Landwirtschaft miteinbeziehen zu können, ist es nötig, NH_3 -Hintergrundwerte entsprechender Ökosysteme zu kennen (Isermann, 1990a). Daher lassen sich die Berechnungen nicht als Basis für die Aufstellung einer exakten Aufteilung der NH_3 -Emissionsverursacher verwenden. Aber sie stellen Anhaltswerte dar, die eine durchaus realistische Abschätzung ermöglichen. Der Streuung der Messwerte der NH_3 -Emissionen aus Nutzpflanzen, die sich nach Isermann (1990) sogar von 1,9 bis 15,5 kg NH_3 -N pro ha und Vegetationsperiode erstreckt, liegen verschiedene Ursachen zugrunde. Neben dem Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen, insbesondere der N-Düngung, spielen pflanzenartspezifische physiologische Stoffwechselprozesse eine entscheidende Rolle. Da die Frage nach den verschiedenen Einflussfaktoren auf die NH_3 -Freisetzung bei Pflanzen der Schwerpunkt der eigenen Arbeit war, wird sie im Folgenden ausführlich diskutiert.

4.3. NH_3 -FREISETZENDE STOFFWECHSELREAKTIONEN

Für die Abgabe von NH_3 -N werden verschiedene Reaktionen im N-Stoffwechsel verantwortlich gemacht, deren Aktivität und Intensität ihrerseits in Beziehung zu dem physiologischen

Entwicklungsstadium der Pflanzen stehen (Sutton et al., 1994). So haben die NH_4^+ - und NO_3^- -AUFNAHME über die Wurzel, die NO_3^- -REDUKTION, die NH_3 -/ NH_4^+ -ASSIMILATION (Andrew, 1986; Lea, 1991), die Reaktion der TRANSAMINIERUNG bei der Synthese von Aminosäuren (Heldt, 1996) und insbesondere die PHOTORESPIRATION (Keys et al., 1978; Wallsgrove et al., 1983) Einfluss auf den Anstieg des NH_3 -Partialdruckes im Blattinneren. Frantz et al. (1982) schätzen, dass 85 % des in Blättern insgesamt freigesetzten Ammoniums aus der Photorespiration entstammen. Auch Givan et al. (1988) gehen davon aus, dass die photorespiratorische NH_4^+ -Freisetzung zehnmal größer ist als die der Nitratreduktion.

Darüber hinaus kann es bei der CHLOROPHYLLSYNTHESE sowie beim Ablauf des PHENYLPROPANOIDSTOFFWECHSELS zur intrazellulären NH_3 -Freisetzung und damit zur Anhebung des NH_3 -Partialdruckes kommen. So wird bei der Bildung von Chlorophyll während der Protoporphyrinsynthese infolge einer Desaminierungsreaktion vorübergehend NH_3 freigesetzt, welches erneut reassimiliert werden muss (Heldt, 1996). Beim Phenylpropanoidstoffwechsel wird eine Vielzahl pflanzlicher Sekundärmetaboliten und Zellwandbestandteile gebildet. Während der Startreaktion katalysiert das Enzym Phenylalanin-Ammoniak-Lyase (PAL) die Desaminierung des Ausgangsproduktes Phenylalanin, es entsteht Zimtsäure. Es wird vermutet, dass das freigesetzte NH_3 durch Glutamin-Synthetase (GS) erneut fixiert und reassimiliert wird (Heldt, 1996).

Auch über die NITROGENASEAKTIVITÄT bei der N_2 -Fixierung durch symbiontische Rhizobien in Leguminosen kann es in den Wurzelzellen der Pflanzen zur Entstehung von intrazellulärem NH_4^+ kommen, welches in Form von NH_3 freigesetzt werden könnte.

Jede dieser genannten Reaktionen hat über die gesamte Vegetationszeit hinweg direkten Einfluss auf die Entstehung von NH_3 . Dabei erfolgt der Ablauf der jeweiligen Reaktion allerdings »bedarfsorientiert« mit unterschiedlicher Intensität.

Gegenüber den aufgeführten NH_3 -freisetzenden Reaktionen ist die Abgabe von NH_3 durch den fortschreitenden Abbau von Proteinen in alternden Pflanzen, der sogenannten Proteolyse während der SENESZENZ, auf eine spätere Phase in der pflanzlichen Entwicklung begrenzt. Zahlreichen Autoren nach treten während der SENESZENZ besonders hohe NH_3 -Emissionen auf (O'Deen, 1989; Schjoerring & Byskov-Nielsen, 1991; Mannheim et al., 1997). Bereits 1962 wurde auf die NH_4^+ -Freisetzung infolge der hohen Umsatzrate der Chloroplastenproteine, die einen großen Teil des Blattproteins darstellen, hingewiesen (Racusen & Foote, 1962; Zucker & Stinson, 1962).

Sicherlich ist die Freisetzung von NH_3 nicht einer einzelnen, sondern mehreren, mitunter gleichzeitig ablaufenden Stoffwechselreaktionen zuzuordnen, deren anteilmäßiger Beitrag an der Gesamtfreisetzung sich stets verändern kann. Schjoerring et al. (1991) beschreiben die Bildung von intrazellulärem NH_3 / NH_4^+ und die dadurch zustande kommenden NH_3 -Emissionen als »multifaktoriell«. Auch Gerendás (1992) sieht als Ursache für die Akkumulation von NH_4^+ infolge des hohen N-Umsatzes *verschiedene endogene Quellen*. Jede Hemmung der Reassimilation von endogen freigesetztem NH_4^+ hat eine massive Ammoniumakkumulation zur Folge (Gerendás, 1992).

4.4. EXOGENE EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE NH_3 -FREISETZUNG AUS PFLANZEN

Neben den genannten Reaktionen im Stoffwechsel haben auch Umweltfaktoren Einfluss auf die NH_3 -Abgabe bei Pflanzen (Farquhar et al., 1980; van Hove et al., 1989). So stellen Lufttemperatur (Stutte & da Silva, 1981), relative Luftfeuchte, Wasserversorgung im Boden (Morgan & Parton, in Schjoerring, 1991) sowie die Lichtintensität externe Einflussgrößen dar, die über den stomatären Gasaustausch Auswirkungen auf die NH_3 -Freisetzung (Schjoerring 1991) haben. Trotz unterschiedlicher Versuchszeiten in Bezug auf die jahreszeitliche Entwicklung wurde bei der Durchführung der eigenen Untersuchungen über die Messschwankungen hinaus kein Einfluss von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte oder Lichtintensität festgestellt. Wie die Aufzeichnungen und Auswertungen der entsprechenden Wetterdaten er-

gaben, lagen bei den genannten Umweltfaktoren keine größeren jahreszeitlich bedingten Unterschiede zwischen den Messwerten vor. Dies war in erster Linie auf versuchstechnische Maßnahmen zurückzuführen. So stand die Windtunnelanlage geschützt in nicht exponierter Lage vor der institutseigenen Vegetationshalle. Die Haubengefäßanlage befand sich innerhalb der Vegetationshalle. Durch eine Zusatzbeleuchtung wurde die Lichtintensität konstant gehalten. Außerdem wurde über eine Schattierung und eine Lüftungs- und Heizungsanlage die Lufttemperatur kontrolliert und eingestellt. So waren die externen Einflussfaktoren nahezu konstant, was für die vergleichende Gegenüberstellung von Versuchen eine wichtige Voraussetzung war.

4.5. NH₃-GASAUSTAUSCH - BEDEUTUNG DER STOMATA UND DES NH₃-KOMPENSATIONSPUNKTES

Der Spaltöffnungsapparat (Stomata) im Blatt von terrestrischen Pflanzen stellt den Hauptweg für den Austausch gasförmiger Verbindungen dar (Schjoerring, 1991; Marschner, 1995). Hohe Einstrahlung (Lichtintensität), gute Wasserversorgung sowie hohe N-Konzentrationen begünstigen die stomatäre Leitfähigkeit für NH₃. Heiße und trockene Bedingungen induzieren das Schließen der Stomata (Mansfield, 1985; Jairo et al., 1994). Nach Field (1987) nimmt die stomatäre Leitfähigkeit während der pflanzlichen Seneszenz ab.

Sutton et al. (1995) haben die kutikuläre Deposition und Absorption von NH₃ untersucht. Dabei konnten sie zeigen, dass NH₃ - in Abhängigkeit von der Konzentration der atmosphärischen Umgebungsluft - von Pflanzen aufgenommen oder abgegeben wird. Bei hohen atmosphärischen NH₃-Konzentrationen wird NH₃ absorbiert. Dagegen kommt es bei Konzentrationen, die unterhalb des sogenannten NH₃-Kompensationspunktes liegen, zur Abgabe von NH₃ aus Pflanzen (Farquhar et al., 1980). Der NH₃-Kompensationspunkt stellt die Konzentration an NH₃ dar, bei der kein Netto-NH₃-Fluss durch die Stomata erfolgt. Er liegt etwa bei 1-5 µg NH₃-N m⁻³ Luft (Farquhar et al., 1980; Sutton et al., 1994; Husted & Schjoerring, 1995). Die NH₃-Konzentration in der Atmosphäre liegt im Durchschnitt bei 1-10 µg NH₃-N m⁻³, kann aber auf 1000 µg NH₃-N m⁻³ Luft ansteigen (Wollenweber & Raven, 1993).

Die Richtung des NH₃-Fluxes - Abgabe oder Aufnahme von NH₃ - wird von dem NH₃-Konzentrationsverhältnis innerhalb der Atemhöhle und der die Pflanze umgebenden Atmosphäre bestimmt. Dabei wird dieses Verhältnis zum einen durch die unter 4.1. aufgeführten internen NH₄⁺-produzierenden und -freisetzenden Stoffwechselprozesse, zum anderen durch externe Umweltbedingungen, insbesondere dem Einsatz wirtschaftseigener Dünger, beeinflusst. Eine Veränderung der NH₃-Hintergrundkonzentration hat die Verschiebung des NH₃-Partialdrucks zwischen Pflanzen und der sie umgebenden Atmosphäre zur Folge. So führt eine Erhöhung der NH₃-Hintergrundkonzentration zu einer Erhöhung des *äußeren* (atmosphärischen) gegenüber des *inneren* (stomatären) NH₃-Partialdrucks. Um unter diesen Umständen NH₃ zu emittieren, müsste sich innerhalb der Pflanze durch die entsprechenden Reaktionen im Stoffwechsel (4.1.) ein noch höherer NH₃-Partialdruck als der in der Umgebungsluft (Atmosphäre) bestehende einstellen. Anderenfalls findet unter diesen Bedingungen eine NH₃-Aufnahme statt (Husted et al., 1995). Auch in den eigenen Versuchen konnte eine NH₃-Aufnahme beobachtet werden. Bei der vergleichenden Gegenüberstellung der NH₃-Flüsse bei Sommerweizen und Körnermais (Exp. 11) hatte ein leichter Anstieg der atmosphärischen NH₃-Hintergrundkonzentration eine sofortige Stagnation der NH₃-Freisetzung bei Weizen zur Folge (Abb. 42: Mitte [2., 6. und 10. Messung]). Die Ursache für die schwankenden NH₃-Hintergrundkonzentrationen wird in der zu diesem Zeitpunkt erfolgten Ausbringung von wirtschaftseigenem Dünger in der näheren Umgebung vermutet.

Morgan und Parton (1989) untersuchten den NH₃-Kompensationspunkt bei Weizen. Dabei beobachteten sie einen deutlichen Anstieg des NH₃-Kompensationspunktes zwischen der frühen und späten Kornfüllungsphase. Zum Zeitpunkt des Ährenschiebens und gegen Ende der Seneszenz wurde bei Weizen eine besonders hohe NH₃-Freisetzung beobachtet (Parton et al., 1988). Schjoerring (1991) verzeichnete bei Gerste ein vergleichbares Ergebnis. Auch Husted

et al. (1995) untersuchten den NH_3 -Kompensationspunkt bei Gerste unter kontrollierten Bedingungen in einer vollautomatisierten Messkammer. Durch gezielt veränderte NH_3 -Konzentrationen der in die Messkammer (Küvette) eingeleiteten Luft wurde das NH_3 -Partialdruckverhältnis zwischen Pflanze und Atmosphäre verändert und dadurch der NH_3 -Flux experimentell beeinflusst. Das Einleiten NH_3 -gereinigter Luft hob den NH_3 -Partialdruck im Blattinneren gegenüber dem NH_3 -Partialdruck in der die Pflanze umgebenden Atmosphärenluft stark an und förderte dadurch die NH_3 -Freisetzung aus der Pflanze. Das in der eigenen Arbeit entwickelte Haubengefäßsystem machte Untersuchungen dieser Art ebenfalls möglich.

4.6. NH_3 -AUSTAUSCH PFLANZEN-ATMOSPHERE

Da die NH_3 -Abgabe vermutlich maßgeblich über die Stomata erfolgt (Sutton et al., 1995), steht sie in Verbindung mit der stomatären Transpiration. Der NH_3 -Flux zwischen pflanzlichem Blattgewebe und umgebender Atmosphäre wird wie folgt berechnet:

$$J = g (p_a - p_i) / P \quad \text{Gleichung 3}$$

Dabei ist g ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) die stomatäre und kutikuläre Leitfähigkeit für die Diffusion eines Gases durch die Blattoberfläche, zu der zusätzlich der Grenzschichtwiderstand mit einberechnet wird. p_a ist der Partialdruck des Gases der umgebenden Atmosphäre, p_i der Partialdruck der stomatären Einhöhlung (Gasraum im Inneren des Blattes) und P der atmosphärische Druck. Gemäß Gleichung 3 ist die Rate und die Richtung des NH_3 -Fluxes die Funktion der Differenz des NH_3 -Partialdruckes zwischen dem Gasraum im Inneren des Blattes und der umgebenden Atmosphäre (Schjoerring, 1991). Eine Veränderung der NH_3 -Hintergrundkonzentration bewirkt eine Veränderung des NH_3 -Partialdruckverhältnisses innerhalb und außerhalb des pflanzlichen Gewebes und übt so Einfluss auf die Entstehung pflanzlicher NH_3 -Emissionen aus. Bei sehr starkem Anstieg der NH_3 -Hintergrundkonzentration kann auch eine stomatäre NH_3 -Aufnahme erfolgen (Whitehead & Lockyer, 1987).

Harper et al. (1987) untersuchten das Phänomen negativer Netto- NH_3 -Emissionen. Sie beobachteten in ihren Untersuchungen mit jungen Weizenpflanzen, dass bei geringer N-Verfügbarkeit im Boden vor der Blüte NH_3 aus der Atmosphärenluft aufgenommen und nicht abgegeben wurde. Daraus folgerten sie, dass Pflanzen mit unzureichender N-Versorgung ihren »nicht gedeckten N-Bedarf« über die stomatäre NH_3 -Aufnahme zu kompensieren versuchen. Die NH_3 -Aufnahme über die Stomata bei Pflanzen ist bekannt (Husted & Schjoerring, 1995) und wurde bereits ausführlich untersucht (Whitehead & Lockyer, 1987). Auch in der eigenen Arbeit wurden teilweise negative Netto- NH_3 -Emissionen aus Pflanzen festgestellt (Exp. 2: 2.Aussaart; Exp. 3: Vers. 5; Exp. 4: Vers. 2).

Für das Zustandekommen eines in dieser Richtung verlaufenden NH_3 -Flusses zwischen Pflanzen und Atmosphäre ist, wie schon erwähnt, das NH_3 -Partialdruckverhältnis von entscheidender Bedeutung. So erfolgt immer dann, wenn der NH_3 -Partialdruck in der Atmosphäre größer ist als der NH_3 -Partialdruck im Blattinneren, eine NH_3 -Aufnahme. Die Versuche mit Sommerweizen und Körnermais - bei der vergleichenden Gegenüberstellung einer C_3 - und einer C_4 -Pflanzenart (Kap. 3.2.9.-3.2.11., Exp. 10-12) -, in denen die NH_3 -Hintergrundkonzentration aufgezeichnet wurde, stellen diesen Sachverhalt deutlich dar. Eine kurzfristige Veränderung der NH_3 -Hintergrundkonzentration hatte direkten Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung der Versuchspflanzen. So hatte ein Anstieg der NH_3 -Hintergrundkonzentration bei Weizen eine Minderung der NH_3 -Freisetzungsrates und bei Mais eine Erhöhung der NH_3 -Aufnahmerate zur Folge (Abb. 42). Auf die pflanzenartspezifischen Unterschiede bei der Freisetzung von NH_3 wird später eingegangen.

Dass ein Teil der NH_3 -Freisetzung auch über die Kutikula der Blattepidermis erfolgt, geht aus Gleichung 3 zur Berechnung des NH_3 -Fluxes hervor. Allerdings wird der » NH_3 -Transfer« über die Kutikula als sehr gering eingestuft (van Hove et al., 1987). Vermutlich verhält es sich bei diesem Weg der NH_3 -Freisetzung ähnlich wie bei der kutikulären Transpiration, die einen Beitrag von höchstens 8 % an der Gesamttranspiration leistet (van Hove et al., 1987).

4.7. EINFLUSS DES ENTWICKLUNGSSTADIUMS DER PFLANZEN AUF DIE NH_3 -FREISETZUNG

Die Freisetzungsrates von NH_3 ist an das Entwicklungsstadium der Pflanzen gebunden. Bereits Keimlinge können NH_3 in die Atmosphäre freisetzen. Allerdings liegen die NH_3 -Emissionsraten junger Getreidepflanzen im vegetativen Stadium auf sehr niedrigem Niveau, verglichen mit denen älterer Pflanzen, insbesondere ab dem Zeitpunkt des Ährenschiebens (Morgan & Parton, 1989; Schjoerring et al., 1993).

In jungen Pflanzen werden hauptsächlich die NH_4^+ -AUFNAHME aus dem Boden, die NO_3^- -REDUKTION und die PHOTORESPIRATION für die $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Entstehung bzw. NH_3 -Freisetzung verantwortlich gemacht (Joy, 1988). Dagegen führt in alternden Pflanzen, während der SENESZENZ, der Proteinabbau zu einer stark erhöhten NH_4^+ -Bildung im pflanzlichen Gewebe. Der Anstieg des NH_3 -Partialdrucks im Blattinneren und eine verstärkte NH_3 -Abgabe (Emission) aus Pflanzen sind die Folge (Morgan & Parton, 1989; Schjoerring et al., 1993). Wie Husted et al. (1995) in ihren Untersuchungen mit Gerste feststellten, steht der NH_3 -Kompensationspunkt in Beziehung zu dem Entwicklungsstadium der Pflanzen. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit der Beobachtung, dass NH_3 -freisetzende Reaktionen im Allgemeinen an die Entwicklung der Pflanzen (physiologische Prozesse) gebunden sind.

Die Sortenwahl spielt im Hinblick auf den NH_3 -Kompensationspunkt einer Pflanzenart ebenfalls eine Rolle. Nach Mattsson et al. (1992a, 1993) ist die Intensität der Assimilation von remobilisiertem Stickstoff sortenabhängig.

In den eigenen Versuchen konnte ebenfalls eine klare Beziehung zwischen dem Entwicklungsstadium und der NH_3 -Freisetzung bei Sommerweizen beobachtet werden (Abb. 5). Während der Blüh- und Kornfüllungsphase traten in den Experimenten 1, 3 und 4, unabhängig von der jeweiligen, die Versuchsfrage betreffenden N-Ernährungsvariante, erhöhte NH_3 -Emissionsverluste auf. Der Verlauf der NH_3 -Emissionskurven ergab stets das selbe Muster. Abbildung 19 stellt die Beziehung zwischen NH_3 -Freisetzung und der physiologischen Entwicklung der Pflanzen anschaulich dar. Schjoerring et al. (1993) beobachteten in Felduntersuchungen mit Sommergerste ein vergleichbares NH_3 -Emissionsverhalten. Auch hier wurde zum Zeitpunkt des Ährenschiebens bis Blühbeginn und während der Kornfüllungsphase eine erhöhte NH_3 -Freisetzungsrates gemessen. O'Deen (1989) und Harper et al. (1987) beobachteten eine ähnliche Beziehung zwischen dem pflanzlichen Entwicklungsstadium und der NH_3 -Emissionsrate in Untersuchungen mit Winterweizen, Parton et al. (1988) und Morgan & Parton (1989) in Untersuchungen mit Sommerweizen.

In seiner Dissertationsarbeit zeigte Mannheim (1996), dass bei Sommerraps während der Seneszenz die höchsten NH_3 -Emissionen auftraten. Dahingegen wurden zum Zeitpunkt der Blüte nahezu keine NH_3 -Emissionen gemessen. Bei Winterweizen traten auch in der Arbeit von Mannheim (1996) bereits zum Zeitpunkt der Blüte (Entwicklungsstadium 58/59 [EC]) nachweisbare NH_3 -Emissionen auf, deren Höhe aber im Vergleich zu denen während der Kornfüllungs- und Reifephase sehr gering ausfiel.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse über die unter 4.3. dargestellten Stoffwechselreaktionen scheinen für die erhöhte NH_3 -Abgabe zu Beginn der Blüte verschiedene Prozesse verantwortlich zu sein. So werden die NH_4^+ -Aufnahme, die Nitrat-Nitrit-Reduktion von aufgenommenem NO_3^- , die NH_4^+ -Assimilation sowie Transaminierungsreaktionen und Prozesse des Sekundärstoffwechsels zur Synthese verschiedener Inhaltsstoffe als mögliche Ursachen

für die erhöhten NH_3 -Emissionen angesehen. Darüber hinaus spielt die Photorespiration eine entscheidende Rolle.

Eine exakte Bewertung der einzelnen Reaktionen ist infolge der Komplexität der NH_3 -Gesamtfreisetzung äußerst schwierig. Dennoch könnten die Erkenntnisse stoffwechselphysiologischer Vorgänge während der Phasen erhöhter NH_3 -Freisetzung eventuell Aufschluss über die Gewichtung der einzelnen, an der Gesamt- NH_3 -Bildung beteiligten Reaktionen geben.

Während der Phase des Blühens zeigt die Pflanze einen hohen Bedarf an Stickstoff. Im Hinblick auf die Anzahl der »produktiven« Halme kommt der N-Versorgung große Bedeutung zu (Geisler, 1983). Dabei mindert Stickstoff die Reduktionsprozesse und verbessert die Entwicklungsvoraussetzungen für die Einzelblüten (Geisler, 1983). Ein hoher N-Bedarf hat bei ausreichender N-Versorgung eine hohe N-Aufnahmeleistung zur Folge. Damit sind vermutlich während dieser Wachstums- und Entwicklungsphase die NO_3^- -Reduktion und NH_4^+ -Assimilation für die Entstehung von NH_3 -Emissionen aus Pflanzen von besonderer Bedeutung. In einer Untersuchung von Lacuesta et al. (1997) über die NH_4^+ -Produktion bei *Amaranthus edulis* wurde gezeigt, dass mehr als 40 % des freigesetzten Ammoniums aus der primären NO_3^- -Reduktion sowie aus dem N-Stoffwechsel entstammen. Dagegen ist nach Heldt (1996) die Rate der NH_4^+ -Fixierung bei der Nitratassimilation gegenüber der Rate der NH_4^+ -Refixierung bei der Photorespiration - beide Reaktionen werden durch den gleichen Enzymapparat katalysiert - bis zu 90 % geringer.

Es wird vermutet, dass auch in der eigenen Arbeit die NO_3^- -Reduktion bzw. -Assimilation für die erhöhte NH_3 -Freisetzung bei Weizen während der Blüte eine entscheidende Rolle spielte. Darüber hinaus wird angenommen, dass Transaminierungsprozesse, die eine wichtige Funktion im N-Stoffwechsel bei der Synthese verschiedener Aminosäuren einnehmen, während dieser Entwicklungsphase wohl verstärkt ablaufen und damit einen nicht unerheblichen Beitrag an der NH_3 -Freisetzung leisteten.

NH_3 -EMISSIONEN INFOLGE VON ALTERUNGSPROZESSEN (SENESZENZ)

Für zahlreiche Autoren stellt das Stadium der SENESZENZ die bedeutendste Phase der NH_3 -Freisetzung dar. Während diesem Entwicklungsabschnitt der Pflanze ist die NH_3 -Freisetzungsrates besonders hoch (Hooker et al., 1980; O'Deen & Porter 1986; Harper et al., 1987; Parton et al., 1988). Als Folge einsetzender N-Remobilisierungsprozesse werden zu Beginn der Seneszenz zunächst Proteine zu Aminosäuren hydrolysiert (Proteinabbau). Im Anschluss daran erfolgt die Synthese von Transport-Amiden, vor allem Glutamin und Asparagin, und die anschließende Translokation in die SINKS, wie Wurzeln und generative Pflanzenorgane. Der Transport erfolgt über das Phloem. Nach Erreichen der SINKS wird das Transport-Amid-N reassimiliert und eingelagert. Dieser aus Blättern und Stengeln remobilisierte und retranslozierte Stickstoff ist für den Proteinaufbau in Getreidekörnern von großer Bedeutung (Feller & Keist, 1986; Harper et al., 1987).

Schjoerring (1991) geht in seiner Arbeit näher auf den Proteinabbau während der Seneszenz ein. Das quantitativ wichtigste Blattprotein ist das Enzym Ribulosebiphosphat-Carboxylase/Oxygenase (*Rubisco*), welches die Kohlendioxidfixierung und die Photorespiration katalysiert (Richter, 1998). In C_3 -Pflanzen beträgt der Gehalt der *Rubisco* 20-40 % der gesamten löslichen Blattproteine. Ein erhöhtes N-Angebot hat einen Anstieg der *Rubisco*-Konzentration zur Folge (Lawlor et al., 1987b). Während der reproduktiven Phase stellt die *Rubisco* eine der größten potentiellen Quellen an mobilisierbarem Stickstoff (SOURCES) dar. Peterson & Huffaker (1975) beobachteten mit Beginn der Seneszenz eine Abnahme des Gehaltes an *Rubisco*. Gegenüber anderen löslichen Blattproteinen wird *Rubisco* während der Seneszenz schneller abgebaut (Wittenbach, 1979). Aber auch lösliche Chloroplastenproteine werden verstärkt abgebaut (Simpson & Dalling, 1981). Die Protein-Proteolyse, insbesondere der Abbau der *Rubisco*, induziert die Aktivität der Endo- und Exopeptidasen. Vor der Translokation in das Phloem werden die entstandenen Aminosäuren im Allgemeinen in Amide umgewan-

delt, da diese eine besonders effiziente Transportform von reduziertem Stickstoff darstellen (Schjoerring, 1991). Aber auch einzelne Aminosäuren gelangen direkt in das Phloem. Einige in die Wurzeln transportierte Aminosäuren und Amide können über das Xylem (Transpirationsstrom) erneut in den Spross zurückbefördert werden (Simpson & Dalling, 1981; Simpson et al., 1983).

Neben der Abnahme des Gehaltes an *Rubisco* ging mit Einsetzen der Seneszenz eine Reduzierung des Gesamtgehaltes löslicher Proteine sowie des Chlorophyll- und Wassergehaltes einher. Darüber hinaus sank die Aktivität der meisten, hauptsächlich an der Photosynthese beteiligten Enzyme (Lawlor et al., 1987a, Ford & Shibbes, 1988). Außerdem induzieren Aminosäuren-Deaminasen, Aminosäuren-Oxidasen und Amino-Dehydrogenasen (Glutamatdehydrogenase) den Aminosäureabbau und bewirken damit ebenfalls die Freisetzung von NH_4^+ in seneszenten Gewebe (Joy, 1988). Wie bereits in der Einleitung beschrieben, erfolgt die Refixierung von freigesetztem NH_4^+ über das GS-GOGAT-Enzymsystem. Der Anstieg der NH_3 -Emissionen während der Seneszenz deutet auf eine ineffiziente NH_4^+ -Assimilation (Refixierung) hin. In Übereinstimmung mit Untersuchungen zahlreicher Autoren (Harper et al., 1987; Schjoerring, 1991; Francis et al., 1993; Olsen et al., 1995) wurde auch in den eigenen Versuchen (Exp. 1-3) ein Anstieg der NH_3 -Emissionen mit Beginn der Seneszenz festgestellt (Abb. 5, 8 [oben] und 10 [unten]). Dabei zeigten die Untersuchungsergebnisse der Experimente 1 und 2, dass die Versuchspflanzen bei niedriger N-Versorgung in Bezug auf die zeitliche Entwicklung das Maximum der NH_3 -Freisetzung (höchste NH_3 -Freisetzungsrates) früher erreicht hatten. Del Molino et al. (1995) stellten fest, dass bei hoher N-Versorgung der Gehalt an löslichen Proteinen und freiem Amino-Stickstoff sowie die Nitratreduktase-Aktivität zu einem Zeitpunkt - 4 Wochen nach Aussaat - noch zunahmen, zu welchem bei niedriger N-Versorgung bereits eine Reduktion an löslichen Proteinen, freiem Amino-Stickstoff und der Nitratreduktase-Aktivität eingesetzt hatte. Darüber hinaus erfolgte diese Abnahme bei niedriger N-Versorgung sehr viel schneller als bei hoher N-Versorgung. Darin wird auch die Erklärung für die in Abhängigkeit von der N-Versorgung beobachteten Verschiebung der NH_3 -Emissionskurven gesehen.

Die Ursache der erhöhten NH_3 -Freisetzung mit Einsetzen der Seneszenz geht auch auf den starken Rückgang der Aktivität des GS-GOGAT-Enzymsystems zurück (Schjoerring, 1991; Sutton et al., 1995). Außerdem führt die Abnahme der GS-GOGAT-Enzymaktivität bei gleichzeitiger Erhöhung der NH_4^+ -Freisetzung infolge des Proteinabbaus (Proteolyse) im Blattgewebe zu einer Sättigung des Transportsystems. Eine Erhöhung der NH_3 -Emissionen ist die Folge (Mattsson & Schoerring, 1997). Auch Peeters & van Laere (1992) stellten in seneszenten Weizenblättern eine intrazelluläre NH_4^+ -Akkumulation bei gleichzeitiger Reduzierung des Proteingehaltes und der GS-Aktivität fest. Häusler et al. (1994) entdeckten eine Art Kompensationsmechanismus, welcher regulierend auf die NH_4^+ -Freisetzung im Blattgewebe einwirkt. Bei einem Abfallen der GS-Aktivität wird die NH_4^+ -Akkumulation eingeschränkt (Häusler et al., 1994). Darüber hinaus geht die stomatare Leitfähigkeit mit wichtiger Kontrollfunktion in Bezug auf die Freisetzung von NH_3 während der Seneszenz stark zurück (Field, 1987).

Viele Autoren aber sehen in einer »Ineffizienz bei der Refixierung von aus dem Proteinabbau freigesetztem NH_4^+ « die Hauptursache für die hohen NH_3 -Emissionen aus seneszenten Pflanzen (Parton et al., 1988; Schjoerring et al., 1993).

4.8. $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -ASSIMILATION

In Getreidepflanzen können 50-80 % des während der Blühphase in vegetativen Pflanzenteilen gespeicherten Stickstoffs später in die Ähren rückverlagert werden (Harper et al., 1987). Die erhöhte Synthese von N-Speichermolekülen (Proteinen) erfordert eine hohe NH_3 -Assimilationskapazität von aufgenommenem, bereits reduziertem Stickstoff. Reicht diese nicht aus, weil Enzymsysteme erschöpft oder benötigte Zwischenprodukte und Energieträger in

nicht ausreichender Menge zur Verfügung stehen, kommt es zwangsläufig zur Freisetzung von NH_3 . Schjoerring & Byskov-Nielsen (1991) beobachteten bei Gerste eine durch hohe $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Konzentrationen im Blattgewebe induzierte NH_3 -Abgabe. Eine dem Bedarf nicht angepasste $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Assimilation infolge unzureichender Enzymaktivität (GS/GOGAT) führt bei gleichbleibender NH_3 -Freisetzung zu einem Ungleichgewicht » NH_3 -produzierender und -verarbeitender Prozesse«. Als Folge kommt es zur Abgabe von NH_3 über die Stomata. Mattsson & Schjoerring (1997) untersuchten den Einfluss einer reduzierten GS-Aktivität auf den NH_3 -Austausch zwischen Pflanzen und Atmosphäre. Eine genetisch bedingt reduzierte GS-Enzymaktivität bei Gerste von »mutant plants« führte gegenüber »wild type plants« zu höheren NH_4^+ -Konzentrationen im pflanzlichen Gewebe und höheren NH_3 -Emissionen. Auch die NH_4^+ -Konzentrationen und der pH-Wert im apoplasmatischen Gewebe waren erhöht. Dagegen waren die Gehalte an Blatt-Aminosäuren und -Proteinen reduziert. Ferner wurde trotz ansteigender GS-Aktivität in den Wurzeln ein Anstieg der NH_4^+ -Konzentration im Xylemsaft und im apoplasmatischen Blattgewebe beobachtet. Die Ursache dafür wurde in einer Begrenzung der GS-Aktivität in den Wurzeln gesehen (Mattsson & Schjoerring, 1997). Auch Walker et al. (1984), Lewis et al. (1992) und Mäck (1995) beobachteten mit zunehmendem NH_4^+ -Angebot über die Wurzeln einen Anstieg der NH_4^+ -Konzentration im Wurzel- und Sprossgewebe und gleichzeitig einen Anstieg der GS-Aktivität. In Untersuchungen von Mattsson & Schjoerring (1996b) korrelierte die Abgabe von NH_3 aus den Versuchspflanzen mit der Aufnahme von NH_4^+ über das Nährmedium.

Mit steigendem Blattalter nahmen in Untersuchungen von Schjoerring et al. (1993) die GS- und GOGAT-Enzymaktivitäten ab, was einen Anstieg des Gehaltes an freien Amiden und freien NH_4^+ -Ionen im Blattgewebe zur Folge hatte. Bereits zu Blühbeginn fiel die Aktivität dieser Enzyme (GS/GOGAT) stark ab. So könnte ein Rückgang der NH_4^+ -Assimilationskapazität ebenso eine Ursache für die, in der eigenen Arbeit festgestellte, erhöhte NH_3 -Freisetzung bei Sommerweizen zum Zeitpunkt der Blüte gewesen sein (zum Beispiel: Exp. 4, Abb. 19). Ein Anstieg der NH_4^+ -Gewebekonzentration, induziert durch die Abnahme der GS- und GOGAT-Aktivitäten, wurde in verschiedenen Untersuchungen zahlreicher Autoren beobachtet (Martin et al., 1983; Kumar et al., 1984; Tobin et al., 1988; Husted & Schjoerring, 1995; Kahl et al., 1997).

4.9. PHOTORESPIRATORISCH FREIGESETZTES NH_3

Es gibt viele Hinweise in der Literatur, dass die Photorespiration einen sehr hohen Beitrag zur Erhöhung der NH_4^+ -Gewebekonzentration im Blatt leistet (Yu & Wo, 1991; Heldt, 1996) und infolgedessen auch an der stomatären NH_3 -Freisetzung stark beteiligt zu sein scheint.

Über die Auswahl der Pflanzenart - Vergleich einer C_4 - und einer C_3 -Pflanze - sollte in der eigenen Arbeit der Anteil des photorespiratorisch freigesetzten NH_3 genauer untersucht werden. Nach Heldt (1996) wird im Photorespirationsweg $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ in sehr hoher Rate freigesetzt. Anhand einer vergleichenden Gegenüberstellung der NH_3 -Emissionen bei Sommerweizen und Körnermais (Exp. 10-12) wurde versucht, den Einfluss der Photorespiration an der Gesamt- NH_3 -Freisetzung exakter zu bewerten. Die Untersuchungen zeigten, dass Körnermais mit typischem C_4 -Syndrom und stoffwechselbedingt stark eingeschränkter Photorespiration (Edwards & Walker, 1983; De Veau & Burris, 1989) gegenüber Sommerweizen, als charakteristische C_3 -Pflanzenart, eine deutlich geringere NH_3 -Freisetzung aufwies. Mais nahm sogar in vielen Untersuchungen NH_3 aus der Umgebungsluft auf (Abb. 42). Dieses Ergebnis gibt bereits einen entscheidenden Hinweis darauf, dass die NH_3 -Emissionen in enger Beziehung zur Photorespiration stehen. Wie die Untersuchungsergebnisse aus Experiment 12 (Abb. 46) der eigenen Arbeit außerdem zeigten, war der pH-Wert im apoplasmatischem Blattgewebe bei Sommerweizen mit pH 6,8 gegenüber Körnermais mit pH 5,8 deutlich erhöht (Abb. 46). Husted & Schjoerring (1995) untersuchten die Beziehung zwischen dem apoplasmatischen pH-Wert und der NH_4^+ -Konzentration im Blattgewebe junger Rapspflanzen. Eine Hemmung

der Glutamin-Synthetase hatte einen Anstieg des pH-Wertes im apoplasmatischen Gewebe (von 6,0 auf 6,8) und einen Anstieg der apoplasmatischen NH_4^+ -Konzentration (von 1,0 auf 25,6 mM) zur Folge. Diese Veränderungen führten gleichzeitig zu einem deutlichen Anstieg der NH_3 -Freisetzung.

Husted & Schjoerring wiesen in dieser Arbeit aber auch auf die methodischen Schwierigkeiten hin, die bei der Gewinnung »reiner Apoplastenflüssigkeit« auftreten. Auch Mühling & Sattelmacher (1995) diskutieren die Methoden und Probleme der Apoplastengewinnung. In ihren Untersuchungen konnten sie kein NH_4^+ im Blatt-Apoplasten nachweisen. Sie vermuten den Grund dafür in einer vollständigen Assimilation des über die Wurzel aufgenommenen NH_4^+ und berufen sich auf eine Arbeit von Pearson & Stewart (1993).

Den Untersuchungsergebnissen von Husted & Schjoerring (1995) zufolge ist der pH-Wert im Apoplasten mit der NH_4^+ -Konzentration positiv korreliert. In der eigenen Arbeit wurde eine vergleichbare Beziehung beobachtet. So wurde bei Weizen im Vergleich zu Mais sowohl ein höherer apoplasmatischer pH-Wert als auch eine deutlich höhere Konzentration an NH_4^+ -Ionen gemessen (Abb. 45, 46). Allerdings erfolgte hier die Bestimmung von NH_4^+ nicht im Apoplasten- sondern im Gesamtsprossgewebe der Versuchspflanzen. In Untersuchungen von Sutton et al. (1995) wurde eine direkte Beziehung zwischen der Höhe der NH_4^+ -Konzentrationen im Blattgewebe, der Höhe der NH_4^+ -Konzentrationen im Xylem und der Höhe der NH_3 -Emissionen festgestellt. Nach Meinung der Autoren sind die NH_4^+ -Konzentrationen im apoplasmatischen Blattgewebe abhängig vom Transpirationsstrom beziehungsweise der NH_4^+ -Konzentration im Xylem. Damit besteht - nach Sutton et al. (1995) - ein kausaler Zusammenhang zwischen den NH_4^+ -Konzentrationen im Gesamt- und im apoplasmatischen Blattgewebe. Auch Mattsson & Schjoerring (1997) stellten diese positive Korrelation fest.

4.10. STOMATABEWEGUNG: KONTROLLE DER NH_3 -ABGABE

Das im Hinblick auf die NH_3 -Freisetzung stark voneinander abweichende Ergebnis bei Weizen und Mais (Exp. 10-12) könnte weiterhin auf das Zusammenwirken von Stomataregulierung und Photorespiration (Cho et al., 1987) zurückzuführen sein.

C_4 -Pflanzen besitzen gegenüber C_3 -Pflanzen die Fähigkeit, ihren Gasaustausch effizienter zu kontrollieren und ihren Wasserverbrauch durch das Schließen der Stomata ohne Einschränkung der Photosyntheseleistung zu reduzieren. Es kommt beinahe zwangsläufig zu einer Verringerung der NH_3 -Freisetzung. In den Experimenten 10 bis 12 wurden diese pflanzenartspezifischen Unterschiede in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung bestätigt. Während bei Weizen kontinuierlich NH_3 freigesetzt wurde, traten bei Mais häufig Phasen der stomatären NH_3 -Aufnahme oder kutikulären NH_3 -Absorption auf. In den Phasen der NH_3 -Freisetzung lagen bei Mais deutlich geringere NH_3 -Abgaberraten vor als bei Weizen. C_4 -Pflanzen weisen eine für sie charakteristische Blattanatomie auf. Aufgenommenes CO_2 wird in ein benachbartes Kompartiment überführt. Dadurch kann das CO_2 -Angebot der Luft besser genutzt werden und die Stomata können unter ungünstigen Bedingungen - insbesondere unter extremer Trockenheit - geschlossen werden. Das bedeutet, dass die Assimilation von CO_2 , bedingt durch den geringeren Wasserbedarf bei der Aufnahme, 'effizienter' ist als bei C_3 -Pflanzen. So ist im Allgemeinen die CO_2 -Assimilation (Photosyntheseleistung) stark an die Transpiration gekoppelt (Borgmann in: Oehmichen, 1983). Der Transpirationskoeffizient stellt das Verhältnis zwischen der durch Transpiration verbrauchten Wassermenge und der erzeugten Trockenmasse einer Pflanze im Verlauf einer Vegetationsperiode dar (= $\text{kg H}_2\text{O} / 1 \text{ kg TM}$). In Abhängigkeit von Bodentyp und Pflanzenart liegt der Transpirationskoeffizient in einer Größenordnung von 300 bis 600. Bei Mais liegt er im niederen, bei Weizen im mittleren und bei Ackerbohne im oberen Bereich. Demzufolge benötigt Mais für die Produktion pflanzlicher Trockenmasse weniger Wasser als Weizen, der seinerseits weniger als Ackerbohne verbraucht. In Bezug auf die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen könnte der Transpirationskoeffizient eine entscheidende Einflussgröße darstellen.

Auch im Hinblick auf den N-Stoffwechsel erweisen sich C₄-Pflanzen als 'effizienter', da infolge des Schließens der Stomata nicht nur der Gasaustausch allgemein, sondern auch die Abgabe von NH₃ unterbunden wird. Dass die Freisetzung von NH₃ vorwiegend über die Stomata erfolgt und daher von der Stomatabewegung abhängig ist, zeigten Untersuchungen über den Tag-Nacht-Rhythmus. Nur unter Lichteinwirkung (tagsüber), bei geöffneten Stomata, wurde in den eigenen Versuchen bei Sommerweizen NH₃ freigesetzt. Während der Dunkelheit (nachts), bei geschlossenen Stomata, wurde hingegen keine NH₃-Freisetzung festgestellt. Dieser mit der Photosynthese in Verbindung stehende Tag-Nacht-Rhythmus der Stomatabewegung wurde auch in anderen Arbeiten beobachtet. In Untersuchungen von Schjoerring & Byskov-Nielsen (1991) trat bei Gerste während der Dunkelphase ebenfalls eine Stagnation der NH₃-Freisetzung ein. Husted et al. (1996) setzten sich mit dem Tag-Nacht-Rhythmus in Bezug auf den NH₃-Gasaustausch bei Pflanzen näher auseinander. Neben der Stomatabewegung machen die Autoren für die NH₃-Freisetzung *Hemmnisse im Ablauf von Stoffwechselprozessen* verantwortlich, welche in Verbindung mit der NH₃-Assimilation (GS/GOGAT-Reaktionsschritte) stehen.

4.11. WECHSELBEZIEHUNGEN ZWISCHEN PHOTOSYNTHESE, TRANSPARATION UND NH₃-FREISETZUNG

Die Photosynthese ist über die Bereitstellung von Energie und Gerüst-Kohlenstoff an der NH₃-Assimilation beteiligt. Eine direkte Wechselbeziehung zwischen Photosynthese und NH₃-Flux zwischen Pflanzen und Atmosphäre konnte aber weder in den Untersuchungen von Husted et al. (1996) noch in den Arbeiten von Parton et al. (1988) und Morgan & Parton (1989) festgestellt werden. Es wird vermutet, dass der NH₃-Flux weniger an die Synthese von Kohlenstoffgerüsten, welche für die NH₃-Assimilation im GS-GOGAT-Reaktionszyklus gebraucht werden, gebunden ist, als vielmehr an Stoffwechselprozesse wie die NO₃⁻-Reduktion, die Photorespiration sowie die Desaminierung. Husted et al. (1996) konnten in ihren Untersuchungen mit Gerste zeigen, dass zwischen der Transpiration und der Photosyntheseleistung der Versuchspflanzen eine streng lineare Korrelation bestand. In der Zeit vom 40. bis zum 60. Tag nach Aussaat stiegen Transpiration und Photosynthese mit zunehmendem Pflanzenalter deutlich an. Im Anschluss daran trat mit fortschreitender Seneszenz bei beiden Prozessen eine kontinuierlich verlaufende Abnahme ein. Dagegen wurde in Bezug auf die NH₃-Freisetzung aus Pflanzen ein Muster beobachtet, welches in Abhängigkeit von der Entwicklungsphase der Pflanze stand (Husted et al., 1996). Auch in Untersuchungen von Schjoerring (1991) trat dasselbe Muster auf. Hier wies die in Beziehung zur pflanzlichen Entwicklung verlaufende NH₃-Freisetzung bei Pflanzen mit mittlerem und hohem N-Versorgungsgrad zwei PEAKs auf. Der erste PEAK mit einer mittleren NH₃-Freisetzungsrate trat zu Beginn des Ährenschiebens etwa 60 Tage nach Aussaat der Pflanzen auf. Im Anschluss daran ging die NH₃-Freisetzungsrate stark zurück und erreichte etwa 70-75 Tage nach Aussaat den *tiefsten Stand*. Folglich wurde die niedrigste NH₃-Freisetzungsrate gegen Ende der Blüte gemessen. Danach setzte ein erneuter, besonders starker NH₃-Emissionsanstieg ein, dessen Maximum bei etwa 90 Tagen nach Aussaat lag. Anschließend folgte ein - zunächst nur leichter - Rückgang der NH₃-Freisetzungsrate. Erst 110 Tage nach Aussaat nahmen die NH₃-Emissionen stärker ab. Der zweite PEAK wurde von dem N-Status der Versuchspflanzen stark beeinflusst. Je höher die N-Versorgung, desto höher der PEAK und folglich die NH₃-Freisetzung während dieser Phase. Bei unzureichender N-Versorgung trat in Untersuchungen von Schjoerring (1991) dieser zweite PEAK nicht auf. Husted et al. (1996) stellten eine Abhängigkeit zwischen der Sorte der Versuchspflanzen und diesem zweiten PEAK fest.

In den eigenen Versuchen mit Sommerweizen (Exp. 1) konnte ein vergleichbares NH₃-Emissionsmuster mit zwei in Abhängigkeit vom Pflanzenalter aufgetretenen PEAKs beobachtet werden (Exp. 1: Abb. 57 im Anhang). Etwa 80-90 Tage nach Aussaat trat ein erster PEAK mit

relativ schwachem Verlauf auf. Nach einem leichten Rückgang der Emissionsrate wurde ab etwa 120 Tagen nach Aussaat ein weiterer, deutlich stärkerer PEAK aufgezeichnet.

Nach Schjoerring (1991) nimmt die Photosynthese über die Photorespiration Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung. Dass die Photorespiration in engem Zusammenhang mit der Photosynthese steht, geht aus Untersuchungen mit $^{14}\text{CO}_2$ hervor. Es wurde gezeigt, dass das Substrat der photorespiratorischen CO_2 -Bildung unmittelbar aus der Photosynthese stammte (Mohr & Schopfer, 1992). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass verschiedene Außenfaktoren, welche die Photosynthese fördern, auch die Photorespiration positiv beeinflussen. So bewirken hohe Sonneneinstrahlung und optimale Temperaturen einen verstärkten CO_2 -Verbrauch im Blattgewebe und eine erhöhte photolytische Produktion von O_2 . Dies begünstigt die Photorespiration (Mengel, 1991). Demzufolge müsste eine hohe Photosyntheseleistung eine »photorespirationsbedingte« erhöhte NH_3 -Freisetzung zur Folge haben. Wie aus Untersuchungen von Morgan & Parton (1989) hervorgeht, scheint dieser Einfluss bei Sommerweizen nicht auffällig stark ausgeprägt zu sein. Auch Kumar et al. (1984) untersuchten die Akkumulation von $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ und den Einfluss der Photorespiration. Das in der Photorespirationsreaktion freigesetzte $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ wird - wie bereits dargestellt - erneut assimiliert, indem es durch das Enzym Glutamin-Synthetase (GS) in Glutamin überführt wird (Wallsgrave et al., 1983). Die Hemmung der Glutamin-Synthetase durch Methionin-Sulphoximin (MSO) hat einen starken Anstieg von NH_4^+ im pflanzlichen Gewebe zur Folge (Kumar et al., 1984; Tobin et al., 1988). Die dadurch induzierte NH_4^+ -Konzentrationserhöhung erfolgte dabei unabhängig von der Form des angebotenen Stickstoffs.

Parton et al. (1988), Morgan & Parton (1989) und Schjoerring (1991) untersuchten das Verhältnis zwischen NH_3 -Emissionen, Photosynthese und Transpiration. Dabei zeigten die verschiedenen Arbeiten, dass die bei seneszenten Pflanzen mit mittlerem und hohem N-Status aufgetretene hohe NH_3 -Freisetzungsrates mit einer deutlichen Abnahme der Photosynthese- und Transpirationsrate verbunden war. Anders verhielt es sich bei Pflanzen mit unzureichender N-Versorgung. Hier nahmen zu Beginn der Seneszenz sowohl die NH_3 -Emissionen als auch die Photosynthese- und Transpirationsleistung gleichzeitig ab (Schjoerring, 1991). Während Stutte et al. (1979) feststellten, dass gasförmige N-Verluste aus Sojabohnenblättern mit der Transpirationsrate positiv korreliert waren, gaben die Untersuchungsergebnisse von Schjoerring (1991) keinen klaren Hinweis auf eine Beziehung zwischen Transpiration und NH_3 -Freisetzung. Dennoch liegt die Vermutung nahe, dass die Transpirationsrate - über den Transport von NH_4^+ beziehungsweise Transport-Amiden im Transpirationsstrom - die apoplasmatische NH_4^+ -Konzentration und damit den NH_3 -Partialdruck im stomatären Spaltöffnungsapparat beeinflusst. Dieser Einfluss scheint von dem NH_4^+ -Influx-Efflux, der über das Plasmalemma der Blattzellen erfolgt und eng in Verbindung mit dem NH_4^+ -Stoffwechsel im Chloroplasten steht, überlagert zu werden (Schjoerring, 1991). In eigenen Versuchen wurde festgestellt, dass Ackerbohne gegenüber Sommerweizen einen um 30 % höheren Wasserverbrauch aufwies (ohne Darstellung). Es wird vermutet, dass die höheren NH_3 -Emissionen bei Ackerbohne und der höhere Wasserverbrauch (Transpirationskoeffizient) in Zusammenhang stehen.

Der Transport von $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ innerhalb der Pflanze erfolgt vor allem in Form von Amiden über den Transpirationsstrom (Heldt, 1996). NH_4^+ wird im Allgemeinen vollständig in organisch gebundene N-Moleküle, zunächst in Amide, umgewandelt (Ivanco & Inguersen, 1971; Raven & Smith, 1976; beide in: Magalhaes et al., 1995). Das Überführen von NH_4^+ in organische Bindung erfolgt im Chloroplasten. Dabei wird NH_3 durch einfache Diffusion über die Membranen oder durch einen spezifischen NH_4^+ -Kanal in die Chloroplasten transportiert und dort über das GS/GOGAT-Enzymsystem eingebaut. Das dabei produzierte Glutamat kann erneut als Aminogruppendonor dienen (Mohr & Schopfer, 1992). Glutamat stellt ein sehr wichtiges N-Speicher- und Transportmolekül dar, das innerhalb der Pflanze über den Transpirationsstrom bewegt wird.

Die Transpirationsrate wird ihrerseits von der Lufttemperatur, der Wasserversorgung und der relativen Luftfeuchte beeinflusst. Über die Stomatabewegung ist die Pflanze in der Lage, auf Umwelteinflüsse zu reagieren und - ihren Bedürfnissen nach - die Transpiration in bestimmtem Umfang zu steuern (Jairo et al., 1994). Nach Morgan & Parton (in Schjoerring, 1991) kann Trockenheit die NH_3 -Freisetzung kurzfristig reduzieren. So induzieren heiße und trockene Bedingungen das Schließen der Stomata (Mansfield, 1985; Jairo et al., 1994). Langfristig kann leichter Wasserstress zum Anstieg der N-Remobilisierung in seneszenten Pflanzenteilen (Morgan, 1988) und zur Reduktion der Akkumulation von remobilisiertem N in reproduktiven Organen führen (Nicolas et al., 1985). Das erhöht den Anstieg der NH_3 -Emissionen. Sich allmählich einstellender Wasserstress kann vorzeitiges Altern bewirken und somit die Freisetzung von NH_3 begünstigen. Dabei können die Gesamt- NH_3 -Emissionen abnehmen. In den eigenen Untersuchungen wurden die Versuchspflanzen während der NH_3 -Verlusterfassung einem »sich langsam einstellendem« Wasserstress (H_2O -Mangel) ausgesetzt. Der Wassergehalt des Bodens ging von über 70 % WK-max. auf 30-35 % WK-max. zurück und wurde auf diesem Niveau gehalten. Wie die Untersuchungsergebnisse (Exp. 14) ergaben, führte Wasserstress zu einer Reduktion der NH_3 -Freisetzung. Dabei wurde beobachtet, dass der Unterschied in der NH_3 -Freisetzungsrates zwischen der Stress- und der Kontrollvariante zunächst sehr gering war, aber im Verlauf der Untersuchungen deutlich zunahm (Abb. 51). Folglich versuchten die Pflanzen bei Einsetzen der Wasserknappheit ihre Stoffwechselaktivität (Photosyntheseleistung) aufrecht zu erhalten. Die gegenüber der Kontrollvariante nur leichte Abnahme der NH_3 -Freisetzung zu Beginn der Untersuchungen deutet auf eine »eingeschränkte Stomataöffnung« hin. Bei weiter zunehmender Wasserknappheit wurden die Pflanzen gezwungen, stärker zu reagieren. Ein Schließen der Stomata war die Folge. Die NH_3 -Freisetzung ging gegenüber der Kontrollvariante zurück. Gleichzeitig wurde die Photosyntheseleistung stark eingeschränkt, was durch die reduzierte Ertragsbildung nach Versuchsablauf bestätigt wurde.

4.12. EINFLUSS DER N-VERSORGUNG (ANGEBOTSMENGE, ANGEBOTSFORM) UND DER ART DER NÄHRIONEN-VERSORGUNG (CHLORID- BZW. SULFATBASIS) AUF DEN N-STOFFWECHSEL UND DIE FREISETZUNG VON NH_3

Einige der genannten, für die NH_3 -Entstehung verantwortlichen Stoffwechselprozesse lassen sich über pflanzenbauliche Maßnahmen sowie über die Ernährung der Pflanzen beeinflussen. Über das N-Angebot im Nährmedium kann systematisch Einfluss auf die N-Aufnahme - Form und Rate betreffend - und die NO_3^- -Reduktion und -Assimilation genommen werden.

N-ANGEBOTSMENGE

Die Versuche mit Sommerweizen, bei denen die Menge des angebotenen Düngernstickstoffs variierte, zeigten unabhängig von der Art des Nährmediums im Allgemeinen einen direkten Zusammenhang zwischen dem N-Versorgungsgrad und der Höhe der NH_3 -Emissionen: Je höher die N-Versorgung, desto höher die NH_3 -Freisetzung (Tab. 30, Tab. 32 (1. Aussaat), Tab. 33 (Versuch 2, 3, 5); Abb. 5, Abb. 8 (oben), Abb. 10 (oben rechts, Mitte rechts, unten)). Eine eingeschränkte N-Versorgung hatte somit die Reduzierung von NH_3 -Emissionsverlusten zur Folge. Dabei muss grundsätzlich geprüft werden, wie weit der N-Düngereinsatz reduziert werden kann, ohne dass es dabei zu relevanten Ertragseinbußen kommt. Eine solche Prüfung unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Zumal, wie die Ergebnisse gezeigt haben, die Gesamt- NH_3 -Emissionen aus Pflanzen in einer Größenordnung liegen, die eine Diskussion über reduzierende Maßnahmen nicht zwingend erscheinen lassen.

Auch in anderen Arbeiten (Schjoerring, 1991; Schjoerring & Byskov-Nielsen, 1991; Olsen et al., 1995) wurde ein Zusammenhang zwischen der Höhe der N-Versorgung und der Höhe der NH_3 -Emissionen beobachtet. Dabei zeigten einige Versuche aber auch eine gegenteilige Ten-

denz. Die Ursache dafür liegt im Einfluss der N-Versorgung auf die physiologische Alterung der Versuchspflanzen. Im Allgemeinen wurde beobachtet, dass Pflanzen unter unzureichender N-Versorgung zu einem früheren Zeitpunkt reiften als unter optimaler N-Versorgung. Auch in den eigenen Untersuchungen wiesen die Pflanzen in Abhängigkeit von ihrem N-Versorgungsgrad während der NH_3 -Messungen unterschiedliche physiologische Entwicklungsstufen auf (Tab. 32 (2. Aussaat), Tab. 33 (Versuch 1, 4); Abb. 8 (unten), Abb. 10 (oben links, Mitte links)). Wie unter 4.5. ausführlich dargestellt spielt das Entwicklungsstadium bzw. das physiologische Alter der Versuchspflanzen im Hinblick auf die Höhe der NH_3 -Freisetzung eine entscheidende Rolle (del Molino et al., 1995). Daher ist es nicht widersprüchlich, dass Pflanzen der N1-Variante während eines bestimmten Untersuchungsabschnittes mehr NH_3 emittieren als Pflanzen der N2-Variante. Wären die Untersuchungen nicht über eine zeitlich begrenzte Versuchsdauer erfolgt und wäre folglich das gesamte von der Pflanze freigesetzte NH_3 erfasst worden, läge ohne Zweifel folgende Beziehung vor: *ein hohes N-Angebot führt zu einer hohen NH_3 -Freisetzung.*

Auch bei den Versuchspflanzen in der eigenen Arbeit wurde unter N-Mangel infolge vorzeitiger Alterungsprozesse früher das Stadium der Seneszenz erreicht als unter optimaler N-Versorgung. Das war der Grund dafür, weshalb in Experiment 3 (Versuche 1 und 4) bei den Pflanzen der N1-Variante bei unzureichender N-Versorgung nach sechs Wochen Vegetationszeit höhere Gesamt- NH_3 -Emissionen gemessen wurden als bei den Pflanzen der N2-Variante mit ausreichender N-Versorgung. Auch die Untersuchungsergebnisse aus den Versuchen 2 und 3 desselben Experiments bestätigten den dargestellten Zusammenhang zwischen N-Angebot, physiologischer Alterung und NH_3 -Freisetzung. Bis circa 10 Wochen nach Aussaat waren hier die NH_3 -Emissionsverluste der N1-Variante gegenüber der N2-Variante erhöht. Im darauffolgenden Messabschnitt stieg die NH_3 -Freisetzungsrate bei den Pflanzen der N2-Variante stark an, während sie bei den Pflanzen der N1-Variante, die zu diesem Zeitpunkt bereits das Ende der N-Remobilisierungsphase erreicht hatten, stark zurückging (Abb. 10a).

Demzufolge sind die reduzierten NH_3 -Emissionsverluste bei mangelnder N-Versorgung nicht nur auf einen eventuell *effizienteren N-Haushalt* zurückzuführen, sondern in jedem Falle auf eine verkürztere Wachstumsperiode. Wachstumsbeobachtungen bestätigen diesen Sachverhalt. Bei unzureichender N-Versorgung wiesen die Versuchspflanzen im allgemeinen eine fortgeschrittenere Entwicklung bei gleichzeitig verminderter Biomassenproduktivität gegenüber den Kontrollpflanzen auf (zum Beispiel: Exp. 1: Tab. 30; Exp. 3: Tab. 33).

Busheva et al. (1991) stellten fest, dass eine niedrige N-Versorgung die »Aktivität des Proteinabbaus« und die N-Mobilisierung und -Translokation in junges, sich entwickelndes Gewebe begünstigt. Das hat zur Folge, dass der Beginn der Seneszenz früher eingeleitet wird (Busheva et al., 1991; Guitman et al., 1991). Dieses Ergebnis bekräftigt die vorangestellten Beobachtungen in der eigenen Arbeit.

In Abhängigkeit von der N-Versorgung (Angebotsmenge) wurde eine unterschiedlich hohe Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche gemessen. Die Alkalität in der pflanzlichen Asche gibt die Menge an organischen Anionen, Carbonaten und Bicarbonaten wieder. So ist die Alkalität auch ein Maß für die »gebundene Säure« und den Kationenüberschuss (Jungk, 1968) und gibt einen Hinweis auf den Gehalt an organischen Säuren. Eine unzureichende N-Versorgung führte zu einer Erhöhung der Konzentration der Alkalität (Exp. 2: Abb. 9; Exp. 3: Abb. 11). Folglich ging mit N-Mangel ein Anstieg der Konzentration an Carbonaten und organischen Anionen einher.

Die organischen Säuren *α -Ketoglutarinsäure* und *Glutaminsäure* fungieren bei der NH_3 -Assimilation über die Glutaminsynthetase und die Glutamatsynthase (GS-GOGAT-Enzymsystem) als NH_3 -Akzeptoren. Eine Erhöhung ihrer Konzentration müsste eine Reduzierung der NH_3 -Freisetzung zur Folge haben. In der eigenen Arbeit wurde in verschiedenen Versuchen (Exp. 2 und 3) eine Beziehung zwischen der Höhe der Gesamt- NH_3 -Freisetzung und der Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche festgestellt. Bei unzureichender N-Versorgung

wiesen die Versuchspflanzen geringere Gesamt-NH₃-Emissionsverluste und gleichzeitig eine höhere Konzentration der Alkalität gegenüber den Kontrollpflanzen auf (Exp. 2: Abb. 8 (oben) und Abb. 9; Exp. 3: Abb. 10 und Abb. 11). Die Ursache dafür könnte in einem unterschiedlich hohen Gehalt an *α*-Ketoglutar- und *Glutaminsäure* und der daraus resultierenden unterschiedlich hohen NH₃-Assimilationskapazität liegen. Nach Woo et al. (1987a,b) ist die Anwesenheit von 2-Oxoglutarat (Anion der *α*-Ketoglutarsäure) Voraussetzung für die effiziente NH₃-Assimilation.

Dagegen hatte der N-Versorgungsgrad auf die Konzentration an freien NH₄⁺-Ionen im oberirdischen Gesamtspross in den eigenen Untersuchungen keinen Einfluss. So wiesen die Versuchspflanzen bei optimaler und unzureichender N-Versorgung keine eindeutigen Unterschiede in Bezug auf die NH₄⁺-Konzentration im pflanzlichen Gewebe auf (Exp. 3: Abb. 12). Die Versuchspflanzen erhielten in diesem Experiment ausschließlich NO₃⁻-Stickstoff. Gerendás (1992) machte in Bezug auf die N-Versorgung und den Gehalt an freiem NH₄⁺ ähnliche Beobachtungen. Damit standen die NH₃-Emissionen (Exp. 2 und 3) - zunächst wider Erwarten - nicht in direkter Beziehung zu der NH₄⁺-Konzentration im oberirdischen Gesamtspross. Es wurde vermutet, dass mit zunehmender N-Angebotsmenge die Konzentration an freien NH₄⁺-Ionen ebenfalls ansteigen würde. Verschiedenen Autoren zufolge werden die NO₃⁻-Aufnahme beziehungsweise NO₃⁻-Reduktion bei jungen, preseneszenten Pflanzen als eine der wichtigsten NH₃/NH₄⁺-produzierenden Prozesse angesehen (Andrews, 1986; Lea, 1991; Olsen et al., 1995). Daher lag die Vermutung nahe, ein hohes N-Angebot führe zu erhöhten NH₄⁺-Gewebekonzentration; bestätigt wurde sie aber nicht. Einen Erklärungsansatz für diesen Sachverhalt - die NH₄⁺-Konzentrationen im pflanzlichen Spross steht in keiner Beziehung zu der Höhe der N-Versorgung - könnte in den Untersuchungsergebnissen von Olsen et al. (1995) gesehen werden. In ihren Versuchen beobachteten Olsen et al. bei Rapspflanzen mit N-Überangebot (N3) geringere N-Aufnahmeraten als bei Pflanzen mit optimaler (N2) und unzureichender (N1) N-Versorgung. Als Ursache vermuteten sie eine Art Rückkopplungsregulierung (Aufnahmehemmung), deren Aktivität - so die Autoren - durch hohe NO₃⁻- und NH₄⁺-Konzentrationen im pflanzlichen Gewebe stimuliert werde. In der Literatur gibt es weitere Hinweise auf das Bestehen einer Rückkopplungsregulierung bei der NO₃⁻- und NH₄⁺-Aufnahme, für deren Aktivierung N-Assimilationsprodukte verantwortlich gemacht werden (Lee & Rudge, 1986; King et al., 1993; Wang et al., 1993).

Im Gegensatz zur Konzentration an freien NH₄⁺-Ionen wurde die Konzentration an löslichen Aminosäuren von der N-Angebotsmenge der Pflanzen deutlich beeinflusst. Bei unzureichender N-Versorgung (N1) wurden gegenüber ausreichender N-Versorgung (N2) geringere Konzentrationen an löslichen Aminosäuren gemessen (Exp. 3: Abb. 13). Caputo & Barneix (1997) machten vergleichbare Beobachtungen. In ihren Untersuchungen wurden im Blattgewebe von 15 Tage alten Weizenpflanzen bei Angebot von 15,0 mM NO₃⁻ 4,5 mal höhere Konzentrationen an löslichen Aminosäuren gemessen als bei Angebot von 1,0 mM NO₃⁻. Dagegen führte in Untersuchungen von Gerendás (1992) eine Erhöhung des NO₃⁻-Angebotes zu einem leichten Rückgang der Konzentrationen an löslichen N-Verbindungen, während eine Erhöhung des NH₄⁺-Angebotes einen starken Konzentrationsanstieg an löslichen N-Verbindungen zur Folge hatte.

Eine hohe Akkumulation löslicher Aminosäuren stellt in Bezug auf den pflanzlichen Stoffwechsel eine *ungünstige Situation* dar, die auf einen Stresszustand der Pflanze schließen lässt. Die bei der Bonitierung beobachteten Wachstumsprobleme deuteten bereits auf eine Stresssituation hin. Die Produktion von löslichen Aminosäuren überstieg den Bedarf. Die Ursache dafür wurde in einer *nicht ausreichend verlaufenden Proteinsynthese* vermutet.

N-ANGEBOTSFORM

Über die N-Angebotsform wird direkter Einfluss auf die NO_3^- -Reduktion und -Assimilation genommen. Während bei Ammoniumernährung unmittelbar nach Aufnahme von NH_4^+ die Assimilation erfolgt, findet bei Nitraternährung vor der eigentlichen Assimilation eine Reduktion von NO_3^- statt. Erst im Anschluss daran kann das Einbeziehen in den N-Stoffwechsel erfolgen. Nitrat kann aber auch in Wurzeln oder Sprossen (Vakuole) gespeichert werden (Wallace & Pate, 1965; Schrader & Thomas, 1981; Salsac et al., 1987).

Die NH_3 -Abgabe aus Pflanzen wird von der N-Angebotsform deutlich beeinflusst (Sutton et al., 1995; Mattsson & Schjoerring, 1996a). Die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen zeigen, dass ausschließlich NH_4^+ -N-Ernährung die NH_3 -Freisetzung fördert, während ausschließlich NO_3^- -N-Ernährung die NH_3 -Freisetzung reduziert. In der eigenen Arbeit wurde dieselbe Wechselbeziehung festgestellt. Bei Angebot von NH_4^+ -N wurden gegenüber dem Angebot von NO_3^- -N sowohl bei Sommerweizen (Exp. 4: Abb. 18) als auch bei Ackerbohne (Exp. 8 und 9: Abb. 38) erhöhte NH_3 -Emissionen gemessen. Bereits von Beginn der Messungen an war die NH_3 -Freisetzung bei Angebot von NH_4^+ -N gegenüber NO_3^- -N erhöht. Die NH_3 -Emissionskurven verliefen bei beiden N-Ernährungsvarianten nahezu parallel zueinander (Abb. 14, 18, 38). Die Kurve der NH_4^+ -N-Ernährungsvariante lag deutlich oberhalb der Kurve der NO_3^- -N-Ernährungsvariante. Auch Ohlsen et al. (1995) beobachteten in ihren Untersuchungen mit Raps, dass die Versorgung mit NH_4^+ -N gegenüber der Versorgung mit NO_3^- -N zu stark erhöhten NH_3 -Emissionsverlusten führte.

Wie die Versuchsergebnisse aus Experiment 4 (Abb. 15 und 20) zeigen, hatte die N-Angebotsform deutlichen Einfluss auf die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche. Die Versorgung mit NO_3^- -N führte gegenüber der Versorgung mit NH_4^+ -N bei Sommerweizen zu einer erhöhten Konzentration der Alkalität im oberirdischen Gesamtprozess der Versuchspflanzen. Auch bei Ackerbohne wurde bei NO_3^- -N-Versorgung eine signifikant höhere Konzentration der Alkalität gemessen als bei NH_4^+ -N-Versorgung. Damit war die Konzentration an organischen Anionen, die über die Alkalität indirekt bestimmt wird, bei NO_3^- -N-Ernährung erhöht. In einer 1968 veröffentlichten Untersuchung von Kirkby wurde bereits gezeigt, dass NO_3^- - gegenüber NH_4^+ -N-Ernährung bei Weißem Senf zu einer starken Erhöhung (um 75 %) der Konzentrationen an organischen Anionen führte.

Die Ursache für die unterschiedlich hohe Konzentration der Alkalität in der Asche in Abhängigkeit von der N-Versorgungsform der Versuchspflanzen liegt in der nach erfolgter Aufnahme stattfindenden Reaktion der NO_3^- - beziehungsweise NH_4^+ -Ionen. Im Falle einer Nitraternährung wird in die Zelle aufgenommenes NO_3^- über NO_2^- zu HNO_2 reduziert, was einen Verbrauch von H^+ zur Folge hat. Diese H^+ -Ionen (Protonen) werden durch Dissoziation von Wassermolekülen bereitgestellt ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$). Die entstandenen OH^- -Ionen werden für die Synthese organischer Anionen verbraucht. Es kommt zu einer Akkumulation von organischen Anionen bzw. organischen Säuren. Ein Anstieg der Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche ist die Folge der Akkumulation organischer Anionen. Dagegen wird bei Ammoniumernährung von der Zelle aufgenommenes NH_4^+ auf direktem Wege assimiliert. Dabei werden organische Anionen verbraucht. Dementsprechend nimmt die Konzentration an organischen Anionen bzw. organischen Säuren ab. Zudem geht die physiologisch basische Wirkung der NO_3^- -N-Ernährung auf die Entstehung und Abgabe von OH^- aus der Nitratreduktion bzw. Nitritreduktion zurück (Marschner, 1993).

Der pH-Wert im Außenmedium (Apoplast) wird von der Form der N-Ernährung deutlich beeinflusst. Bei NO_3^- -N-Ernährung wird gegenüber NH_4^+ -N-Ernährung eine beachtliche Menge an H^+ über den H^+/NO_3^- -Cotransport aus dem Außenmedium in das Cytosol transportiert. Dadurch wirkt das Außenmedium pH-erhöhend (physiologisch basisch). Dagegen wirkt NH_4^+ -N-Ernährung pH-erniedrigend (physiologisch sauer), da das H^+ , welches von der ATPase an

das Außenmedium abgegeben wurde, überwiegend dort verbleibt (Clark, 1982; Gerendás et al., 1990; Mengel, 1991). Die NH_4^+ -Aufnahme bewirkt eine starke Depolarisierung des elektrischen Membranpotentials, wodurch die ATPase stimuliert (Mengel, 1991) und folglich die Netto- H^+ -Freisetzung erhöht wird (Schubert, 1990).

Während der pH-Wert des Nährmediums (Außenmedium) infolge der Ionenaufnahme starken Veränderungen unterworfen ist, kommt es innerhalb der pflanzlichen Zelle zu Reaktionen, die eine Konstanzhaltung des cytoplasmatischen pH-Wertes von 7,0 bis 7,5 sichern. Zum einen sind Protonenpumpen einbezogen, welche H^+ -Ionen aus dem Cytosol in den Apoplasten oder in die Vakuole befördern. Außerdem vermögen organische und anorganische Phosphate und Carbonate sowie Amino- und Carboxylgruppen H^+ zu puffern. Besonders hervorzuheben aber ist das PEP/Malatpuffersystem (*biochemical pH-stat*). Bei starker Bildung von OH^- (pH-Anstieg) in der Zelle kommt es zur Bildung organischer Anionen. Dabei wird zunächst OH^- und CO_2 zur Carboxylierung von PEP verbraucht. Dieser Vorgang wirkt pH-absenkend. Durch Carboxylierung von PEP entsteht Oxalacetat, aus welchem Malat oder andere organischen Anionen gebildet werden können. Besteht die Notwendigkeit den pH-Wert anzuheben, wird Malat decarboxyliert. Dabei wird H^+ verbraucht, was sich pH-erhöhend auswirkt (Mengel, 1991).

Folglich wird über die Synthese und den Abbau organischer Säuren (organischer Anionen) der pH-Wert im Cytoplasma reguliert. So werden zur Anhebung des cytosolen pH-Wertes bei NO_3^- -N-Ernährung organische Säuren synthetisiert. Daher ist die Konzentration an organischen Säuren im pflanzlichen Gewebe bei Angebot von NO_3^- -N höher als bei Angebot von NH_4^+ -N (Van Beusichem et al., 1988). Die organischen Säuren α -KETOGLUTARSÄURE und GLUTAMINSÄURE spielen als NH_3 -Akzeptoren bei der Assimilation von $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ (GS-GOGAT-Enzymsystem) eine entscheidende Rolle (Mengel, 1991). Eine unzureichende Konzentration an α -KETOGLUTAR- und GLUTAMINSÄURE führt unvermeidlich zu einem Anstieg der Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im pflanzlichen Gewebe. Daher wird von einer korrelativen Beziehung zwischen der Konzentration an organischen Säuren und der NH_3 -Freisetzung ausgegangen. Für die reduzierte NH_3 -Freisetzung bei NO_3^- -N gegenüber NH_4^+ -N-Versorgung könnte demnach eine hohe NH_3 -Assimilationsleistung infolge einer »uneingeschränkten GOGAT-Reaktionskapazität« verantwortlich sein.

Die N-Angebotsform spielt in Bezug auf das Kationen-Anionen-Verhältnis in der Pflanze eine entscheidende Rolle. Nach van Beusichem et al. (1988) stellen NH_4^+ - und NO_3^- -Ionen über 70 % der von Pflanzen aufgenommenen Kationen und Anionen dar. Dementsprechend weisen Pflanzen bei Angebot von NH_4^+ -N ein hohes Kationen-Anionen-Aufnahmeverhältnis, bei Angebot von NO_3^- -N dagegen ein hohes Anionen-Kationen-Aufnahmeverhältnis auf (Marschner, 1995). Im Hinblick auf die Akkumulation von Kationen und Anionen in der Pflanze verhält es sich umgekehrt. Bei NH_4^+ -Ernährung werden nur wenige, bei NO_3^- -Ernährung dagegen sehr viele Kationen akkumuliert. Daher ist die Gesamt-Kationen-Konzentration (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) bei NO_3^- -Ernährung gegenüber NH_4^+ -Ernährung deutlich erhöht. Van Beusichem et al. (1988) zeigten in ihrer Untersuchung, dass bei NO_3^- -Ernährung die *Gesamt-Kationen-Konzentration* um 80 % und die Konzentration an organischen Säuren um mehr als 130 % höher war als bei NH_4^+ -Ernährung.

Der Gehalt an Kationen bzw. das *Kationen-Anionen-Verhältnis* im pflanzlichen Gewebe hat Einfluss auf den Gehalt an organischen Anionen (Van Beusichem et al., 1988). NO_3^- -N-Ernährung führt zu einer Akkumulation an organischen Anionen, da mit der Reduktion des Nitrates ein Anstieg des pH-Wertes im Cytosol verbunden ist. So wird - um einen unkontrollierten pH-Anstieg im Cytosol zu verhindern - PEP durch PEP-Carboxylase in Oxalacetat und anschließend in Malat umgewandelt, welches gespeichert werden kann (Schubert, 1996). Daher wird bei NO_3^- -N ernährten Pflanzen eine erhöhte Malat-Konzentration gemessen.

Auch die Kationenaufnahme selbst dürfte, wie die folgenden Zusammenhänge zeigen, für die Akkumulation organischer Anionen mitverantwortlich sein. Die im Plasmalemma lokalisierte

ATPase (Protonenpumpe) scheidet H^+ -Ionen in das Außenmedium ab und bewirkt eine negative Aufladung des Cytoplasmas (Thibaud & Grignon, 1981). Die negative Ladung begünstigt die Aufnahme von Kationen. Verschiedenen Untersuchungen zufolge führte eine derartige Ladungserhöhung zu einer Erhöhung der Kationenaufnahme (Blevin et al., 1978; Rufty et al., 1981). Die über die ATPase in das Außenmedium abgegebenen H^+ -Ionen entstammen aus der Dissoziation von H_2O . Die dabei entstehenden OH^- -Ionen werden für die Synthese organischer Anionen verbraucht. Demzufolge steigt die Konzentration an organischer Anionen bzw. organischen Säuren.

Die Anionenaufnahme erfolgt als H^+ /Anionen-Cotransport (protonierter Anionenkomplex) und wird ebenfalls von der ATPase-Aktivität angetrieben.

Darüber hinaus hatte die N-Angebotsform deutlichen Einfluss auf die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im pflanzlichen Gesamtspross. Die Versorgung mit NH_4^+ -N hatte gegenüber der NO_3^- -N-Versorgung eine Akkumulation freier NH_4^+ -Ionen zur Folge (Exp. 4: Abb. 16). Bereits Jungk (1967) beobachtete, dass es bei extrem hoher Versorgung mit NH_4^+ -N zu einer Anhäufung von NH_4^+ -Ionen kommt und in diesem Falle negative Auswirkungen auf die Ertragsbildung auftraten. Auch Olsen et al. (1995) beobachteten diese Beziehung. Dabei zeigten die Ergebnisse ihrer Untersuchungen, dass insbesondere die NH_4^+ -Konzentration in den Wurzeln bei erhöhtem NH_4^+ -Angebot zunahm. Sutton et al. (1995) stellten bei NH_4^+ -N gegenüber NO_3^- -N-Ernährung im Spross 2½-fach und in den Wurzeln 4-fach höhere NH_4^+ -Gewebekonzentrationen ihrer Versuchspflanzen fest. Gerendás (1992) untersuchte die NH_4^+ -Konzentrationen im Pflanzenextrakt in Abhängigkeit von der N-Angebotsform und der K-Angebotsmenge. Die Versorgung mit NH_4^+ -N führte gegenüber der Versorgung mit NO_3^- -N auch hier zu einer deutlichen Zunahme der NH_4^+ -Konzentration. Ein vermindertes K^+ -Angebot hatte eine besonders starke NH_4^+ -Anreicherung zur Folge. Dieses Ergebnis geht auf das Konkurrenzverhalten in Bezug auf die Aufnahme beider Ionen zurück (Marschner, 1995).

Über die physiologische Ursache der Ammoniumakkumulation bei Versorgung mit NH_4^+ -N gibt es unterschiedliche Erklärungsansätze. So wird über eine Verlagerung von NH_4^+ im Xylem durch Transpiration (Magalhaes & Wilcox, 1983; Findenegg et al., 1989) und über die Verarmung an Kohlenhydraten (Mills & Jones, 1979; Ganmore-Neumann & Kafkafi, 1983) und organischen Säuren (Harada et al., 1968), welche für die Entgiftung (NH_4^+ - (Re)assimilation) entscheidend sind, diskutiert.

Die N-Versorgungsform hatte außerdem deutlichen Einfluss auf die Konzentration an löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe. In den eigenen Versuchen wurde bei NH_4^+ -N gegenüber NO_3^- -N-Ernährung ein deutlicher Anstieg der Konzentration an löslichen Aminosäuren im pflanzlichen Gewebe festgestellt (Exp. 4: Abb. 17). Vergleichbare Beobachtungen machten Magalhaes et al. (1995) bei jungen Maispflanzen. Hier führte die Versorgung mit NH_4^+ - gegenüber NO_3^- -N zu einem Anstieg der Gesamtaminosäurekonzentration von 50 % im Sprossgewebe und 100 % im Wurzelgewebe. Auch Gerendás (1992) fand bei NO_3^- - gegenüber NH_4^+ -N ernährten Pflanzen signifikant geringere Konzentrationen an löslichem, reduziertem Stickstoff beziehungsweise an löslichen Aminosäuren und Amiden. Zahlreiche Autoren beobachteten bei NH_4^+ -ernährten Pflanzen eine enge Beziehung zwischen dem Gehalt an NH_4^+ und dem Gehalt an löslichem, reduziertem Stickstoff (Harada et al., 1968; Goodchild & Givan, 1990; Gerendás, 1992). Auch in der eigenen Arbeit wurden bei NH_4^+ - gegenüber NO_3^- -Ernährung erhöhte Konzentrationen an freiem NH_4^+ und löslichen Aminosäuren im Sprossgewebe festgestellt (Exp. 4: vergleiche Abb. 16 und 17).

In den Untersuchungen von Gerendás (1992) über den Einfluss der Stickstoff- und Kalium-Ernährung auf die NH_4^+ -Konzentration in Maisblättern wurden bei NO_3^- -N-Ernährung ebenfalls signifikant niedrigere Konzentrationen an löslichem, reduziertem Stickstoff gemessen, als bei NH_4^+ -N-Ernährung. Darüber hinaus wurden bei NO_3^- -N ernährten Pflanzen trotz eines reduzierten Kaliumangebotes hohe Kaliumkonzentrationen festgestellt. Bei NH_4^+ -N ernährten

Pflanzen wurden dagegen bei einem erhöhten Kaliumangebot geringere Kaliumkonzentrationen gemessen. Diese Beobachtung geht auf das Konkurrenzverhalten von K^+ - und NH_4^+ -Ionen bei der Aufnahme infolge ähnlicher physikalisch-chemischer Eigenschaften beider Ionen zurück (Marschner, 1995). Gerendás (1992) vermutete, dass NO_3^- -N ernährte Pflanzen eine »effizientere Assimilation endogenen Ammoniums« aufweisen. So ist bekannt, dass durch Kalium eine große Anzahl der Enzyme des anabolen Stoffwechsels aktiviert werden (Mengel, 1991). Hierin könnte ein Erklärungsansatz für die Annahme, *NO₃⁻-N ernährte Pflanzen assimilieren endogenes NH₄⁺ effizienter*, gesehen werden.

Allen & Smith (1986) beobachteten eine starke Verschiebung im Aminosäuremuster bei NH_4^+ -N ernährten Pflanzen, welche sie in Beziehung zu einer ammoniuminduzierten Störung im Proteinaufbau setzten. Darin, so wird vermutet, könnte auch die Ursache für die im Allgemeinen zu beobachtenden Wachstumsdepressionen liegen. Givan (1979) sieht in der erhöhten Amidkonzentration im Sprossgewebe NH_4^+ -N ernährter Pflanzen die Reaktion einer notwendigen Entgiftung des aufgenommenen Ammoniums. So verläuft die Säureamid-synthese - vor allem die Synthese von Glutamin und Asparagin - immer dann besonders intensiv, wenn die Pflanze über ein hohes NH_4^+ -Angebot verfügt (Mengel, 1991).

KATIONEN-ANIONEN-ERNÄHRUNG

Über die Art der angebotenen Nährionen - »sulfatische« und »chloridische« Nährsalze - wurde versucht, auf die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen direkten Einfluss zu nehmen. Es wurde vermutet, dass eine »Sulfat-Ernährung« eine Reduzierung der NH_3 -Freisetzung zur Folge haben würde. »Sulfat ernährte« Pflanzen akkumulieren gegenüber »Chlorid ernährten« Pflanzen mehr organische Anionen, da die Aufnahme von Chloridionen *leichter* erfolgt als die Aufnahme von Sulfationen. Wie bereits Untersuchungen von Hiatt 1967 zeigten, fördern leicht aufnehmbare Anionen die Kationenaufnahme und reduzieren die Konzentration an organischen Säuren. Das Kationen-Anionen-Verhältnis ist allerdings bei Angebot *schwer* aufnehmbarer Anionen - z.B. K_2SO_4 - gegenüber dem Angebot *leicht* aufnehmbarer Anionen - z.B. KCl - um ein vielfaches erhöht (Hiatt 1967).

Wie bereits dargestellt, wird die Kationenaufnahme durch die Protonenabgabe angetrieben, welche ihrerseits auf die ATPase-Aktivität zurück zu führen ist (Mengel, 1991). Die erforderlichen Protonen (H^+ -Ionen) entstammen der Aufspaltung von H_2O . Die dabei zusätzlich freigesetzten OH^- -Ionen verursachen einen Anstieg des pH-Wertes im Cytoplasma. Über das *BIOCHEMICAL PH STAT SYSTEM* ist die pflanzliche Zelle in der Lage, entsprechend zu reagieren und den cytoplasmatischen pH-Wert konstant zu halten (Schubert, 1996). Während im Falle einer Erhöhung des pH-Wertes die PEP-Carboxylase aktiviert und aus PEP unter Einwirkung von OH^- und CO_2 (HCO_3^-) Oxalacetat gebildet wird, erfolgt im Falle einer Absenkung des pH-Wertes eine Decarboxylierung von Malat - durch das Malatenzym. Es entsteht Pyruvat (Mengel, 1991). Folglich kommt es zum Zwecke der pH-Wert-Regulierung zur Synthese oder zum Abbau organischer Säuren. Während eine verstärkte Kationenaufnahme die Synthese und damit eine Akkumulation von organischen Säuren hat, wird bei verstärkter Anionenaufnahme ein Abbau organischer Säuren vermutet.

Wie die Literaturrecherchen gezeigt haben, besteht zwischen der Konzentration an organischen Säuren und der Konzentration an freiem NH_4^+ eine negative Korrelation. Daher wurde angenommen, dass »Sulfat-Ernährung« mit einem hohen Kationen-Anionen-Verhältnis gegenüber »Chlorid-Ernährung« mit einem geringen Kationen-Anionen-Verhältnis eine Reduktion der NH_4^+ -Konzentration im Sprossgewebe zur Folge haben würde. Der NH_3 -Partialdruck innerhalb der Pflanze müsste unter diesen Bedingungen abnehmen und die stomatare NH_3 -Freisetzung entsprechend reduziert werden. Das bedeutet, »Sulfat-Ernährung« müsste zu einer Reduktion der NH_3 -Emissionsverluste führen. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen (Exp. 5) bestätigten diese Vermutungen. »Sulfat-Ernährung« führte gegenüber »Chlo-

rid-Ernährung zu einer deutlichen Abnahme der NH_3 -Freisetzung (Abb. 23). Außerdem wurden bei *Sulfat-Ernährung* geringere Konzentrationen an NH_4^+ (Abb. 25) und löslichen Aminosäuren (Abb. 26) festgestellt, obwohl bei beiden Varianten ausschließlich NH_4^+ -N eingesetzt worden war. *Sulfat ernährte* Pflanzen wiesen gegenüber *Chlorid ernährten* Pflanzen eine höhere Konzentration der Alkalität und folglich eine höhere Konzentration an organischen Anionen im Gesamtsprossgewebe auf (Abb. 24).

Die eigenen Untersuchungen zeigten eindeutig, dass die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen mit der Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen im Spross positiv und mit der Konzentration an organischen Anionen negativ korreliert war. Ferner wurde erneut eine positive Korrelation zwischen der Konzentration an NH_4^+ und der Konzentration an löslichen Aminosäuren im Spross festgestellt. Die Akkumulation an löslichen Aminosäuren und Amiden deutet darauf hin, dass die Produktion und Bereitstellung dieser Stoffwechselprodukte über den Bedarf hinaus erfolgte. Auch eine 'Erschöpfung' der Kapazität *weiterverarbeitender Prozesse* kann nicht ausgeschlossen werden. So liegt die Vermutung nahe, dass die Proteinsynthese eingeschränkt oder gestört war. Darüber hinaus gibt die Anreicherung von NH_4^+ Anlass zur Vermutung, dass auch die Assimilation von NH_4^+ in nicht ausreichendem Umfang erfolgte. Dabei wird angenommen, dass das GS-GOGAT-Enzymsystem bei zu hohem NH_4^+ -Konzentrationsdruck überlastet war. Verschiedene Autoren führen hohe NH_4^+ -Konzentrationen im pflanzlichen Gewebe auf Störungen im photorespiratorischen Kreislauf zurück (Sauer et al., 1987, in: Gerandás, 1992). Unter *normalen Bedingungen* wird das im Photorespirationsweg freigesetzte endogene NH_4^+ über das GS-GOGAT-Enzymsystem mit hoher Effizienz refixiert (Heldt, 1996). Eine *Überlastung* dieses Enzymsystems hat zwangsläufig ein Erliegen - zumindest aber eine Einschränkung - der NH_4^+ -Assimilation zur Folge. Dieser Sachverhalt bekräftigt die These, dass ein gehemmter oder gestörter Ablauf der GS-GOGAT-Enzymreaktionen für die NH_4^+ -Akkumulation im pflanzlichen Gewebe zumindest mitverantwortlich zu sein scheint.

N_2 -FIXIERUNG - EIN NH_3 -FREISETZENDER PROZESS?

Auch die N_2 -Fixierung bei Leguminosen muss als Ursache für den Anstieg der Konzentration an endogenem NH_4^+ und demzufolge auch als Ursache für die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen diskutiert werden.

Wie die vergleichende Gegenüberstellung der NH_3 -Emissionsverluste aus Sommerweizen und Ackerbohne ergab, war die NH_3 -Abgabe bei Ackerbohne deutlich erhöht (Exp. 6 und 7: Abb. 32 und 36). Dabei konnten zunächst keine Rückschlüsse auf die Ursache der unterschiedlich hohen NH_3 -Freisetzung gezogen werden. Schließlich erfolgte ein Vergleich von zwei verschiedenartigen Pflanzenarten mit unterschiedlichem Blattflächenindex, unterschiedlichem Transpirationskoeffizienten und insbesondere unterschiedlichem N-Stoffwechsel, um nur einige in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung relevanten pflanzenartspezifischen Unterschiede zu nennen. Um den Prozess der N_2 -Fixierung im Hinblick auf die Veränderung der Konzentration an NH_4^+ im pflanzlichen Gewebe, mit - vermutlich direktem - Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung genauer zu untersuchen, wurden entsprechende Versuche mit Ackerbohne durchgeführt. In Experiment 9 wurde zwischen MINERALISCHER N-ERNÄHRUNG (NO_3^- - und NH_4^+ -Versorgung) und SYMBIONTISCHER N-ERNÄHRUNG unterschieden. Die für die N_2 -Fixierung erforderliche Symbiose mit Rhizobien kann durch Beimpfung gefördert, durch die Düngung mit mineralischem Stickstoff gehemmt (Bishop et al., 1976; Houwaard, 1979, 1980) oder durch Sterilisierungsmaßnahmen ganz unterbunden werden.

Wie die Versuchsergebnisse aus Experiment 9 (Versuche 1 und 2) zeigten, gab es zwischen den symbiontisch und den NH_4^+ -N ernährten Ackerbohnen in Bezug auf die Höhe der absoluten NH_3 -Emissionsverluste nur geringe Unterschiede. So emittierten die symbiontisch ernährten Pflanzen lediglich zwischen 6 % (in Versuch 1) und 10 % (in Versuch 2) mehr NH_3 als die NH_4^+ -N ernährten Pflanzen (Abb. 38b). Unter Einbeziehung des N_t -Gehaltes in der Tro-

ckenmasse zur Zeit der Ernte lagen allerdings die NH_3 -Emissionen der NH_4^+ -N ernährten Pflanzen auf höherem Niveau (Tab. 43, letzte Spalte). Dieses Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass die Pflanzen dieser Variante sowohl die geringsten Trockengewichte, als auch die geringsten N_t -Konzentrationen aufwiesen, gleichzeitig aber eine verhältnismäßig hohe Menge an NH_3 freisetzen. In Untersuchungen von Plies-Balzer (1993) erzielten Ackerbohnen bei Versorgung mit NH_4^+ -N ebenfalls geringere Frisch- und Trockengewichte als bei Versorgung mit NO_3^- -N.

Gegenüber NO_3^- -N-Ernährung waren die Gesamt- NH_3 -Emissionen bei symbiontischer Ernährung um 50-60 % erhöht. Die Erträge (TS) und N-Entzüge waren bei NO_3^- -N-Ernährung im Vergleich zur symbiontischen Ernährung etwas erhöht, wodurch der Unterschied in der Höhe der NH_3 -Emissionen in Bezug auf den N_t -Gehalt zur Zeit der Ernte noch zunahm (Tab. 43, letzte Spalte). Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass die N-Versorgung über die Symbiose mit N_2 -fixierenden Knöllchenbakterien einen wichtigen Beitrag an der Gesamt- NH_3 -Freisetzung leistet. Dabei lässt sich über die eigentliche Ursache der NH_3 -Abgabe zunächst nur spekulieren. So könnte die Nitrogenaseaktivität (N_2 -Fixierungsprozess) oder eine eventuell bestehende N-Ineffizienz, bedingt durch eine uneingeschränkte N-Versorgung, an der erhöhten NH_3 -Freisetzung bei symbiontisch ernährten Ackerbohnen verantwortlich sein.

Die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche war bei NO_3^- -N-Ernährung gegenüber NH_4^+ -N und symbiontischer Ernährung deutlich erhöht. Plies-Balzer (1993) machte vergleichbare Beobachtungen. Auch bei den Versuchen mit Sommerweizen lag die Konzentration der Alkalität im Gesamtspross bei NO_3^- -N-Ernährung sehr viel höher als bei NH_4^+ -N-Ernährung (Exp. 4: Abb. 15 und 20). Außerdem wurde hier ein Zusammenhang zwischen der NH_3 -Freisetzung und der Konzentration der Alkalität festgestellt (Abb. 14, 15 sowie 18, 19 und 20). Wie erwähnt, gibt die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche Auskunft über den Gehalt an organischen Anionen. Bei einer geringen Konzentration der Alkalität dürfte infolge niedriger Gehalte an organischen Anionen bzw. organischen Säuren die NH_4^+ -Assimilationskapazität eingeschränkt und die NH_3 -Freisetzung folglich erhöht sein. Umgekehrt wird bei einer geringen NH_3 -Freisetzung von einer erhöhten Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche ausgegangen. Diese Wechselbeziehungen konnten in den Versuchen mit Sommerweizen beobachtet werden. Die Ergebnisse über die Konzentration der Alkalität und die Höhe der NH_3 -Emissionen bei Ackerbohne aus den Experimenten 8 und 9 (Abb. 38 und 39) lassen vermuten, dass auch bei mineralisch ernährten Ackerbohnen diese Wechselbeziehungen bestanden. Die Versorgung mit NO_3^- -N hatte gegenüber der Versorgung mit NH_4^+ -N einen Konzentrationsanstieg der Alkalität und eine Abnahme der NH_3 -Freisetzung bei Ackerbohnen zur Folge. Ferner waren die Konzentrationen an freien NH_4^+ -Ionen und löslichen Aminosäuren im Sprossgewebe bei NO_3^- -N- gegenüber NH_4^+ -N-Ernährung reduziert (Abb. 40 und 41). Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit dem Ergebnis aus Experiment 4 (Versuche mit Sommerweizen; Abb. 16, 17). Auch in anderen Arbeiten wurde bei NH_4^+ -behandelten Pflanzen eine NH_4^+ -Anreicherung festgestellt (Sauer et al., in: Gerendás, 1992).

Es wird erneut angenommen, dass die erhöhten Konzentrationen an löslichen Aminosäuren und NH_4^+ -Ionen im Sprossgewebe bei NH_4^+ -N-Ernährung auf eine gehemmte oder gestörte Proteinsynthese zurückzuführen waren. Damit ließe sich auch die Beeinträchtigung des Wachstums der Pflanzen, wie sie bei den entsprechenden Experimenten beobachtet wurde, erklären. Auch in anderen Arbeiten gingen mit einer hohen NH_4^+ -Akkumulation im pflanzlichen Gewebe Wachstumsdepressionen und Ertragseinbussen einher (Jungk, 1968; Maynard & Barker, 1969). Zu niedrige Kaliumkonzentrationen als Folge einer ammoniuminduzierten Hemmung der Kaliumaufnahme (Gashaw & Mugwira, 1981; Chaillou et al., 1986) können ebenso als Ursache der eingetretenen Wachstumsdepressionen in Betracht gezogen werden. In der eigenen Arbeit erfolgte zwar keine analytische Bestimmung der Kaliumkonzentrationen, doch ist bekannt, dass NH_4^+ -N gegenüber NO_3^- -N ernährten Pflanzen deutlich geringere Ka-

liumkonzentrationen aufweisen, die in zahlreichen Untersuchungen ertragsbeeinträchtigende Wirkung zeigten (Gerendás, 1992). Kalium aktiviert zahlreiche Enzyme des anabolen Stoffwechsels (Mengel, 1991) und spielt infolgedessen für das Wachstum der Pflanzen eine entscheidende Rolle.

Bei den symbiontisch ernährten Pflanzen lag die Konzentration der Alkalität in der pflanzlichen Asche höher als bei den NH_4^+ -N ernährten, aber deutlich niedriger als bei den NO_3^- -N ernährten Pflanzen (Abb. 39). In Bezug auf die freien NH_4^+ -Ionen und löslichen Aminosäuren im oberirdischen Sprossgewebe wurden bei den symbiontisch gegenüber den mineralisch ernährten Pflanzen die geringsten Konzentrationen festgestellt (Abb. 40 und 41). Niedrige Konzentrationen an löslichen Aminosäuren - und Amiden - deuten darauf hin, dass deren Produktion bzw. Bereitstellung dem Bedarf der Pflanze entsprach. Die Proteinsynthese verlief demzufolge ungestört.

Die NH_3 -Freisetzung war bei den symbiontisch gegenüber den mineralisch ernährten Ackerbohnen erhöht, wenngleich der Unterschied zu den NH_4^+ -N ernährten Pflanzen nur gering war (Tab. 43; Abb. 38). Folglich gab es in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung und die Konzentration an freien NH_4^+ -Ionen bei den symbiontisch ernährten Pflanzen keine positive Korrelation: trotz geringer NH_4^+ -Konzentration war die NH_3 -Abgabe im Vergleich zu den NH_4^+ -N ernährten Pflanzen erhöht. Dieses Ergebnis führt zu der Annahme, dass hier die erhöhte NH_3 -Freisetzung nicht auf eine unzureichende NH_4^+ -Assimilationskapazität zurückzuführen war. Die Höhe der Konzentration der Alkalität bzw. der daraus gezogene Rückschluss auf den Gehalt an organischen Anionen lässt - den mehrfach dargestellten Wechselbeziehungen zufolge - ebenfalls vermuten, dass keine *Auslastung* der NH_4^+ -Assimilationskapazität vorlag. So stellt sich die Frage, ob die erhöhte NH_3 -Freisetzung durch die N_2 -Fixierung selbst (Nitrogenase-Aktivität) induziert wurde. Als Produkt der N_2 -Fixierung liefern die Bakterioide über einen spezifischen Kanal der Symbiosomen-Membran der Wirtszelle NH_4^+ , welches dort vor allem zu Glutamin und Asparagin umgesetzt und über die Xylemgefäße der Pflanze zur Verfügung gestellt wird (Heldt, 1996). Die Glutaminsynthetase und die Asparaginsynthetase als cytosolische Enzyme der Wirtszelle katalysieren die Überführung des reduzierten Stickstoffs (NH_4^+) in organische Bindung (Glutamin und Asparagin) (Richter, 1998). Es stellt sich die weitere Frage, ob das gesamte von den Bakteroiden gebildete NH_4^+ in der Wirtszelle umgesetzt wird oder der NH_4^+ -Konzentrationsdruck eventuell so groß werden kann, dass NH_3 bereits im Wurzelbereich freigesetzt werden muss. Kommt es vielleicht bereits im Wurzelbereich zu einer NH_3 -Abgabe? Diese Fragen lassen sich derzeit nicht beantworten, doch zeigen die Ergebnisse, dass die »Nitrogenase-Aktivität« (N_2 -Fixierung) in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung eine Rolle zu spielen scheint.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Höhe von NH_3 -Emissionen aus Pflanzen unter Einsatz einer direkten und einer indirekten Methode zu erfassen. Abschließend sollte es möglich sein, eine Wertung der aus der Literatur bekannten und diskutierten Diskrepanzen über die tatsächliche NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen vorzunehmen.

Darüber hinaus sollten die Faktoren weiter untersucht werden, welche die Höhe der NH_3 -Emissionen aus Pflanzen beeinflussen. Dabei galt es, die NH_3 -Freisetzung in Abhängigkeit von der N-Ernährung der Pflanzen sowie der angebotenen Nährionenart - auf *Sulfat-* oder *Chloridbasis* - zu untersuchen.

Ein weiteres Ziel war es, den aus der Literatur bekannten Zusammenhang zwischen NH_3 -Abgabe und physiologischer Entwicklung sowie den Einfluss stoffwechselspezifischer Eigenschaften auf die Abgabe von NH_3 zu prüfen.

Gegenstand der Arbeit war außerdem, der Frage nach dem Vorkommen weiterer gasförmiger N-Verluste (NO_x , N_2O) aus Pflanzen nachzugehen. Dabei musste vorab ein geeignetes Haubensystem entwickelt werden. Im Falle der tatsächlichen Freisetzung von weiteren gasförmigen N-Verbindungen - insbesondere von N_2O - sollte deren Bedeutung in Bezug auf die N-Bilanz der Pflanzen geprüft werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollte es möglich sein, eine Gesamtbeurteilung über pflanzliche NH_3 -Emissionen durchzuführen. Dabei sollte zum einen die Bedeutung der NH_3 -Verluste für die Pflanze selbst, zum anderen sollten auch umweltrelevante Aspekte berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der N-Bilanzierung und der Messergebnisse der Windtunnelmethode im N-Bilanzierungsversuch mit Sommerweizen gaben Anlass zur Annahme, dass nur die durch direkte Messung im Windtunnel erhobenen Daten die realen NH_3 -Emissionsverluste aus Pflanzen wiedergeben. Dadurch lassen sich auch die aus der Literatur bekannten Diskrepanzen über die tatsächliche NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen deuten und gemäß den gewonnenen Erkenntnissen neu bewerten.

Das selbst entwickelte Haubengefäßsystem stellte in Bezug auf die Erfassung von NH_3 eine vereinfachte und zuverlässige Ergänzung zum Windtunnel dar. Dadurch ließ sich die Annahme, die direkte Meßmethode liefere die realen NH_3 -Emissionsverluste, weiter bekräftigen. Auch bei der Erfassung von N_2O -Konzentrationsveränderungen erwies sich das Haubengefäßsystem als geeignet.

- Im Hinblick auf die für die NH_3 -Freisetzung relevanten Einflussfaktoren konnten klare Zusammenhänge festgestellt werden.

Der N-Versorgungsgrad der Versuchspflanzen hatte deutlichen Einfluss auf die Höhe der NH_3 -Emissionen bei Sommerweizen. Erhöhtes N-Angebot führte im allgemeinen zu erhöhten Gesamt- NH_3 -Emissionsverlusten. Überdies traten unter N-Mangel zeitweise auch negative Netto- NH_3 -Emissionen auf, was einer Aufnahme von NH_3 entspricht.

Die N-Angebotsform (NO_3^- -N, NH_4^+ -N) beeinflusste das NH_3 -Emissionsverhalten der Versuchspflanzen ebenfalls deutlich. Die Versorgung mit ausschließlich NH_4^+ -N führte sowohl bei Sommerweizen als auch bei Ackerbohnen gegenüber der Versorgung mit ausschließlich NO_3^- -N zu einer verstärkten Freisetzung von NH_3 .

Über die Art der Nährionenversorgung (*sulfatisch* oder *chloridisch*) wurde Einfluss auf den pflanzlichen Stoffwechsel mit entsprechenden Auswirkungen auf das NH_3 -Emissionsverhalten der Versuchspflanzen genommen. Eine *sulfatbetonte* Ernährung hatte

gegenüber einer *chloridbetonten* Ernährung eine Reduktion der NH_3 -Emissionsverluste bei Sommerweizen zur Folge.

- Alle - insbesondere über einen längeren Messzeitraum - erhobenen NH_3 -Emissionsdaten zeigten, dass die Höhe der NH_3 -Freisetzung stark an die Entwicklung und das Alter der Pflanzen gebunden ist. Daraus konnte abgeleitet werden, dass bestimmte physiologische Stoffwechselprozesse in verschiedenen Wachstumsphasen die Freisetzung von NH_3 zur Folge haben.

- Der Einfluss stoffwechselspezifischer Eigenschaften auf die Abgabe von NH_3 konnte anschaulich dargestellt werden.

Wie die vergleichende Gegenüberstellung der NH_3 -Emissionen von Sommerweizen und Körnermais ergab, emittierte Mais (C_4 -Pflanzenart) gegenüber Weizen (C_3 -Pflanzenart) deutlich geringere Mengen an NH_3 . In Nährlösungskulturversuchen waren bei Mais sogar überwiegend Phasen der Aufnahme von NH_3 aus der Atmosphärenluft zu beobachten.

Damit konnte die in der Literatur dargestellte These, die Photorespiration nehme in Bezug auf die Freisetzung von NH_3 eine maßgebende Position ein, bestätigt werden. Zusätzlich wird Mais eine effektivere NH_3 -Assimilation (*positiverer Nettoprozess*) zugeschrieben.

Bei Ackerbohnen traten gegenüber Sommerweizen insgesamt höhere NH_3 -Emissionsverluste auf. Die vergleichende Gegenüberstellung mineralisch und symbiontisch ernährter Ackerbohnen ergab, dass die über die Symbiose mit Rhizobien erfolgte N-Versorgung der Pflanzen gegenüber NH_4^+ -N-Ernährung einen leichten Anstieg der NH_3 -Freisetzung zur Folge hatte. Offen blieb, ob dabei eine weniger effektive N-Umsetzung oder der Prozess der N_2 -Fixierung über die Nitrogenase Ursache für dieses Ergebnis war.

- Bei Sommerweizen wurden N_2O -Flüsse bzw. -Konzentrationsveränderungen zwischen oberirdischem Pflanzenspross und umgebender Atmosphärenluft festgestellt.

Bei NO_3^- -N-Ernährung wurde grundsätzlich eine Abgabe von N_2O beobachtet. Bei NH_4^+ -N-Ernährung traten Phasen der N_2O -Abgabe und Phasen der N_2O -Aufnahme auf.

Die Ergebnisse zeigten, dass über pflanzenbauliche Maßnahmen Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen genommen werden kann. Insbesondere die N-Ernährung beeinflusst die Abgabe von NH_3 . Dabei lagen die NH_3 -Emissionen insgesamt gesehen auf sehr niedrigem Niveau, so dass diese Art der NH_3 -Freisetzung weder in Bezug auf umweltrelevante Aspekte noch aus *pflanzenphysiologischer Sicht* von Bedeutung sein dürfte.

Die höchsten N-Verluste in Form von NH_3 -Emissionen wurden bei den symbiontisch und den mit NH_4^+ -N ernährten Ackerbohnen mit bis zu 120 mg NH_3 -N pro m^2 innerhalb von 15 Tagen (29 bis 43 Tage nach Aussaat) verzeichnet. Die niedrigsten NH_3 -Emissionen lagen bei Körnermais mit maximal 2 mg NH_3 -N pro m^2 innerhalb von 18 Tagen (22 bis 40 Tage nach Aussaat) vor.

Diesen Ergebnissen zufolge bestehen in Bezug auf die NH_3 -Freisetzung aus Pflanzen große artspezifische Unterschiede, die auf bestimmte stoffwechselphysiologische Prozesse - wie Photorespiration und N_2 -Fixierung über die Nitrogenase - zurückzuführen sind.

Die Konzentrationsveränderungen an N_2O im oberirdischen Sprossbereich bei Sommerweizen lagen nahe an der Nachweisgrenze. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass die Versorgung mit NO_3^- -N die Abgabe von N_2O begünstigt.

- Allen, S., & Smith, J.A.C. (1996):** Ammonium nutrition in *Ricinus communis*: Its effect on plant growth and the chemical composition of the whole plant, xylem and phloem saps. *J. Exp. Bot.* 37, 1599-1610.
- Amberger, A. (1988):** Pflanzenernährung. 3. Auflage, Ulmer Verlag.
- Amundson, R.G., & Davidson, E.A. (1990):** Carbon dioxide and nitrogenous gases in the soil atmosphere. *J. Geochem. Explor.* 83, 13-41.
- Andrews, M. (1986):** The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of higher plants. *Plant Cell Environ.* 9, 511-519.
- Becker, M., Ladha, J.K., & Ottow, J.C.G. (1994):** Nitrogen losses and lowland rice yield as affected by residue nitrogen release. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1660-1665.
- Beese, F. (1994):** Gasförmige Stickstoffverbindungen - Stickoxide und Distickstoffoxide; In: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" (Hrsg.), Economica Verlag, Bonn.
- Bertelsen, F., & Jensen, E.S. (1992):** Gaseous nitrogen losses from field plots grown with pea (*Pisum sativum* L.) or spring barley (*Hordeum vulgare* L.) estimated by ¹⁵N mass balance and acetylene inhibition techniques. *Plant Soil* 142, 287-295.
- Bishop, P.E., Guevara, J.G., Engelke, J.A., & Evans, H.J. (1976):** Relation between glutamin synthetase and nitrogenase activities in the symbiotic association between *Rhizobium japonicum* and *Glycine max*. *Plant Physiol.* 47, 542-546.
- Blevins, D.G., Barnett, N.M., & Frost, W.B. (1978):** Role of potassium and malate in nitrate uptake and translocation by wheat seedlings. *Plant Physiol.* 62, 784-788.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 1993):** Klimaschutz in Deutschland - Nationalbericht der Bundesregierung für die Bundesrepublik Deutschland, BMU (Hrsg.), Bonn.
- Borgmann, F., in: Oehmichen, J. (1983):** Ertragshöhe und Transpiration. Pflanzenproduktion, Band 1: Grundlagen, Verlag Paul Parey · Berlin und Hamburg, S. 299-300.
- Braschkat, J. (1996):** Ammoniakverluste nach Ausbringung von Rinderflüssigmist auf Dauergrünland: Einflussfaktoren und Schätzung. Dissertation im Fachbereich Agrarwissenschaften I (Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie), Institut für Pflanzenernährung d. Universität Hohenheim, Verlag Ulrich E. Grauer Stuttgart.
- Bruckner, G. (1996):** Deposition und oberirdische Aufnahme von gas- und partikelförmigem Stickstoff aus verschiedenen Emissionsquellen in ein Fichtenökosystem. Dissertation, Bayreuther Forum Ökologie, bfö Band 29.
- Buijsman, E., Maas, H.F.M., & Asman, W.A.H. (1987):** Anthropogenic NH₃ emissions in Europe. *Atmos. Environ.* 21, 1009-1022.
- Caputo, C., & Barneix, A.J. (1997):** Export of amino acids to the phloem in relation to N supply in wheat. *Physiol. Plant.* 101, 853-860.
- Chaillou, S., Morot-Gaudry, J.-F., Salsac, L., Lesaint C., & Jolivet, E. (1986):** Compared effects of NO₃ and NH₄ on growth and metabolism of French bean. *Physiol. Vég.* 24, 679-687.
- Chang, C., Janzen, H.H., Cho, C.M., & Nakonechny, E.M. (1997):** Nitrous oxide emission from barley and canola plants. Proceedings of the 7th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions. Cologne, Germany, April 21-23, S 207-213.

- Cho, C., Ishi, R., Hyeon, S.-B., & Suzuki, A. (1987):** Stomatal regulation by aminoacetonitrile, a photorespiration inhibitor. *Plant Cell Physiol.* 28, 1407-1410.
- Clark, R.B. (1982):** Nutrient solution growth of sorghum and corn in mineral nutrition studies. *J. Plant Nutr.* 5, 1039-1057.
- Court, M.N., Stephen, R.C., & Waid, J.S. (1964):** Toxicity as a cause of the inefficiency of urea as fertilizer. *Soil Sci.* 50 (15) 42-48.
- Daum, D., & Schenk, K. (1996a):** Influence of nitrogen concentration and form in the nutrient solution on N₂O and N₂ emissions from a soilless culture system. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 159, 557-563.
- Daum, D., & Schenk, K. (1996b):** Gaseous nitrogen losses from a soilless culture system in the greenhouse. *Plant Soil* 183, 169-178.
- Daum, D., & Schenk, K. (1996c):** Evaluation of the acetylene inhibition method for measuring denitrification in soilless plant culture system. *Biol. Fertil. Soils.* 24, 111-117.
- De Veau, E.J., & Burris, J.E. (1989) :** Photorespiratory rates in wheat and maize as determined by ¹⁸O-labelling. *Plant Physiol.* 90, 500-511.
- del Molino, I.M.M., Martínez-Carrasco, R., Pérez, P., Hernández, L., Morcuende, R., & Sánchez de la Puente, L. (1995):** Influence of nitrogen supply and sink strength on changes in leaf nitrogen compounds during senescence in two wheat cultivars. *Physiol. Plant.* 95, 51-58.
- Döhler, H. (1991):** Was können Landwirte tun? Maßnahmen zur Verminderung von Stickstoffemissionen, insbesondere Ammoniak. In: *Massentierhaltung bedroht Wälder und Meere*, Globus 6/91, BUND, 178-181.
- Dörfler, H. (1985):** *Der praktische Landwirt: Boden, Pflanze, Tier, Technik.* 3. durchges. Aufl. - Verlagsunion Agrar, BLV Verlagsgesellschaft München.
- Dowdell, R.J., Burford, J.R., & Cree, R. (1979a):** Oxygen concentrations in a clay soil after ploughing or direct drilling. *Nature* 278, 432-433.
- Dowdell, R.J., Burford, J.R., & Cree, R. (1979b):** Losses of nitrous oxide dissolved in drainage water from agricultural land. *Nature* 278, 342-343.
- Edwards, G., & Walker, D. (1983):** *C₃ / C₄ Mechanism and Cellular and Environmental Regulation, of Photosynthesis.* Blackwell, Oxford.
- Eichner, M.J. (1990):** Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data. *J. Environ. Qual.* 19, 272-280.
- EK (Enquete-Kommission) (1994):** "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.); *Schutz der Grünen Erde - Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder*, Economica Verlag GmbH, Bonn.
- Farquhar, G.D., Firth, P.M., Wetselaar, R., & Weir, B. (1980):** On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: determination of the ammonia compensation point. *Plant Physiol.* 66, 710-714.
- Feller, U., & Keist, M. (1986):** Senescence and nitrogen metabolism in annual plants. In: *„Fundamental Ecological and Agricultural Aspects of Nitrogen Metabolism in Higher Plants“*, pp. 219-234, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

- Ferm, M. (1979):** Method for determination of atmospheric ammonia. *Atmos. Environ.* 13, 1385-1393.
- Field, C.B. (1987):** Leaf age effects on stomatal conductance. In: „Stomatal Function“ (Zeiger, E., Farquhar, G., & Cowan, I.R., eds.), pp. 367-384. Stanford University press, Stanford, California.
- Findenegg, G.R., Nelemans, J.A., & Arnozis, P.A. (1989):** Effect of external pH and Cl on the accumulation of NH₄-ions in the leaves of sugar beet. *J. Plant Nutr.* 12, 593-601.
- Firestone, M.K., & Davidson E.A. (1989):** Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In: „Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere“, edited by Andreae, M.O., & Schimel, D.S., pp 7-21, John Wiley & Sons, New York.
- Ford, D.M., & Shibles, R. (1988):** Photosynthesis and other traits in relation to chloroplast number during soybean leaf senescence. *Plant Physiol.* 86, 108-111.
- Francis, D.D., Schepers, J.S., & Vigil, M.F. (1993):** Post-anthesis nitrogen loss from corn. *Agron. J.* 85, 659-663.
- Frantz, T.A., Peterson, D.M., & Durbin, R.D. (1982):** Sources of ammonium in oat leaves treated with tabtoxin or methionine sulfoximine. *Plant Physiol.* 69, 345-348.
- Fuchs, C., Jene, B., Murschel, B., & Zeddies, J. (1995):** Bilanzierung klimarelevanter Spurengase CO₂ und N₂O sowie Möglichkeiten der Emissionsminderung im Ackerbau. *Agrarwirtschaft* 44, Heft 4/5, S. 170-175.
- Ganmore-Neumann, R., & Kafkafi, U. (1983):** The effect of root temperature and NO₃/NH₄ ratio on strawberry plants. I. Growth, flowering, and root development. *Agron. J.* 75, 941-947.
- Gerendás, J., Ratcliffe, R.G., & Sattelmacher, B. (1990):** ³¹P nuclear magnetic resonance evidence for differences in intracellular pH in the roots of maize seedlings grown with nitrate or ammonium. *J. Plant Physiol.* 137, 125-128.
- Gerendás, J. (1992):** Einfluss von Form und Konzentration des Stickstoffangebotes auf Wachstum und Physiologie junger Maispflanzen (*Zea mays* L.). Inaugural-Dissertation im Fachbereich Agrarwissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, ISSN 0933-680 X.
- Givan, C.V. (1979):** Metabolic detoxification of ammonia in tissues of higher plants. *Phytochem.* 18, 375-382.
- Givan, C.V., Joy, K.W., & Kleczkowski, L.A. (1988):** A decade of photorespiratory nitrogen cycle. *Trends Biochem. Sci.* 13, 433-437.
- Harada, T., Takaki, H., & Yamada Y. (1968):** Effect of nitrogen sources on the chemical components of young plants. *Soil Sci. Plant Anal.* 14, 47-55.
- Harper, L.A., Sharpe, R.R., Langdale, G.W., & Giddens, J.E. (1987):** Nitrogen cycling in a wheat crop: Soil, plant, and aerial nitrogen transport. *Agron. J.* Vol. 79, 965-973.
- Heldt, H.W. (1996):** „Die Phenylalanin-Ammoniak-Lyase katalysiert die Startreaktion des Phenylpropanstoffwechsels“. *Pflanzenbiochemie, Spektr. Akad. Verlag Heidelberg · Berlin · Oxford*, S. 423.
- Herrmann, B., Jones, S.K., Fuhrer, J., Feller, U., & Neftel, A. (2001):** N budget and NH₃ exchange of a grass/clover crop at two levels of N application. *Plant Soil* 235, 243-252.

- Herrmann, B., Mattson, M., Fuhrer, J., & Schjoerring, J.K. (2002):** Leaf-atmosphere NH₃ exchange of white clover (*Trifolium repens* L.) in relation to mineral N nutrition and symbiotic N₂ fixation. *J. Exp. Bot.* 53 (366), 139-146.
- Hiatt, J.A. (1967):** Relationship of cell sap pH to organic acid change during ion uptake. *Plant Physiol.* 42, 294-298.
- Hooker, M.L., Sander, D.H., Peterson, G.A., & Daigger, L.A. (1980):** Gaseous N losses from winter wheat. *Agron. J.* 72, 789-792.
- Houwaard, F. (1979a):** Effect of ammonium chloride and methionine sulfoximine on the acetylene reduction of detached root nodules of peas (*Pisum sativum*). *Appl. Environ. Microbiol.* 37, 73-79.
- Houwaard, F. (1979b):** Influence of ammonium and nitrate nitrogen on nitrogenase activity of pea plants as affected by light intensity and sugar addition. *Plant Soil* 54, 271-282.
- Husted, S., & Schjoerring, J.K. (1995a):** A computer-controlled system for studying ammonia exchange, photosynthesis and transpiration of plant canopies growing under controlled environmental conditions. *Plant Cell Environ.* 18, 1070-1077.
- Husted, S., & Schjoerring, J.K. (1995b):** Apoplastic pH and ammonium concentration in leaves of *Brassica napus* L. *Plant Physiol.* 109, 1453-1460.
- Husted, S., & Schjoerring, J.K. (1996):** Ammonia flux between oilseed rape plants and the atmosphere in response to changes in leaf temperature, light intensity and relative air humidity. Interactions with stomatal conductance and apoplastic NH₄⁺ and H⁺ concentrations. *Plant Physiol.* 112, 67-74.
- Husted, S., Schjoerring, J.K., Nielsen, K.H., Nemitz, E., & Sutton, M.A. (2000):** Stomatal compensation points for ammonia in oilseed rape plants under field conditions. *Agric. For. Meteorol.* 105, 371-383.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1992):** Climate Change - The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. WMO/UNEP, Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996):** Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analysis. p. 745-771. In: R.T. Watson et al. (ed.) *Climate change: The IPCC scientific assessment.* Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Isermann, K. (1990a):** Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft als Bestandteil ihrer Stickstoffbilanz und Lösungsansätze zur hinreichenden Minderung. Ammoniak in der Umwelt, Kreisläufe, Wirkungen, Minderung. KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH D-4400 Münster-Hiltrup.
- Isermann, K. (1990b):** Die Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Oberflächengewässer der Bundesrepublik Deutschland durch verschiedene Wirtschaftsbereiche unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoff- und Phosphor-Bilanz der Landwirtschaft und der Humanernährung. *Schriftenreihe d. Akad. F. Tierges.* 1, 358-413.
- Isermann, K. (1990c):** Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication. *Fertil. Res.* 26 (1-3), 253-269.
- Isermann, K. (1990d):** Forschungsbedarf sich ergebend aus der Stickstoffbilanzierung / Verlustgefährdungsabschätzung der Landwirtschaft. Proc. BMFT-Statusseminar „Bodenbelastung

und Wasserhaushalt“ - Themenfeld: Stickstoff-Problematik, vom 28.02.-02.03.1990 in Bonn.

- Jairo, A.P., Kobata, T., Turner, N.C., & Fillery, I.R. (1994):** Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. *Crop Sci.* Vol. 34, 118-124.
- Joy, K.W. (1988):** Ammonia, glutamine and asparagine: a carbon-nitrogen interface. *Can. J. Bot.* 66, 2103-2109.
- Jungk, A. (1967):** Einfluss von Ammonium- und Nitrat-Stickstoff auf das Kationen-Anionen-Gleichgewicht in Pflanzen und seine Beziehung zum Ertrag. *Landw. Forsch., Sonderh.* 21, 50-63.
- Jungk, A. (1968):** Die Alkalität der Pflanzenasche als Maß für den Kationenüberschuss in der Pflanze. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 120, 99-105.
- Kahl, S., Gerendás, J., Heeschen, V., Ratcliffe, R.G., & Rudolph, H. (1997):** Ammonium assimilation in bryophytes. L-glutamine synthetase from *Sphagnum fallax*. *Physiol. Plant.* 101, 86-92.
- Kessavalou, A., Mosier, A.R., Doran, J.W., Drijber, R.A., Lyon, D.j., & Heinemeyer, O. (1998):** Atmospheric pollutants and trace gases. Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. *J. Environ. Qual.* 27, 1094-1104.
- Kesselmeier, J., Merk, L., Bliefernicht, M., & Helas, G. (1993):** Trace gas exchange between terrestrial plants and atmosphere: carbon dioxide, carbonyl sulfide and ammonia under the rule of compensation points. In: *Air Pollution Research Report 77*, 71-80.
- Keys, A.J., Bird, I.F., Cornelius, M.J., & Lea, P.J. (1978):** The photorespiratory N-cycle. *Nature* 75, 741-743.
- King, B.J., Siddiqi, M.Y., Ruth, T.J., Warner, R.L., & Glass, A.D.M. (1993):** Feedback regulation of nitrate influx in barley roots by nitrate, nitrite and ammonium. *Plant Physiol.* 102, 1279-1286.
- Kirkby, E.A. (1968):** Influence of ammonium and nitrate nutrition on the cation-anion balance and nitrogen and carbohydrate metabolism of white mustard plants grown in dilute nutrient solutions. *Soil Sci.* 105, 133-141.
- Klepper, L. (1979):** Nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide emissions from herbicide-treated soybean plants. *Atmos. Environ.* 13, 537-542.
- Klepper, L. (1990):** Comparison between NO_x evolution mechanisms of wild-type and nr₁ mutant soybean leaves. *Plant Physiol.* 93, 26-32.
- Knowles, R. (1981):** Denitrification. In: Paul, E.A., & Ladd, J.N. (Hrsg.), *Soil Biochemistry*. New York: M. Dekker Inc. 323-356.
- Kumar, P.A., Nair, T.V.R., & Abrol, Y.P. (1984):** Effect of photorespiratory metabolites, inhibitors and methionine sulfoximine on the accumulation of ammonia in the leaves of mung bean and *Amaranthus*. *Plant Sci. Lett.* 33, 303-307.
- Lacuesta, M., Dever, L.V., Munoz-Rueda, A., & Lea, P.J. (1997):** A study of photorespiratory ammonia production in the C₄ plant *Amaranthus adulis*, using mutants with altered photosynthetic capacities. *Physiol. Plant.* 99, 447-455.

- Langford, A.O., & Fehsenfeld, F.C. (1992):** Natural vegetation as a source or sink for atmospheric ammonia: A case study. *Science* 255, 581-583.
- Lawlor, D.W., Boyle, F.A., Young, A.T., Kendall, A.C., & Keys, A.J. (1987a):** Nitrate nutrition and temperature effects on wheat: Enzyme composition, nitrate and total amino acid content of leaves. *J. Exp. Bot.* 38, 378-392.
- Lawlor, D.W., Boyle, F.A., Young, A.T., Keys, A.J., & Kendall, A.C. (1987b):** Nitrate nutrition and temperature effects on wheat: Photosynthesis and photorespiration of leaves. *J. Exp. Bot.* 38, 393-408.
- Lea, P.J., & Mifflin, B.J. (1974):** Alternative route for nitrogen assimilation in higher plants. *Nature* 251, 614-616.
- Lea, P.J. (1991):** The inhibition of ammonia assimilation: a mechanism of herbicide action. In: Baker, N.R., & Percival, M.P. (eds.): *Herbicides*. Elsevier Science Publishers, B.V. 267-298.
- Lee, D.S., & Dollard, G.J. (1994):** Uncertainties in current estimates of emissions of ammonia in the United Kingdom. *Environ. Poll.* 86, 267-277.
- Lee, R.B., & Rudge, K.A. (1986):** Effects of nitrogen deficiency on the absorption of nitrate and ammonium by barley plants. *Ann. Bot.* 57, 471-486.
- Leick, B. (2004):** Emission von Ammoniak (NH₃) und Lachgas (N₂O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation im Fachbereich Agrarwissenschaften I (Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie), Institut für Pflanzenernährung der Universität Hohenheim.
- Lewis, O.A.M., Lamas, D.M., & Hewitt, E.J. (1992):** Nitrogen assimilation in barley (*Hordeum vulgare* L. cv Mazurka) in response to nitrate and ammonium nutrition. *Ann. Bot.* 49, 39-49.
- Mäck, G. (1995):** Organ-specific changes in the activity and subunit composition of glutamine-synthetase isoforms in barley (*Hordeum vulgare* L.) after growth on different levels of NH₄⁺. *Planta* 196, 231-238.
- Magalhaes, J.S., & Wilcox, G.E. (1983):** Tomato growth and mineral composition as influenced by nitrogen form and light intensity. *J. Plant Nutr.* 6, 847-862.
- Magalhaes, J.R., Huber, D.M., & Tsai, C.Y. (1995):** Influence of the form of nitrogen on ammonium, amino acids and N-assimilating enzyme activity in maize genotypes. *J. Plant Nutr.* 18 (4), 747-763.
- Mannheim, T., Braschkat, J., & Marschner, H. (1997):** Ammoniakemissionen aus alternden Pflanzen und bei der Zersetzung von Ernterückständen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 160, 125-132.
- Mannheim, T. (1996):** Ammoniakemissionen von landwirtschaftlichen Nutzflächen: Quellen und Minderungsmaßnahmen. Dissertation im Fachbereich Agrarwissenschaften I (Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie), Institut für Pflanzenernährung der Universität Hohenheim.
- Mansfield, T.A. (1985):** Porosity at a price: The control of stomatal conductance in relation to photosynthesis. In: *Photosynthetic Mechanism and the Environment* (Barber, J., & Baker, N.R., eds.), pp. 419-452. Elsevier, Amsterdam.
- Marschner, H. (1995):** Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press Limited.

- Martin, F., Winspear, J.M., Mac Farlane, J.O., & Oaks, A. (1983):** Effect of methionine sulfoximine on the accumulation of ammonia in C₃ and C₄ leaves. *Plant Physiol.* 71, 177-181.
- Mattsson, M., Lundborg, T., Larsson, M., & Larsson, C.-M. (1992a):** Nitrogen utilization in N-limited barley during vegetative and generative growth. II Method for monitoring generative growth and development in solution culture. *J. Exp. Bot.* 43, 15-23.
- Mattsson, M., Lundborg, T., & Larsson, C.-M. (1993):** Nitrogen utilization in N-limited barley during vegetative and generative growth. IV Translocation and remobilization of nitrogen. *J. Exp. Bot.* 44, 537-546.
- Mattsson, M., & Schjoerring, J.K. (1996a):** Characteristics of ammonia emission from barley plants. *Plant Physiol. Biochem.* 34 (5), 691-695.
- Mattsson, M., & Schjoerring, J.K. (1996b):** Ammonia emission from young barley plants: influence of N source, light/dark cycles and inhibition of glutamine synthetase. *J. Exp. Bot.* 47, 477-484.
- Mattsson, M., & Schjoerring, J.K. (1997):** Ammonia exchange between plants and the atmosphere: Effects of ammonium supply to the roots, dark-induced senescence und reduced GS activity. *Plant nutrition for sustainable food production and environment: proceedings of the XIII International Plant Nutrition Colloquium, 13-19 September 1997, Tokyo, Japan / ed. by Tadao Ando - Dordrecht : Kluwer, 1997. - XXXIII, 982 S.: Ill. (Developments in plant and soil sciences 78), ISBN 0-7923-4796-X, 827-831.*
- Mattsson, M., Husted, S., & Schjoerring, J.K. (1998):** Influence of nitrogen nutrition on ammonia volatilization from plant leaves. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51 (1), pp. 35-40.
- Maynard, D.N., & Barker, A.V. (1969):** Studies on the ammonium tolerance of plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sc.* 94, 235-239.
- Mengel, K. (1991):** Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze, Gustav Fischer Verlag Jena.
- Mifflin, B.J., & Lea, P.J. (1977):** Amino acid metabolism. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 28, 299-329.
- Mills, H.A., & Jones, J.B. (1979):** Nutrient deficiencies and toxicities in plants: Nitrogen. *J. Plant Nutr.* 1, 101-122.
- Mohr, H., & Schopfer, P. (1992):** Pflanzenphysiologie. Springer Lehrbuch, ISBN 3-540-54733-9, 4. Aufl., Springer-Verlag · Berlin · Heidelberg · New York.
- Morgan, J.A. (1988):** Growth and canopy carbon dioxide exchange rate of spring wheat as affected by nitrogen status. *Crop. Sci.* 28, 95-100.
- Morgan, J.A., & Parton, W.J. (1989):** Characteristics of ammonia volatilization from spring wheat. *Crop Sci.* 29, 726-731.
- Mosier, A.R., Mohanty, S.K., Bhadrachalam, A., & Chakravorti, S.P. (1990):** Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from soil to the atmosphere through rice plants. *Biol. Fertil. Soils* 9, 61-67.
- Mosier, A.R., & Schimel, D.S. (1991):** Influence of agricultural nitrogen on atmospheric methane and nitrous oxide. *Chem. Ind.* 23, 874-877.
- Mühling, K.H., & Sattelmacher, B. (1995):** Apoplastic ion concentrations of intact leaves of field bean (*Vicia faba*) as influenced by ammonium and nitrate. *J. Plant Physiol.* 147, 81-86.

- Neftel, A., Blatter, A., Gut, A., Fahrni, M., & Staffelbach, Th. (1997):** Gasförmiger Austausch von Stickstoffverbindungen. *Agrarforschung* 4 (08), 324-327.
- Nicolas, M.E., Simpson, R.J., Lambers, H., & Dalling, M.J. (1985):** Effects of drought on partitioning of nitrogen in two wheat varieties differing in drought-tolerance. *Ann. Bot.* 55, 743-754.
- Nouchi, I., Mariko, S., & Aoki, K. (1990):** Mechanisms of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiol.* 94, 59-66.
- Nultsch, W. (1989):** Allgemeine Botanik, Kap. 12: Haushalt von Stickstoff, Schwefel und Phosphor, Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York.
- O'Deen, W.A., & Porter, L.K. (1986):** Continuous flow system for collecting volatile ammonia and amines from senescing winter wheat. *Agron. J.* 78, 746-749.
- O'Deen, W.A. (1989):** Wheat volatilized ammonia and resulting nitrogen isotopic fractionation. *Agron. J.* 81, 980-985.
- Ohlsen, Ch., Mattsson, M., & Schjoerring, J.K. (1995):** Ammonia volatilization in relation to nitrogen nutrition of young *Brassica napus* plants growing with controlled nitrogen supply. *J. Plant Physiol.* 147, 306-312.
- Parton, W.J., Morgan, J.A., Altenhofen, J.M., & Harper, L.A. (1988):** Ammonia volatilization from spring wheat plants. *Agron. J.* 80, 419-425.
- Pearson, J., & Stewart, G.R. (1993):** The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. *New. Phytol.* 125, 283-305.
- Peeters, K.M.U., & van Laere, A.J. (1992):** Ammonium and amino acid metabolism in excised leaves of wheat (*Triticum aestivum*) senescing in the dark. *Physiol. Plant.* 84, 243-249.
- Peterson, L.W., & Huffaker, R.C. (1975):** Loss of ribulose-1,5-diphosphate carboxylase and increase in proteolytic activity during senescence of detached primary barley leaves. *Plant Physiol.* 55, 1009-1015.
- Plies-Balzer, E. (1993):** Ertragsleistung, N₂-Fixierung und osmotische Anpassung an Wasserstress bei *Vicia faba* L. Dissertation im Fachbereich Agrarwissenschaften d. Justus-Liebig Universität Giessen, Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen.
- Poth, M., & Focht, D.D. (1985):** ¹⁵N kinetic analysis of N₂O production by *Nitrosomonas europaea*: an examination of nitrifier denitrification. *App. Environ. Microbiol.* 49, 1134-1141.
- Racusen, D., & Foote, M. (1962):** Protein turnover rate in bean leaf discs. *Plant Physiol.* 37, 640-642.
- Richter, G. (1998):** Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. Kap. 9: Aminosäuren und Nucleotide: Knöllchenbildung (Nodulation), Thieme Stuttgart, 400-404.
- Riens, B., Lohaus, G., Heineke, D., & Heldt, H.W. (1991):** Amino acid and sucrose content determined in the cytosolic, chloroplastic, and vacuolar compartments and in the phloem sap of spinach leaves. *Plant Physiol.* 97, 227-233.
- Rockel, P. (1993):** Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen der Stickstoffernährung und dem Stickoxidgaswechsel höherer Pflanzen. Dissertation der Universität-Gesamthochschule Essen, Fachbereich Bio- und Geowissenschaften.

- Rufty jr., T.W., Jackson, W.A., & Raper jr., C.T. (1981):** Nitrate reduction in roots as affected by the presence of potassium and by flux of nitrate through the roots. *Plant Physiol.* 82, 675-680.
- Salsac, L., Chaillou, S., Morot-Gaudry, J.-F., Lesaint, C., & Jolivet, E. (1987):** Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant Physiol. Biochem.* 25, 805-812.
- Sauerbeck, D. (1992):** Schriftliche Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung "Landwirtschaft II" der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" am 17./18. Febr. 1992, Deutscher Bundestag, Bonn, Kommissionsdrucksache 12/5-a, 82-94.
- Schenk, M.K., & Daum, D. (1997):** N₂O and N₂ emissions from a soilless culture system as affected by greenhouse climate. In: Ando, T. et al. (eds.): *Plant nutrition - for sustainable food production and environment.* 567-568. Kluwer Academic Publishers. Printed in Japan.
- Schjoerring, J.K., Nielsen, N.E., Jensen, H.E., & Gottschau, A. (1989):** Nitrogen losses from field-grown spring barley plants as affected by rate of nitrogen application. *Plant Soil* 116, 167-175.
- Schjoerring, J.K., & Byskov-Nielsen, S. (1991):** Ammonia emission from barley plants, field investigations 1989 and 1990. In: *Nitrogen and Phosphorus in Soil and Air*, pp 249-265, National Agency of Environmental Protection, Ministry of the Environment, Denmark. ISBN 87-503-9069-4.
- Schjoerring, J.K. (1991):** Ammonia emission from the foliage of growing plants. In: *Trace Gas Emissions by Plants* (eds by T.D. Sharkey, E.A. Holland & H.A. Mooney) Academic Press, San Diego, 267-292.
- Schjoerring, J.K., Ferm, M., & Sommer, S.G. (1992):** Measurement of NH₃ emission and deposition by the gradient method: Can passive flux samplers be used to obtain the net exchange of NH₃ through periods of several days with varying wind speed and atmospheric NH₃ concentration. *Air Pollution Research Report 41, Development of Analytical Techniques for Atmospheric Pollutants.*
- Schjoerring, J.K., Kyllingsbaek, A., Mortensen, J.V., & Byskov-Nielsen, S. (1993a):** Field investigations of ammonia exchange between barley plants and the atmosphere. I. Concentration profiles and flux densities of ammonia. *Plant Cell Environ.* 16, 161-167.
- Schjoerring, J.K., Kyllingsbaek, A., Mortensen, J.V., & Byskov-Nielsen, S. (1993b):** Field investigations of ammonia exchange between barley plants and the atmosphere. II. Nitrogen reallocation, free ammonium content and activities of ammonium-assimilating enzymes in different leaves. *Plant Cell Environ.* 16, 169-178.
- Schjoerring, J.K. (1995):** Long-term quantification of ammonia exchange between agricultural cropland and the atmosphere - I. Evaluation of a new method based on passive flux samplers in gradient configuration. *Atmos. Environ.* 29 (8), 885-893.
- Schjoerring, J.K., Husted, S., & Mattsson, M. (1998):** Physiological parameters controlling plant-atmosphere ammonia exchange. *Atmos. Environ.* 32 (3), 491-498.
- Schjoerring, J.K., & Mattsson, M. (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 Soil* 228, 105-115.
- Schlichting, E., & Blume, H.P. (1966):** *Bodenkundliches Praktikum.* Parey Verlag, Hamburg, Berlin.

- Schmidt, U. (1998):** Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen und Umweltfaktoren auf Lachgas (N₂O)-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Lössböden. Stuttgart: Univ. Hohenheim, Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 45, 154, XV, 6 S. graph. Darst. Zugl.: Inst. für Bodenkunde u. Standortslehre Univ. Hohenheim, Diss.
- Schrader, L.E., & Thomas, R.J. (1981):** Nitrate uptake, reduction and transport in the whole plant. In: „Nitrogen and carbon metabolism“ (J.D. Bewly, Hrsg.). Martinus Nijhoff / Dr. W. Publishers, The Hague, Boston, 49-93.
- Schubert, S. (1995):** Nitrogen assimilation by legumes - processes and ecological limitations. Fertil. Res. 42, 99-107.
- Schubert, S., & Yan, F. (1997):** Nitrate and ammonium nutrition of plants: effects on acid/base balance and adaptation of root cellplasmalemma H⁺-ATPase. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 160, 275-281.
- Schulte-Kellinghaus, S. (1988):** Denitrifikation in der ungesättigten Zone: Über die Denitrifikation in der ungesättigten Zone mächtiger Löss- und grundwassernaher Sandstandorte. Schriftreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 358. Münster-Hiltrup.
- Silva, R.P.F. DA, & Stutte, C.A. (1981):** Nitrogen loss in conjunction with transpiration from rice leaves as influenced by growth stage, leaf position, and N supply. Agron. J. 73, 38-42.
- Silva, R.P.F. DA, & Stutte, C.A. (1981):** Nitrogen volatilization from rice leaves. Crop Sci. 21, 913-916.
- Simpson, J.R., & Dalling, M.J. (1981):** Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). III. Enzymologie and transport of amino acids from senescing flag leaves. Planta 51, 447-456.
- Simpson, J.R., Lambers, H., & Dalling, M.J. (1983):** Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). IV. Development of a quantitative model of the translocation of nitrogen to the grain. Plant Physiol. 71, 7-14.
- Stutte, C.A., & Silva, R.P.F. DA (1981):** Nitrogen volatilization from rice leaves. I. Effects of genotype and air temperature. Crop Sci. 21, 596-600.
- Stutte, C.A., & Weiland, R.T. (1978):** Gaseous nitrogen loss and transpiration of several crop and weed species. Crop Sci. 18, 887-889.
- Sutton, M.A., Pitcairn, C.E.R., & Fowler, D. (1993):** The exchange of ammonia between the atmosphere and plant communities. Adv. Ecol. Res. 24, 301-390.
- Sutton, M.A., Asman, W.A.H., & Schjoerring, J.K. (1994):** Dry deposition of reduced nitrogen. Tellus 46B, 255-273.
- Sutton, M.A., Schjoerring, J.K., & Wyers, G.P. (1995):** Plant-atmosphere exchange of ammonia. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 351, 261-278.
- Thibaud, J.B., & Grignon, C. (1981):** Mechanism of nitrate uptake in corn roots. Plant. Sci. Lett. 22, 279-289.
- Tobin, A.K., Sumar, N., Patel, M., Moore, A.L., & Stewart, G.R. (1988):** Development of photorespiration during chloroplast biogenesis in wheat leaves. J. Exp. Bot. 39, 833-843.

- Ueda, S., Ogura, N., & Yoshinari, T. (1993):** Accumulation of nitrous oxide in aerobic groundwaters. *Wat. Res.* 27, 1787-1792.
- van Beusichem, M.L., Kirkby, E.A., & Baas, R. (1988):** Influence of nitrate and ammonium nutrition and the uptake, assimilation, and distribution of nutrients in *Ricinus communis*. *Plant Physiol.* 86, 914-921.
- van Hove, L.W.A., Koops, A.J., Adema, E.H., Vredenberg, W.J., & Pieters, G.A. (1987):** Analysis of the uptake of atmospheric ammonia by leaves of *Phaseolus vulgaris* L. *Atmospheric. Environ.* 21, 1759-1763.
- van Hove, L.W.A., Adema, E.H., Vredenberg, W.J., & Pieters, G.A. (1989):** A study of the adsorption of NH₃ and SO₂ on leaf surfaces. *Atmospheric. Environ.* 23, 1479-1486.
- Walker, K.A., Keys, A.J., & Curtis, V.G. (1984):** Effect of L-methionine sulfoximine on the products of photosynthesis in wheat (*Triticum aestivum*) leaves. *J. Exp. Bot.* 35, 1800-1810.
- Wallace, W., & Pate, J.S. (1965):** Nitrate reductase in the field pea (*Pisum arvense* L.). *Ann. Bot. (London) [N.S.]* 29, 655-671.
- Wallsgrave, R.M., Keys, A.J., Lea, P.J., & Mifflin, B.J. (1983):** Photosynthesis, photorespiration and nitrogen metabolism. *Plant Cell Environ.* 6, 301-309.
- Wang, M.Y., Siddiqi, M.Y., Ruth, T.J., & Glass, A.D.M. (1993):** Ammonium uptake by rice roots. II. Kinetics and NH₄⁺ influx across the plasmalemma. *Plant Physiol.* 103, 1259-1267.
- Wang, X.T., & Below, F.E. (1995):** Tillering, nutrient accumulation, and yield of winter wheat as influenced by nitrogen form. *J. Plant Nutr.* 18 (6), 1177-1189.
- Whitehead, D.C., & Lockyer, D.R. (1987):** The influence of the concentration of gaseous ammonia on its uptake by the leaves of Italian ryegrass with and without an adequate supply of nitrogen to the roots. *J. Exp. Bot.* 38, 818-827.
- Wittenbach, V.A. (1979):** Ribulose biphosphate carboxylase and proteolytic activity in wheat leaves from anthesis through senescence. *Plant Physiol.* 65, 884-887.
- Wollenweber, B., & Raven, J.A. (1993):** Nitrogen acquisition from atmospheric NH₃ by *Lolium perenne*. *Bot. Acta* 106, 42-51.
- Woo, K.C., Boyle, F.A., Flügge, I.U., & Heldt, H.W. (1987):** ¹⁵N-Ammonia assimilation, 2-oxoglutarate transport, and glutamate export in spinach chloroplasts in the presence of dicarboxylates in the light. *Plant Physiol.* 85, 621-625.
- Yu, J., & Woo, K.C. (1991):** Correlation between the development of photorespiration and the change in activities of NH₃ assimilation enzymes in greening oat leaves. *Aust. J. Plant Physiol.* 18, 583-588.
- Zelitch, I. (1979):** Photorespiration: Studies with whole tissues. In: „Photosynthesis II”, *Encycl. Plant Physiol.* (M. Gibbs & E. Latzko, eds.), 351-367, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Zucker, M., & Stinson, H.T. (1962):** Chloroplasts as the major protein bearing structures in *Oenothera* leaves. *Arch. Biochem. Biophys.* 96, 637-644.