

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de



Bewilligungsempfänger

Aurapa GmbH (AUR)

Kooperationspartner

Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau,
Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA)

Umweltfreundliche Produktion von gesundheitsfördernden Lebensmitteln mithilfe von hydroponischen Systemen mit weitgehender Kreislaufführung des Wassers

Abschlussbericht

Verfasser: Angela Boley, Helmut Pöhl, Mario Bosch

Stuttgart, April 2022

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

AZ: 37299/01

Projektlaufzeit

30.11.2020 bis 31.12.2021

Fotos, soweit nicht anders vermerkt, von Angela Boley

Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts war die Entwicklung und Test eines hydroponischen Systems, mit dem den Pflanzen eine definierte Menge an Nährstoffen im Wasser zur Verfügung gestellt wird, um definierte und konstante Nährstoffgehalte im Lebensmittel zu erzeugen. Es sollte auch untersucht werden, ob es möglich ist, Nährstoffgehalte in Pflanzen reproduzierbar einzustellen. Der geschlossene Wasserkreislauf bei einem hydroponischen System ist hier besonders vorteilhaft gegenüber dem klassischen landwirtschaftlichen Anbau. Gleichzeitig werden dadurch Einträge von Nitrat in das Grundwasser vermieden.

Ein weiterer Aspekt sind die Emissionen der Klimagase N_2O (Lachgas) und CO_2 . Lachgas entsteht auf dem Feld aus Stickstoffdünger und könnte bei höheren Nitratkonzentrationen in der Nährlösung durch Denitrifikation entstehen. Daher wurden bei den Versuchen auch die CO_2 und N_2O Konzentrationen in der Luft über den Pflanzen gemessen.

Mit den hier durchgeführten Versuchen wurden bezüglich der Nährstoffe in den Gerstentpflanzen („Gerstengras“) folgende Ergebnisse erhalten:

1. Die Abhängigkeit der Nitratgehalte in der Pflanze von den Konzentrationen in der Nährlösung wurde bereits von Löffler 2018 untersucht. Damals ergab sich eine Tendenz zu höheren Nitratkonzentrationen in der Pflanze je höher die Nitratkonzentrationen in der Nährlösung war. Der maximale Nitratgehalt (als NO_3^-) in der Pflanze konnte bei 226 mg/L NO_3^- -N in der Nährlösung mit ca. 15 % (bezogen auf die Trockenmasse TM) erreicht werden. Bei den Versuchen hier wurde der Nitratgehalt im Gerstengras (als NO_3^-) zu ca. 13 % bez. auf TM bei einer Konzentration von 250 mg/L NO_3^- -N in der Nährlösung bestimmt. Die Betriebsbedingungen der früheren Versuche unterschieden sich jedoch von den hier durchgeführten, u.a. ist hier der Gasaustausch, die Beleuchtungsart und -dauer, die Volumina der Pflanzenbehälter und der Nährlösung zu nennen. Bei einer Konzentration von 420 mg/L NO_3^- -N wurden keine wesentlich höheren Nitratgehalte mehr gemessen, vermutlich ergibt sich hier eine Art „Sättigungseffekt“.
2. Für die Kalium-Gehalte in der Pflanze gilt eine ähnliche Beziehung. Es wurden Kaliumgehalte von bis zu 14 % bezogen auf die Trockenmasse ermittelt. Auch hier ergibt sich bis 780 mg/L Kalium in der wässrigen Phase eine Korrelation zu den Konzentrationen in der Nährlösung. Die absoluten Werte (gerechnet in der Feuchtmasse) waren ebenfalls deutlich niedriger als in früheren Versuchen (Löffler 2018).
3. Das Alter der Pflanzen mit 7 d bzw. 14 d bewirkte nur geringe Unterschiede in den Nährstoffgehalten der Pflanzen. Damit könnte in Zukunft eine gewisse Flexibilität bei der Ernte erreicht werden.
4. Der Erntezeitpunkt nach der nächtlichen Dunkelphase über 16 h hatte ca. 10 % höhere Nitratgehalte in der Pflanze gegenüber einer Ernte nach der 6 h dauernden Hellphase zur Folge. Auch in früheren Versuchen wurde kein gravierender Unterschied bei einer Hellphase von 4 h nach einer Dunkelphase von 12 h gefunden (Löffler 2018). Die CSB-Gehalte waren dafür nach der Hellphase höher, was sich vermutlich mit der Produktion von löslichen Kohlehydraten infolge des Photosynthese-Prozesses erklären lässt.
5. Mit unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung von 6,0 bzw. 8,0 ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede bei den Nährstoffgehalten in der Pflanze.

Bei den Lachgas- (N_2O) und Kohlendioxid (CO_2) Messungen in der Gasphase wurden folgende Beobachtungen gemacht:

1. Die Lachgas Konzentrationen in der Gasphase waren bei allen Versuchen normalerweise sehr niedrig (mit 1 ppm bis 2 ppm an der Bestimmungsgrenze). Nur nach dem Ausfall einer Pumpe über 3 d, ergab sich ein kurzzeitiger Peak der Lachgas-Konzentrationen nach der erneuten Bewässerung der Pflanzen, die danach jedoch schnell wieder auf die vorherigen geringen Werte zurückgingen (Versuch 3). Ein ähnliches Verhalten zeigte sich bei Versuch 4. Hier wurde die Pflanzenerde nur einmal je Tag gewässert, wobei die N_2O Konzentrationen jeweils kurz nach diesem Ereignis einen Peak zeigten. Offenbar reagieren die Pflanzen bei Trockenheit mit kurzzeitigen Lachgas Emissionen.
2. Die CO_2 Konzentrationen in der Gasphase stiegen bis etwa zum 6. d bis auf max. 1700 ppm in der Hellphase kontinuierlich an. Dies liegt vermutlich daran, dass der Keimling die im Korn vorrätigen Inhaltsstoffe abbaut, um Energie für das Wachstum der Pflanze zu gewinnen. Nach dem 3. d konnte die junge Pflanze im Licht grüne Blätter ausbilden, die durch Photosynthese einen Teil des entstehenden CO_2 wieder reduziert haben. Dadurch wurden die CO_2 Konzentrationen nach Eintritt in die Hellphase schnell verringert. Die Unterschiede zwischen Hell- und der Dunkelphase wurden mit zunehmendem Alter größer und erreichten bis zu 1000 ppm. Nach dem 6. d wurden die CO_2 Konzentrationen auch während der Dunkelphase geringer. Etwa ab dem 10. d wurden die Konzentrationen während der Hellphase niedriger im Vergleich zur Außenluft. Da die Ernte bereits am 14. d stattfand, konnte die weitere Entwicklung nicht mehr verfolgt werden. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die CO_2 Gesamtbilanz mit zunehmendem Alter der Pflanzen negativ wird, so dass mehr CO_2 verbraucht als produziert wird.
3. Mit einem pH-Wert von 8,0 in der Nährlösung wurden etwas geringere Lachgas Konzentrationen als mit einem pH von 6,0 gemessen. Allerdings waren die Werte insgesamt so niedrig, dass die Unterschiede vermutlich nicht signifikant sind, zumal auch nur 1 Versuch dazu durchgeführt werden konnte.

Fazit: Das Ziel des Projekts, ein hydroponisches System zu entwickeln, mit dem sich Gersengras mit reproduzierbaren Nährstoffgehalten produzieren lässt, wurde erreicht. Dabei wurde sehr wenig Wasser, hauptsächlich durch Transpiration der Pflanzen verbraucht. Bei dem hier verwendeten Ebbe-und-Flut System wurde - bei Regelbetrieb - auch bei hohen Nitratkonzentrationen nur sehr geringe Mengen Lachgas erzeugt.

Allerdings war das verwendete hydroponische System für Laborbedingungen konzipiert. Um die Treibhausgase im Gasraum messen zu können, musste zeitweise ein abgeschlossenes System erzeugt werden. Obwohl die Luft in dem Gasraum regelmäßig immer wieder ausgetauscht wurde, könnte diese Tatsache, ebenso wie der sehr begrenzte Raum in der kleinen Labor-Hydroponik-Anlage die Pflanzen und die Ergebnisse beeinflusst haben.

Einige Versuche, wie z.B. mit der Pflanzenerde, konnten hier nur als erste orientierende Versuche durchgeführt werden. Hier wären in Zukunft weitere Untersuchungen nötig, um verlässliche Vergleiche zwischen einer konventionellen Landwirtschaft und der hydroponischen Anbautechnik zu ermöglichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Ausgangssituation.....	7
1.2	Zielsetzung.....	8
1.3	Aufgabenstellung	8
2	Projektverlauf - Vergleich mit Arbeitsplan.....	9
3	Material und Methoden	11
3.1	Gerstensaatzgut.....	11
3.2	Vorversuche Keimung.....	11
3.2.1	Keimversuch 1	11
3.2.2	Keimversuch 2	12
3.2.3	Berechnung der Keimrate	12
3.3	Aufbau der Laboranlagen für die Hauptversuche	12
3.3.1	Wasserkreislauf	12
3.3.2	Gasmessungen	16
3.3.3	Betriebsweise	18
3.4	Substrate und Nährlösungen	19
3.4.1	Nährlösungen für die Hauptversuche	19
3.4.2	Blumenerde (nur Versuch 4)	20
3.5	Datenerfassung und Steuerung für die Hauptversuche	21
3.5.1	Datenerfassung	21
3.5.2	Schaltung der Relais für die Sequenzen und Regelung der Systeme 1 und 2	22
3.5.3	Auswertung	23
3.6	Abfolge der Hauptversuche	25
3.6.1	Quellung	25
3.6.2	Vorbehandlung zur Ankeimung	25
3.6.3	Einsetzen in die Laboranlagen	26
3.6.4	Kultivierung in den Laboranlagen	26
3.6.5	Ankeimungsphase und Kultivierung der Gerste mit Blumenerde (Versuch 4)	26
3.7	Labor-Analytik	28
3.7.1	Küvettenests	28
3.7.2	Nährstoffe und andere Inhaltsstoffe in den Wasserproben	28
3.7.3	Nährstoffe und andere Inhaltsstoffe in Pflanzenproben (Gerstengras)	29
3.7.4	Trockenmassebestimmung bei Gerstengras	29


3.7.5 Berechnungen der Inhaltsstoffgehalte in Gerstengras	29
4 Ergebnisse und Diskussion	30
4.1 Keim Vorversuche.....	30
4.1.1 Keimversuch 1	30
4.1.2 Keimversuch 2	30
4.2 Hauptversuche in den Versuchsanlagen	32
4.2.1 Versuch 1 (V1) ohne Dünger	32
4.2.2 Versuch 2 (V2) Mittlere Düngung mit Nachernte	36
4.2.3 Versuch 3 (V3) hohe Düngung	42
4.2.4 Versuch 4 (V4) mit Boden	47
4.2.5 Versuch 5 (V5) ohne Abdeckung	52
4.2.6 Versuch 6 (V6) Ammonium-Düngung	55
4.2.7 Versuch 7 (V7) pH-Wert Einfluss	60
4.3 Vergleich der Ergebnisse V1-V7.....	65
4.3.1 NO ₃ -N in der Nährstofflösung und im Gerstengras	65
4.3.2 Ammonium, Phosphat und Magnesium in der Nährstofflösung und im Gerstengras ..67	
4.3.3 Gehalte an Hauptnährstoffen, kumuliert	69
4.3.4 Erntemengen	69
4.3.5 Wasser-Verbrauch	70
4.3.6 Höhenwachstum Gerstengras	71
4.3.7 Emissionen von N ₂ O und CO ₂ im Gasraum der Pflanzenbehälter	72
5 Literaturverzeichnis.....	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Versuche mit Prototyp (Foto: Pöhl 2021).....	10
Abb. 2: Wintergerste KWS Meridian. Links: Saatgut; Rechts: Pflanze (Bild: KWS 2021)	11
Abb. 3: Keimversuch 1 (Foto: Bosch 2021)	12
Abb. 4: Schema Anlagen für Laborversuche - Kreislauf der Nährlösung (Anlage 1 = System 1, Anlage 2 = System 2)	13
Abb. 5: Laboranlage Hydroponik - Unten: Nährlösungsbehälter, Mitte: Pflanzenbehälter, Oben: LED-Lampen zur Beleuchtung.....	14
Abb. 6: Pflanzschale mit Edelstahlgitter in Pflanzenbehälter mit Stützkonstruktion beim Testlauf mit Wasser.....	14

Abb. 7: Pflanzenbehälter mit Gerstengras, Plexiglasabdeckung und Beleuchtung während der Versuche.....	15
Abb. 8: Schema Gasmessung (rote Pfeile zeigen die Richtung des Gastransports an)	16
Abb. 9: Geräte zur Gasmessung (der eigentliche CO ₂ -Sensor ist in der Elektro-Schaltbox angebracht).....	17
Abb. 10: CO ₂ -Sensor Sensirion SCD41 mit Mikrocontroller M5 Stick C	18
Abb. 11: Schema Gas + Wasser: alle per PC geschalteten Geräte sind mit Zahlen gekennzeichnet (s. Tab. 4).	18
Abb. 12: Eigenschaften KNO ₃ (Foto Bosch 2021).....	20
Abb. 13: Blumenerde für Versuch 4.....	21
Abb. 14: "Screenshot" MULTIMESS. Oben: Wertetabelle, darunter Diagramme - hier: pH und O ₂ , N ₂ O und CO ₂ Konzentrationen in Versuch 7.....	22
Abb. 15: Einstellungen der Haupt-Sequenz, um den kontinuierlichen Wechsel der Schaltungen zu realisieren.	23
Abb. 16: Einstellungen der Regel-Parameter.....	23
Abb. 17: Beispiel für CO ₂ Messwerte bei den verschiedenen Schritten (V3). Exemplarisch: schwarzer Pfeil = Licht an; roter Pfeil = Licht aus.	24
Abb. 18: Beispiel für Relative CO ₂ Konzentrationen als Differenz zu Außenluft Konzentrationen bei den verschiedenen Schritten (V3). Exemplarisch: schwarzer Pfeil = Probenahme. Gelb = Belichtungsphasen.	25
Abb. 19: V4 Pflanzschale für Versuch mit Blumenerde. Links: Test mit Fliegengitter Rechts: „Getreidesack“ aus Kunststoff (jeweils System 1 und System 2)	27
Abb. 20: Links: Pflanzschale mit Blumenerde. Rechts: Pflanzschale mit Blumenerde und Gerstenkörnern (jeweils System 1 und System 2)	27
Abb. 21: Keimversuch 1 (Foto: Bosch 2021)	30
Abb. 22: Keimversuch 2 Links: Quellung im Kühlschrank (System 2). Rechts: Quellung bei 20 °C (System 1) Fotos: Bosch 2021.....	31
Abb. 23: V1 Ankeimung in Saatschalen. Links für System 2 und Rechts für System 1 Foto: Bosch 2021	32
Abb. 24: V1 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	33
Abb. 25: V1 - Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase.....	33
Abb. 26: V1 Relative N ₂ O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	34
Abb. 27: V1 Relative CO ₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	34
Abb. 28: V1 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	36
Abb. 29: V2 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	37
Abb. 30: V2- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase.....	38

Abb. 31: V2 Relative N ₂ O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	38
Abb. 32: V2 Relative CO ₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	39
Abb. 33: V2 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	40
Abb. 34: Links: V2 System 2 nach der Ernte (13. d), Rechts: V2 System 2 vor der Nachernte (17. d) Fotos Bosch 2021	42
Abb. 35: V3 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	43
Abb. 36: V3- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase.....	43
Abb. 37: V3 Relative N ₂ O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	44
Abb. 38: V3 Relative CO ₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2). Gelb = Licht an.	44
Abb. 39: V3 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze und der Wurzel bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	46
Abb. 40: V4 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	47
Abb. 41: V4- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase.....	48
Abb. 42: V4 Relative N ₂ O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	49
Abb. 43: V4 Relative CO ₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2).	49
Abb. 44: V4 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	51
Abb. 45: V5 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	52
Abb. 46: V5- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase.....	53
Abb. 47: V5 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	54
Abb. 48: V6 Aussehen der Gerstenpflanzen nach 11 d, links: System 1; rechts: System 2. Halme stoßen bereits am Deckel an.....	55
Abb. 49: V6 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	56
Abb. 50: V6- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase.....	56
Abb. 51: V6 Relative N ₂ O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	57
Abb. 52: V6 Relative CO ₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)	57
Abb. 53: V6 Ammonium-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	58
Abb. 54: V6 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	59
Abb. 55: V7 pH, Sauerstoff und Temperatur.....	61
Abb. 56: V7- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase (ähnlich wie V3).....	61
Abb. 57: V7 Relative N ₂ O Konzentrationen „#1“ System 1 (pH 6); „#2“ = System 2 (pH 8) ...	62

Abb. 58: V7 Relative CO ₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2).	62
Abb. 59: V3 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)	64
Abb. 60: NO ₃ -N im Wasser.....	65
Abb. 61: NO ₃ im Gras in % bezogen auf die Trockenmasse.....	65
Abb. 62: Zusammensetzung der Pflanzen aus der Abschlussernte (nach 14 d) bei Nitrat (oben) und Kalium (unten) als Funktion der Konzentrationen in der Nährlösung bei Start der Versuche. Angaben für NO ₃ ⁻ bzw. Kalium im Gras jeweils als % bezogen auf Trockenmasse.	66
Abb. 63: Verhältnis der K ⁺ und NO ₃ ⁻ -Ionen in der Nährlösung („Wasser“) bei Start der Versuche und der Pflanze bei der Abschlussernte. Bei den mit  gekennzeichneten Punkten handelt es sich um identische Proben, die auf die Kalium- bzw. die Nitratkonzentration bezogen werden (obere bzw. untere X-Achse).	67
Abb. 64: Zusammensetzung der Pflanzen in der Abschlussernte (nach 14 d) bei Ammonium (oben), Phosphat (Mitte) und Magnesium (unten) als Funktion der Konzentrationen in der Nährlösung bei Start der Versuche. Angaben für Gras jeweils als % bezogen auf Trockenmasse.....	68
Abb. 65: PO ₄ ³⁻ -P im Gras in % der Trockenmasse.....	69
Abb. 66: Lösliche Bestandteile der Pflanzen bezogen auf die (gesamte) Pflanzen-Trockenmasse.....	69
Abb. 67: Erntemengen und Aufteilung auf die Bestandteile Blatt, Stängel und Wurzel (alles bezogen auf Feuchtmasse)	70
Abb. 68: Wasserverbrauch in % der eingesetzten Menge	71
Abb. 69: Höhenwachstum Gerstengras	71
Abb. 70: N ₂ O im Gasraum	72
Abb. 71: CO ₂ im Gasraum	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Im Voraus geplante (grau) u. tatsächliche bzw. geplante Zeiträume (blau) für Durchführung der Arbeitspakete	9
Tab. 2 Geräte für den Wasserkreislauf	13
Tab. 3 Geräte für die Lachgas und CO ₂ Messung (s. Abb. 8)	17
Tab. 4 Gesamt-Sequenz + Zeitschaltung. Die Schritte 1 bis 6 werden ständig wiederholt. „Schalter“ = Relais = Ziffern in Abb. 11	19
Tab. 5: Eigenschaften des Düngers Yara Tera® Kristalon® Scarlet nach Herstellerangaben	19
Tab. 6: Konzentrationen der Haupt-Nährstoffe in der Nährlösung jeweils beim Start der Versuche (berechnet)	20
Tab. 7: Nebenbestandteile der Blumenerde (laut Aufdruck):	21

Inhalt	6
<hr/>	
Tab. 8: Übersicht der Ziele und Besonderheiten bei den Versuchen V1-V7	26
Tab. 9 Gesamt-Sequenz für V4. Die Schritte 1 bis 4 werden ständig wiederholt.	27
Tab. 10 Küvetten-Testsätze für Analysen (Hersteller: HACH)	28
Tab. 11: Keimversuch 2 Beobachtungen	31
Tab. 12: V2 Zusätzliche Analysen	41

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

bez.	bezogen
TM	Trockenmasse
V1/Syst1	Versuch 1 System 1
V1/Syst2	Versuch 1 System 2
V2(...V7) / Syst1(...Syst 2)	Versuch 2 (bis Versuch 7) / System 1 (bis System 2)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Nitrat wird meist als unerwünschter Bestandteil von Lebensmitteln wahrgenommen. Diese Annahme basiert auf Untersuchungen aus den 70er Jahren, bei denen festgestellt wurde, dass aus Nitrat in kleinen Mengen Nitrosamine gebildet werden können, die bei hoher Dosierung krebserregend wirken. Die Befürchtung, dass Nitratkonsum das Krebsrisiko erhöhen kann gilt inzwischen als entkräftet, auch durch die Tatsache, dass Personen mit einem hohen Gemüsekonsum (=Nitratverzehr) tendenziell eher ein geringeres Krebsrisiko aufweisen.

In der wissenschaftlichen Forschung ist inzwischen ein anderer Aspekt von Nitrat in Gemüse interessant geworden. Aus Nahrungsnitrat kann im Körper auf natürliche Weise Stickstoffmonoxid (NO) entstehen, eine Substanz, die die Gesundheit in vielfältiger Weise fördert. Für die Entdeckung dieser Eigenschaften wurde 1998 der Nobelpreis für Medizin verliehen. Beispielsweise wird durch erhöhte Aufnahme von nitratreichem Gemüse der Blutdruck gesenkt (Jonvik et al. 2016) und die Leistungsfähigkeit beim Ausdauersport gesteigert (Larsen et al. 2007).

In Großbritannien („Beet It“) und den USA („neogenesis“) sind bereits solche nitratreichen Gemüse-Produkte in signifikanter Menge auf dem Markt. Eine Untersuchung der Zahnmedizinischen Fakultät der Universität Würzburg zeigte, dass nitratreiche Gemüsesäfte die Zahngesundheit fördern (Jockel-Schneider et al. 2016).

Ein Problem für die Produktion von Lebensmitteln mit solchen gesundheitsfördernden Eigenschaften sind die großen Schwankungen der Nitratgehalte, die selbst innerhalb einer Gemüsesorte um das fünf- bis 70-fache auseinanderliegen können (Bundesinstitut für Risikoforschung 2005). Um jedoch Lebensmittel mit einer möglichst gleichbleibenden Qualität zu erzeugen, bedarf es standardisierter Gemüse-Rohstoffe mit konstanten und ausreichend hohen Nitrat- bzw. Nährstoffkonzentrationen.

In einer Bodenkultur müsste mit hohen Düngemittelgaben die Versorgung solcher Pflanzen sichergestellt werden und eine unkontrollierte Verunreinigung des Grundwassers mit Nitrat wäre unausweichlich. Für die Produktion solcher nitrathaltigen Pflanzen bieten sich daher besonders hydroponische Systeme an, da hier mit einer weitgehenden Kreislaufführung des Wassers eine kontrollierte, schadstofffreie Aufzucht von Pflanzen ohne Nitrat-Emissionen in das Grundwasser möglich wird.

Ein weiterer Vorteil der Hydroponik ist die Möglichkeit, dass hier Wasser mit hohem Nitratgehalt genutzt werden kann, z.B. nicht als Trinkwasser geeignetes Grundwasser oder auch Abwasser aus Fischzucht-Anlagen - hier wird das als „Aquaponik“ bezeichnete Verfahren bereits vereinzelt eingesetzt. Auch diese Art der Nutzung trägt zur Verminderung der Nitrat-Emissionen in die aquatische Umwelt bei.

Das Treibhausgas Lachgas (N_2O) trägt wesentlich zur Zerstörung der Ozonschicht bei und verursacht, nach CO_2 und Methan, den dritthöchsten Beitrag zum Klimawandel. Der größte Teil davon entsteht in der Landwirtschaft durch mikrobielle Zersetzung von Stickstoffdüngern (Tian et al. 2019). Wieviel Lachgas tatsächlich entsteht, ist in erster Linie abhängig von der eingesetzten Düngemittelmenge (Li et al. 2015) aber auch u.a. vom wassergefüllten Porenraum (WFPS) (Bateman und Baggs 2005), von der Art der Bodenbearbeitung (Jahangir, Mohammad Mofizur Rahman et al. 2011) und der Bodentemperatur (Li et al. 2015).

Lachgas kann bei Nitrifikation oder Denitrifikation entstehen. Welche Prozesse überwiegen ist von den Umweltbedingungen abhängig. So wird durch einen hohen Anteil organischer Düngemittel eine Denitrifikation mit N_2O -Produktion bevorzugt (Akiyama et al. 2004).

Bei aquaponischen Systemen kann ca. 0,72 bis 1,03 % des eingebrachten Stickstoffs zu Lachgas umgewandelt werden (Wongkiew et al. 2018). Llorach-Massana et al. 2017 konnten jedoch zeigen, dass N_2O -Emissionen aus erdelose Kulturen im Vergleich zu konventionellen Kulturen deutlich geringer waren.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel des Projekts war es ein hydroponisches System zu entwickeln, mit dem den Pflanzen einerseits eine ausreichende Menge an Nitrat in der Nährlösung zur Verfügung gestellt wird, um konstante definierte Nitratgehalte im Lebensmittel zu erzeugen. Damit kann ein weitgehend geschlossener Wasserkreislauf etabliert werden, um Nitrat-Emissionen in das Grund- oder Abwasser vollständig zu vermeiden.

Eine Bachelorarbeit am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft hatte zuvor gezeigt, dass sich mit einem hydroponischen System ein Gehalt von bis zu 3,4 % Nitrat-N (15 % Nitrat als NO_3^-) in der Trockenmasse einer Gerstengras-Probe erzeugen lässt (Löffler 2018). Nun sollten die Parameter ermittelt werden, die die Inhaltsstoffe beeinflussen haben, wie Erntezeitpunkt, Temperatur, pH, Nitratkonzentrationen in der Nährlösung und die Zufuhr weiterer wichtiger Mineralstoffe (z.B. Kalium, Eisen).

Messungen der N_2O Emissionen sollen zeigen, inwieweit sich die verschiedenen Bedingungen darauf auswirken.

1.3 Aufgabenstellung

Um in einem hydroponischen System bestmögliche Bedingungen zu entwickeln, um definierte, möglichst konstante Nährstoffwerte in der Pflanze zu erhalten, sollte zunächst untersucht werden, inwieweit sich die Nährstoff- und Mineralstoff-Konzentrationen, der Erntezeitpunkt (am Tag), sowie der pH-Wert auf Wachstum und Nährstoffkonzentrationen in der Pflanze auswirken. Dazu wurden zwei baugleiche Labor-Systeme mit je einem geschlossenen Wasser-Kreislauf hergestellt.

Eine zusätzliche Aufgabe bestand in einer kontinuierlichen Messung von Lachgas und CO_2 . Hiermit sollte untersucht werden, ob eine hydroponische Anbauweise möglicherweise eine Verringerung der Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zu konventionellen Anbaumethoden erwarten lässt.

Zur Kontrolle wurden kontinuierlich pH, Sauerstoff, Leitfähigkeit und Temperatur gemessen, um die Bedingungen bei Bedarf nachführen zu können. Durch die beiden baugleichen Anlagen soll erreicht werden, dass statistisch abgesicherte Ergebnisse gewonnen, bzw. Ausreißer erkannt werden können.

2 Projektverlauf - Vergleich mit Arbeitsplan

Das Projekt wurde ab dem 30.11.2020 genehmigt und damit offiziell gestartet, jedoch ging uns die Bewilligung erst am 16.12.2020 zu. Aufgrund der Feiertage und krankheitsbedingten bedingten langen Bearbeitungszeiten der Verwaltung konnte erst ab 1. März Personal für dieses Projekt eingesetzt werden. Damit konnte erst 3 Monate später mit den eigentlichen Arbeiten für das Projekt begonnen werden (s. Tab. 1). Als der Aufbau der Anlagen abgeschlossen war, konnten wir auch einen Kandidaten für eine Bachelorarbeit gewinnen, um ein Thema im Rahmen des Projektes zu bearbeiten.

Tab. 1: Im Voraus geplante (grau) u. tatsächliche bzw. geplante Zeiträume (blau) für Durchführung der Arbeitspakete

Arbeitspakete (AP)	Partner		Monat												
	ISWA	AUR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AP1 Bau und Inbetriebnahme der Hydroponik-Anlage															
Konstruktion und Bau Anlage	X	X													
Funktionstest und Inbetriebnahme	X	(X)													
AP2 Einfluss Nitratkonz. auf Inhaltsstoffe in Pflanze und N₂O															
Definition + Herstellung Basis-Nährstofflösung, Nitratkonzentrat	X	(X)													
Versuche mit Hydroponikanlage und Nitrat und Lachgas	X														
AP3 Einfluss pH auf Inhaltsstoffe in Pflanze und N₂O															
Herstellung Pufferkonzentrate und Test	X														
Versuche Hydroponik mit unterschiedlichen pH-Werten	X														
AP4 Einfluss von Schimmelpilz- und Bakterien-hemmenden Agenzien															
Test Wasserstoffperoxid, Olivenabwasser	X														
Test Belüftung und intensive Rezirkulation	X														
AP5 Dokumentation, Berichte															
	X	X													

AP = Arbeitspaket, AU = Aurapa, ISWA = Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Arbeitsbereich BIOS der Universität Stuttgart, X = Partner bearbeitet AP hauptsächlich, (X) = Partner wirkt beratend mit.

AP4 wurde nicht durchgeführt, da bei den anderen Versuchen, anders als gedacht, keine Zeichen von Schimmelpilzbefall auftraten. Dies könnte daran liegen, dass der Versuchszeitraum mit 14 d zu kurz für eine Entwicklung von Pilzen war, es könnte aber auch an den relativ keimarmen Bedingungen in den Pflanzenbehältern gelegen haben, denn auf ein Pflanzsubstrat wurde hier bewusst verzichtet. Somit hätte es keine Referenz zu den Versuchen gegeben, und dies wäre wenig sinnvoll gewesen.

Stattdessen wurden orientierende Versuche mit Boden (Blumenerde) als Vergleich zur hydroponischen Betriebsweise, ein Versuch ohne Abdeckung, um eher praxisrelevante Bedingungen zu simulieren, sowie ein Versuch mit Ammonium statt Nitrat als N-Dünger durchgeführt.

Für die praktische Anwendung dieses Verfahrens sollte der technische Aufbau einer Hydroponik-Anlage so einfach wie möglich gestaltet werden. Bei Aurapa wurde dazu ein Prototyp mit handelsüblichen Kisten hergestellt und getestet. Die ermittelten Nitratgehalte der Gerstengras-Pflanzen waren in einer vergleichbaren Größenordnung wie diejenigen der hier beschriebenen Versuche (s. Abb. 1).



Abb. 1: Versuche mit Prototyp (Foto: Pöhnl 2021)

3 Material und Methoden

3.1 Gerstensaatgut

Bei allen Versuchen kam die Wintergerstensorte KWS Meridian ungebeizt (Etikett des Saatgutsacks) zum Einsatz. Nach Herstellerangaben ist dies eine ausgewogene Hohertragsorte, die eine gleichmäßige Abreife und eine gute Winterhärte besitzt. Das Tausend-Korn- (TKG = Masse von 1000 Gerstenkörnern) wird mit 48,0 g und die Keimfähigkeit mit 99 % angegeben (KWS 2021).

Die Körner sind ca. 9 mm lang und 3 mm bis 4 mm breit (s. Abb. 2). Von verschiedenen Autoren wurde ein Natriumhypochlorid Bad eingesetzt (30 min 20 % NaOCl) um einen Pilzbefall vorzubeugen, dies wurde bei den hier durchgeführten Versuchen nicht angewendet (Al Ajmi et al. 2009).



Abb. 2: Wintergerste KWS Meridian. Links: Saatgut; Rechts: Pflanze (Bild: KWS 2021)

3.2 Vorversuche Keimung

Ziel der Vorversuche zur Keimung der Gerste war es eine einfache, zuverlässige und reproduzierbare Methode zu erhalten, um sie bei den nachfolgenden Hauptversuchen einzusetzen.

3.2.1 Keimversuch 1

Dieser Versuch wurde durchgeführt, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Temperaturen bei der Keimung zu untersuchen. Es wurden zweimal je 100 Samen (ca. 4,8 g) in Wasser bei 20 °C Zimmertemperatur quellen gelassen und nach 12 Stunden auf ein feuchtes saugfähiges Papiertuch in Saatschalen verteilt. Die Saatschalen wurden mit dafür vorgesehenen Deckeln abgedeckt. Die Gerstensamen in Schale eins (System 1) wurden bei Zimmertemperatur (20 °C) im dunklen vier Tage lang keimen gelassen (s. Abb. 3). Die Samen in Schale zwei (System 2) wurde im dunklen Kühlschrank bei 6 °C vier Tage lang keimen gelassen.



Abb. 3: Keimversuch 1 (Foto: Bosch 2021)

3.2.2 Keimversuch 2

Bei Keimversuch 2 wurden, wie bei Keimversuch 1, zu je 100 Samen ca. 1 L Wasser zugegeben. Die Samen in System 1 wurden bei 20 °C Zimmertemperatur und diejenigen in System 2 im Kühlschrank bei 6 °C quellen gelassen. Die gequollenen Körner beider Ansätze wurden dann nach 23 h jeweils auf ein feuchtes saugfähiges Papiertuch in die Saatschale gelegt. Die Dauer des Quellens war in Keimversuch 2 annähernd doppelt so hoch. Die Saatschalen wurden wie in Keimversuch 1 mit dem dafür vorgesehenen Deckel abgedeckt. Anschließend wurden die Schalen die ersten vier Tage in einem dunklen Schrank (ca. 20°C), danach auf der Fensterbank bei Tageslicht (ca. 20 °C) gelagert.

3.2.3 Berechnung der Keimrate

Bei den in Kap. 4.2 beschriebenen Vorversuchen berechnet sich die Keimrate wie folgt (s. Gleichung (1)):

$$\text{Keimrate in \%} = \text{Zahl der gekeimten Gerstenkörner} / \text{Gesamtzahl der Gerstenkörner} \cdot 100 \quad (1)$$

3.3 Aufbau der Laboranlagen für die Hauptversuche

3.3.1 Wasserkreislauf

Die beiden baugleichen Anlagen für die Laborversuche bestanden aus kostengünstigen Komponenten (s. Abb. 4). Die Betriebsweise der beiden Anlagen entspricht einem „Ebbe- und-Flut“ System. Hierbei werden die Wurzeln der Pflanzen in regelmäßigen Abständen mit Nährlösung geflutet, um danach wieder mit Luft in Kontakt zu kommen. Hierdurch werden Schimmelbildung und Fäulnisprozesse weitgehend vermieden.

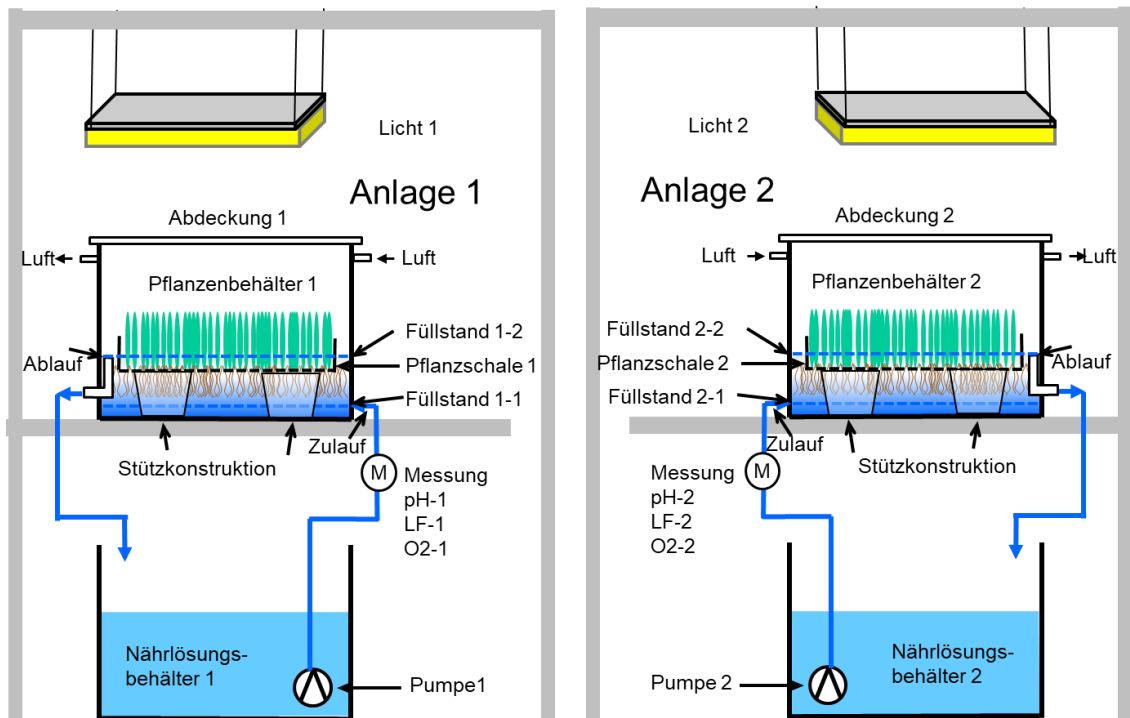


Abb. 4: Schema Anlagen für Laborversuche - Kreislauf der Nährlösung (Anlage 1 = System 1, Anlage 2 = System 2)

Die verwendeten Geräte hierzu finden sich in Tab. 2.

Tab. 2 Geräte für den Wasserkreislauf

Bezeichnung im Schema	Beschreibung	Lieferant	Volumen in L
Nährlösungsbehälter	Eurobox, grau 367 mm * 269 mm * 316 mm innen	www.brb-lagertechnik.de	31,2
Pflanzenbehälter	Eurobox, weiß 367 mm * 269 mm * 316 mm innen	www.brb-lagertechnik.de	31,2
Pflanzschale, bestehend aus	Kunststoffschale, weiß, PP, 305 mm * 245 mm * 65 mm Edelstahlgitter 2 mm Maschenweite V4A	www.brb-lagertechnik.de www.drahtgewebe-shop.de	1,1 -
Stützkonstruktion (für Pflanzschalen)	Ehemalige Eisschachteln aus PE mit Löchern und Beschwerungen aus Edelstahlschrauben versehen	Eigenbau	-
Abdeckung	PLEXIGLAS-Glasklar-Platte 400 mm * 300 mm * 4 mm	plexiglasfachhandel24	-
Licht	LED Pflanzenlampe, Roleadro 75W	Roleadro Pflanzenlampe	-
Pumpe (für Nährlösung)	Eheim compactOn 1000 230 Volt	www.aquatuning.de	-
Messung pH, LF	WTW Multiline P4 mit Sensoren von WTW und Sensortechnik Meinsberg	https://www.wtw.com/de	-
Messung O ₂	Greisinger GMH 3611 mit Sauerstoffsonde	www.greisinger.de	-
Zulauf	PVC-Rohr mit Kabeldurchführung	www.pvc-welt.de	-
Ablauf	PVC-Rohr mit Kabeldurchführung, drehbar um verschiedene Füllstände zu erzeugen	www.pvc-welt.de	-
Verbindungen Nährlösungsbehälter - Pflanzenbehälter	PVC- Schläuche		-

Abb. 5 zeigt ein Foto der beiden kompakten Anlagen.



Abb. 5: Laboranlage Hydroponik - Unten: Nährlösungsbehälter, Mitte: Pflanzenbehälter, Oben: LED-Lampen zur Beleuchtung.

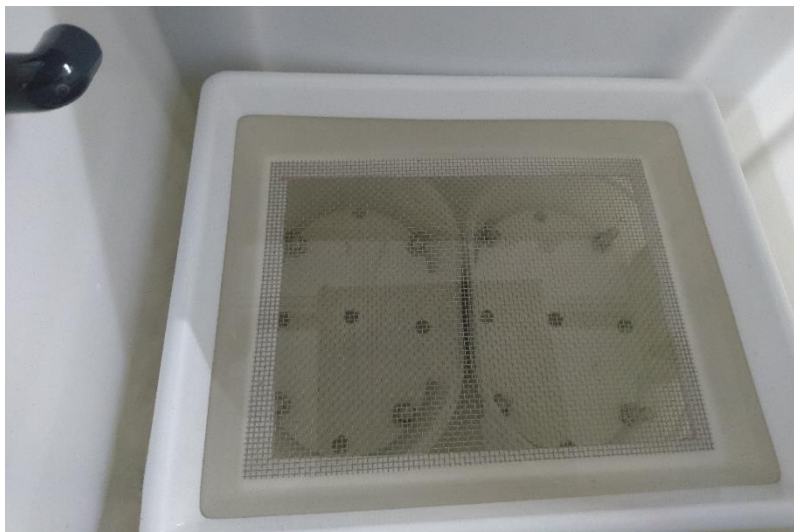


Abb. 6: Pflanzschale mit Edelstahlgitter in Pflanzenbehälter mit Stützkonstruktion beim Testlauf mit Wasser

Für die Aufnahme der Gerstenkörner wurde eine spezielle Pflanzschale aus einer Kunststoffschale hergestellt (s. Abb. 6). Der Boden der Schale wurde herausgetrennt und ein Einsatz aus Edelstahlgitter mit 2 mm Maschenweite mit Heißkleber verklebt. Auf diesem Edelstahlgitter wurden die gequollenen Körner verteilt und nach dem Keimprozess auf der Stützkonstruktion in die Pflanzenbehälter eingesetzt.

Auf den Pflanzenbehältern wurden Plexiglas-Abdeckungen angebracht, die mit Wäscheklammern fixiert wurden, um N_2O und CO_2 im Gasraum der Pflanzenbehälter messen zu können (s. Abb. 7). Der Abstand der Lampen („Licht 1“ und „Licht 2“ in Abb. 4) zu den Plexiglasscheiben („Abdeckung 1“ und „Abdeckung 2“ in Abb. 4) wurde auf 12,5 cm eingestellt.



Abb. 7: Pflanzenbehälter mit Gerstengras, Plexiglasabdeckung und Beleuchtung während der Versuche

Die Pumpe wurde in 1,5 h jeweils 15 min lang eingeschaltet, um die Nährlösung in die Pflanzenbehälter zu fördern. Über den Ablauf floss sie wieder zurück in den Nährlösungsbehälter. In diesem Zeitabschnitt wurde der Füllstand 1-2 bzw. 2-2 im Pflanzenbehälter erreicht (s. Abb. 4). Nach dem Ausschalten der Pumpe lief das Wasser durch die Pumpe zurück in den Nährlösungsbehälter und der untere Füllstand 1-1 bzw. 2-1 (Höhe ca. 1...1,5 cm) und damit eine Belüftung der Wurzeln wurde erreicht. Nach 75 min Pause wurde die Pumpe wieder für 15 min eingeschaltet. Dieser Rhythmus wurde Tag und Nacht weitergeführt und über das PC-Programm Multimes (s. Kap. 3.5) gesteuert (gesamte Sequenz, s. Tab. 4). Eine Ausnahme bildete der Versuch V4 - die Einstellungen hier werden unter Ergebnisse (Kap. 4.2.4) beschrieben.

Um einen zuverlässigen und störungsfreien Betrieb der Anlage zu gewährleisten, wurden die O_2 - und pH-Elektroden jeweils nach ca. 14 d gereinigt und neu kalibriert.

Ein Wassersensor (Ifm KQ6001) wurde etwa in der Mitte der Wand des Pflanzenbehälters außen angebracht um einen unbeabsichtigten Anstieg des Wasserstandes zu detektieren. In diesem Fall wird die jeweilige Wasserpumpe automatisch ausgeschaltet und die Verbindung zur Gasmessung gestoppt, um die Messgeräte für die Gasmessung zu schützen. Erfreulicherweise musste diese „Notabschaltung“ im Verlauf der Versuche nicht ausgelöst werden, jedoch bei Versuch 3 System1 wurde diese unbeabsichtigt ausgelöst, da die Pflanzen zu dicht an der Seitenwand des Pflanzenbehälters wuchsen. Daher war die Wasserpumpe hier drei Tage lang ausgeschaltet.

Um die Versuche unabhängig von saisonalen Temperaturschwankungen durchführen zu können, wurden zwei Kühlaggregate vorgesehen. Diese mussten dann aber nicht eingesetzt werden, da sich der Versuchsraum im Untergeschoss befand und sich in den Nährlösungen ausreichend konstante Temperaturen einstellten.

3.3.2 Gasmessungen

Zur Messung der N_2O Emissionen stand ein Gerät der Firma Horiba zur Verfügung. Um in den beiden Anlagen abwechselnd zu messen, musste eine Messstellen-Umschaltung installiert werden. Dies wurde mit Magnetventilen realisiert, die vom PC über mehrere Relaisboxen (Cleware USB-Switch 4) geschaltet wurden (s. Kap. 4.1.3). Abb. 8 zeigt das Schema der Gasmessung.

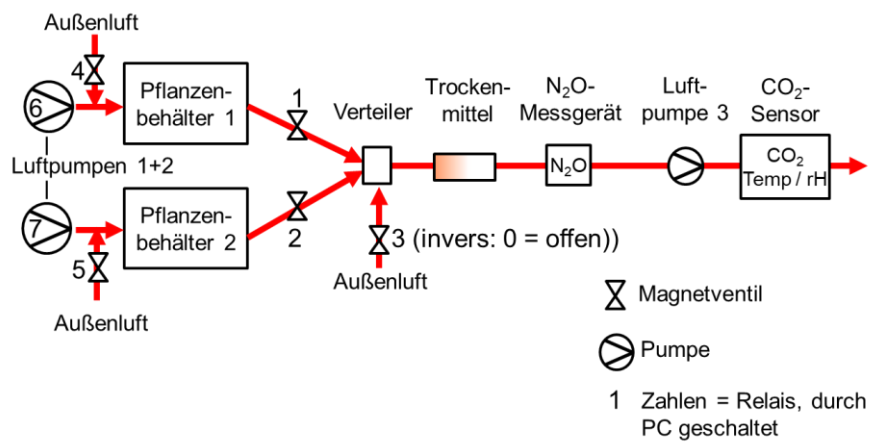


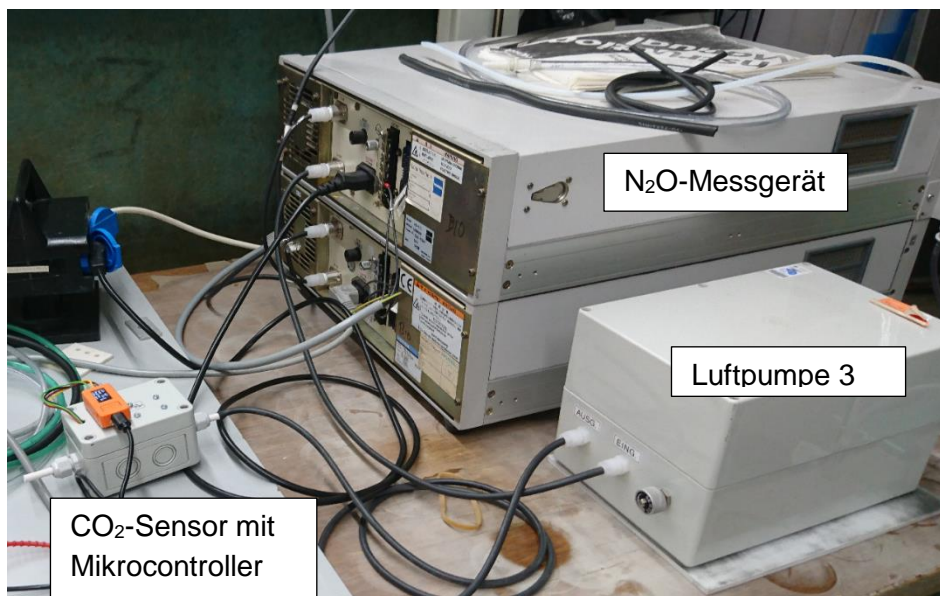
Abb. 8: Schema Gasmessung (rote Pfeile zeigen die Richtung des Gastransports an)

Die Probenahme für die Gasmessung erfolgte kontinuierlich über die oberen Anschlüsse am Pflanzenbehälter („Luft“ in Abb. 4). Damit die Lachgas- und CO_2 -Konzentrationen auf einem realistischen Konzentrationsniveau blieben, wurden die Pflanzenbehälter zwischen den eigentlichen Gas-Messungen mit den Luftpumpen 1 + 2 („6“ und „7“ in Abb. 8) belüftet.

Alle Geräte für die Messungen in der Gasphase werden in Tab. 3 aufgelistet. Abb. 9 und Abb. 10. zeigen die Sensoren zur N_2O und CO_2 Messung.

Tab. 3 Geräte für die Lachgas und CO₂ Messung (s. Abb. 8)

Bezeichnung	Beschreibung	Hersteller - Type	Kommentare
Luftpumpe 1 + 2	Zur Belüftung der Pflanzenbehälter 1 + 2	Aqua-Forte HI-Flow V-30	25 W, <40 dB, 30 L/min
Magnetventile	Zur Umschaltung der Gasströme	Riegler MV 1412 G1/2"	
Verteiler (Messing)	Gasströme aus beiden Anlagen zu Messgeräten führen	Riegler VT 1000 5 Anschlüsse G1/2"	Ein Anschluss als Kondensatsammler genutzt
Trockenmittel	Zum Schutz des N ₂ O Messgerät vor zu hoher Luftfeuchtigkeit	unbekannt	Kieselgel mit Feuchtigkeitsindikator, orange. Wechsel alle (2 bis 3) d
N ₂ O Messgerät (Lachgas)	Prinzip: NIR-Absorption	Horiba (Model: VIA 510 N2O)	
Luftpumpe 3	Erzeugt gleichmäßigen Luftstrom durch Messgeräte	Horiba	
CO ₂ Sensor	Photoakustische CO ₂ Messung	Sensirion SCD 41 an ESP M5 Stick C	Anschluss an Mikrocontroller M5 Stick C mit Programm in der Arduino (C++) Programmiersprache. Daten über WLAN an M5Atom über USB mit PC verbunden

Abb. 9: Geräte zur Gasmessung (der eigentliche CO₂-Sensor ist in der Elektro-Schaltbox angebracht)

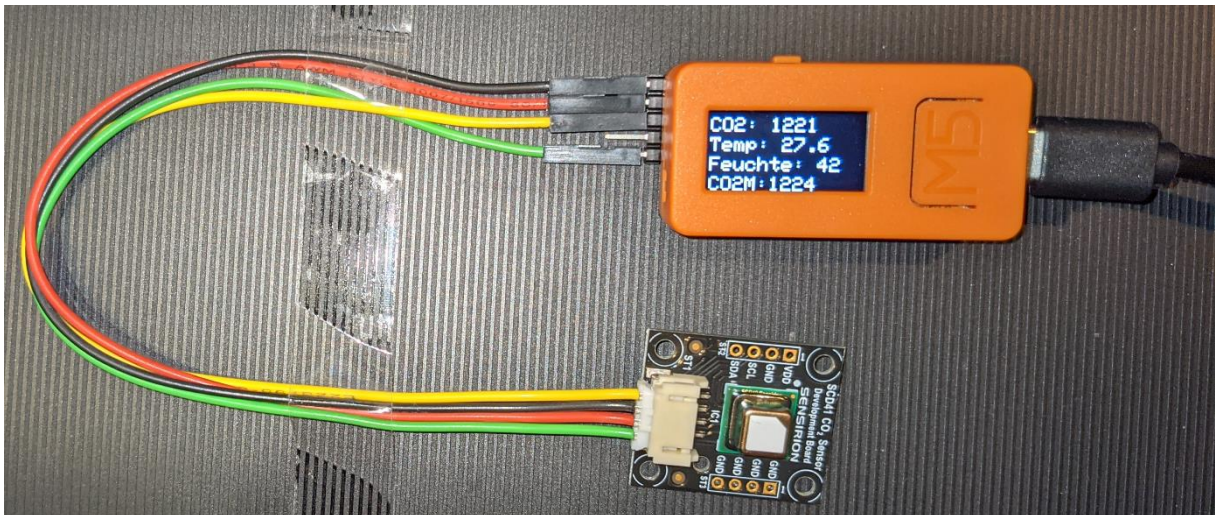


Abb. 10: CO₂-Sensor Sensirion SCD41 mit Mikrocontroller M5 Stick C

3.3.3 Betriebsweise

Sowohl der Wasserkreislauf, als auch die Gasmessung wurde kontinuierlich in 15 min Intervallen im Wechsel geschaltet. Dabei blieb der Luftraum des Pflanzenbehälters 1 für 60 min ein geschlossenes System, um danach die Gasmessung 1 zu starten. Anschließend wurde mit der Luftpumpe 1 („6“ in Abb. 8) zur Belüftung 15 min lang Außenluft in die Pflanzenbehälter geleitet. Danach wurde die Wasserpumpe („8“ in Abb. 8) 15 min eingeschaltet, um die Pflanzen mit Nährlösung zu versorgen. Im Anschluss daran wurden die entsprechenden Schritte für Anlage 2 durchgeführt.

Das Gesamt-Schema der geschalteten Geräte zeigt Abb. 11. Die Sequenz der einzelnen Schaltschritte kann aus Tab. 4 entnommen werden.

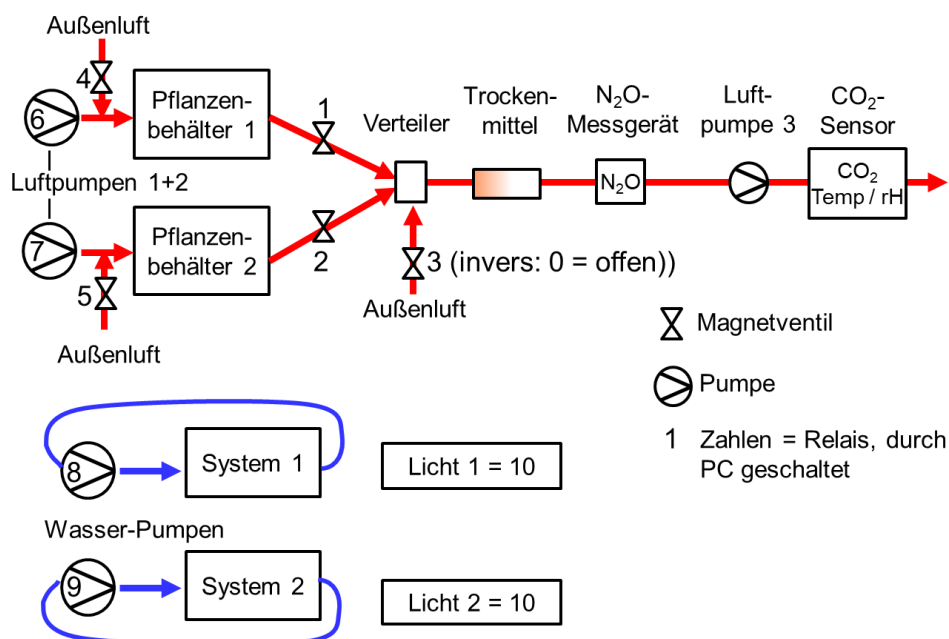


Abb. 11: Schema Gas + Wasser: alle per PC geschalteten Geräte sind mit Zahlen gekennzeichnet (s. Tab. 4).

Tab. 4 Gesamt-Sequenz + Zeitschaltung. Die Schritte 1 bis 6 werden ständig wiederholt. „Schalter“ = Relais = Ziffern in Abb. 11

Schritt	Bezeichnung	Stellung Schalter							Messung von	Stellung Schalter			Zeit
		1	2	3 (invers)	4	5	6	7		8	9	10	
1	Gas-messung 1	1	0	1	1	0	0	0	Gas System 1	0	0	0 / 1	15 min
2	Lüftung 1	1	0	0	0	0	1	0	Außenluft	0	0	0 / 1	15 min
3	Wasserpumpe 1	0	0	0	0	0	0	0	Außenluft, Wasser 1	1	0	0 / 1	15 min
4	Gas-messung 2	0	1	1	0	1	0	0	Gas System 2	0	0	0 / 1	15 min
5	Lüftung 2	0	1	0	0	0	0	1	Außenluft	0	0	0 / 1	15 min
6	Wasserpumpe 2	0	0	0	0	0	0	0	Außenluft, Wasser 2	0	1	0 / 1	15 min
Regelung - Zeitschalt													
	Licht an								Licht an			1	10:00
	Licht aus								Licht aus			0	18:00

Die Pflanzenlampen für Anlage 1 und 2 wurden täglich um 10:00 ein- und um 18:00 ausgeschaltet (s. Tab. 4).

3.4 Substrate und Nährlösungen

3.4.1 Nährlösungen für die Hauptversuche

Im Leitungswasser der Bodensee-Wasserversorgung sind bereits geringe Mengen an Nährstoffen enthalten.

Tab. 5: Eigenschaften des Düngers Yara Tera® Kristalon® Scarlet nach Herstellerangaben¹

Nährstoff als...	Zusammensetzung	Dim.
Gesamt- N	7,5	%
NO ₃ ⁻ -N	7,5	%
NH ₄ ⁺ -N	0	%
P ₂ O ₅	12	%
K ₂ O	36	%
MgO	4,5	%
SO ₃	10	%
Fe	0,15	%
B	0,027	%
Cu-EDTA	0,004	%
Fe-total	0,15	%
Fe-EDTA	0,075	%
Fe-DTPA	0,075	%
Mn-EDTA	0,06	%
Mo	0,004	%
Zn-EDTA	0,027	%
Weitere Eigenschaften		
Chloridarm		
Elektrische Leitfähigkeit (1 g/L in reinem Wasser)	1,3	mS/cm
Anwendungsempfehlung Dünger je Wasservolumen	1	g/L

¹ <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/duengemittel/yaratera/yaratera-kristalon-scarlet/>

Als Dünger (Nährstoffe) für die Versuche wurde das vollständig lösliche Düngemittel Yara Tera® Kristalon® Scarlet (pulverförmig, Hersteller Yara, s. Tab. 5) und Kaliumnitrat (pulverförmig, Merck EMSURE for analysis, s. Abb. 12) verwendet. Bei Versuch V6 wurde zusätzlich Ammoniumsulfat (VWR Prolabo Normapur) zugesetzt.

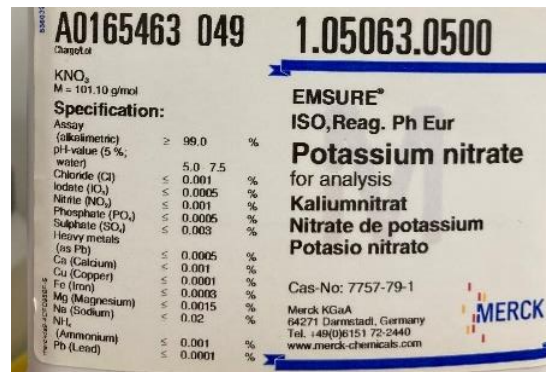


Abb. 12: Eigenschaften KNO_3 (Foto Bosch 2021)

Daraus wurden die jeweiligen Nährlösungen zusammengestellt (s. Tab. 6).

Tab. 6: Konzentrationen der Haupt-Nährstoffe in der Nährlösung jeweils beim Start der Versuche (berechnet)

Versuch	Nährstoff-Konzentration in mg/L						
	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	PO_4^{3-} -P	K	Mg	S	Fe
V1-1 ¹	0,9	0,0	0,0	1,4	8,5	11,3	0,0
V1-2	0,9	0,0	0,0	1,4	8,5	11,3	0,0
V2-1	249,1	0,0	52,4	783,7	35,6	51,4	1,5
V2-2	249,1	0,0	52,4	783,7	35,6	51,4	1,5
V3-1	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5
V3-2	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5
V4-1	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5
V4-2	0,9	0,0	0,0	1,4	8,5	11,3	0,0
V5-1	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5
V5-2	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5
V6-1	75,9	254,4	52,4	300,3	35,6	342,6	1,5
V6-2	75,9	254,4	52,4	300,3	35,6	342,6	1,5
V7-1	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5
V7-2	422,3	0,0	52,4	1267,0	35,6	51,4	1,5

3.4.2 Blumenerde (nur Versuch 4)

Für den Versuch 4 mit Blumenerde wurde die „Qualitätsblumenerde“ von Compo Sana (Compo GmbH, Münster) eingesetzt (s. Abb. 13). Bestandteile laut Aufdruck: 74 % Hochmoortorf wenig bis stark zersetzt (Zersetzungsgrad: H2 bis H8), pflanzliche Stoffe aus dem

¹ "V1-1" bedeutet: Versuch 1, System1...

Landschafts- u. Gartenbau (Grünkompost), Perlite, kohlensaurer Kalk, NPK-Dünger, N-Dünger, Methylenharnstoff, Phosphat mit Silicium, Spurennährstoffdünger.

Tab. 7: Nebenbestandteile der Blumenerde (laut Aufdruck):

400 mg/L N	Stickstoff (CaCl_2)
330 mg/L P_2O_5	Phosphat (CAL)
1000 mg/L K_2O	Kaliumoxid (CAL)
170 mg/L Mg	Magnesium (CaCl_2)
500 mg/L S	Schwefel, gesamt

Anwendungshilfsmittel: Perlite zur Verbesserung des Wasserhaushaltes



Abb. 13: Blumenerde für Versuch 4

3.5 Datenerfassung und Steuerung für die Hauptversuche

3.5.1 Datenerfassung

Um die Wasser- und Luftqualität zu erfassen, wurden die Daten der Sensoren mit Hilfe der Software MULTIMESS (Boley & Boley 1999 – 2021) im Zeitintervall von 1 min erfasst und an einen PC übertragen (Abb. 14). Gleichzeitig wurden die Messwerte zeitnah in einer Textdatei gespeichert, die später in eine Excel-Datei konvertiert wurde.

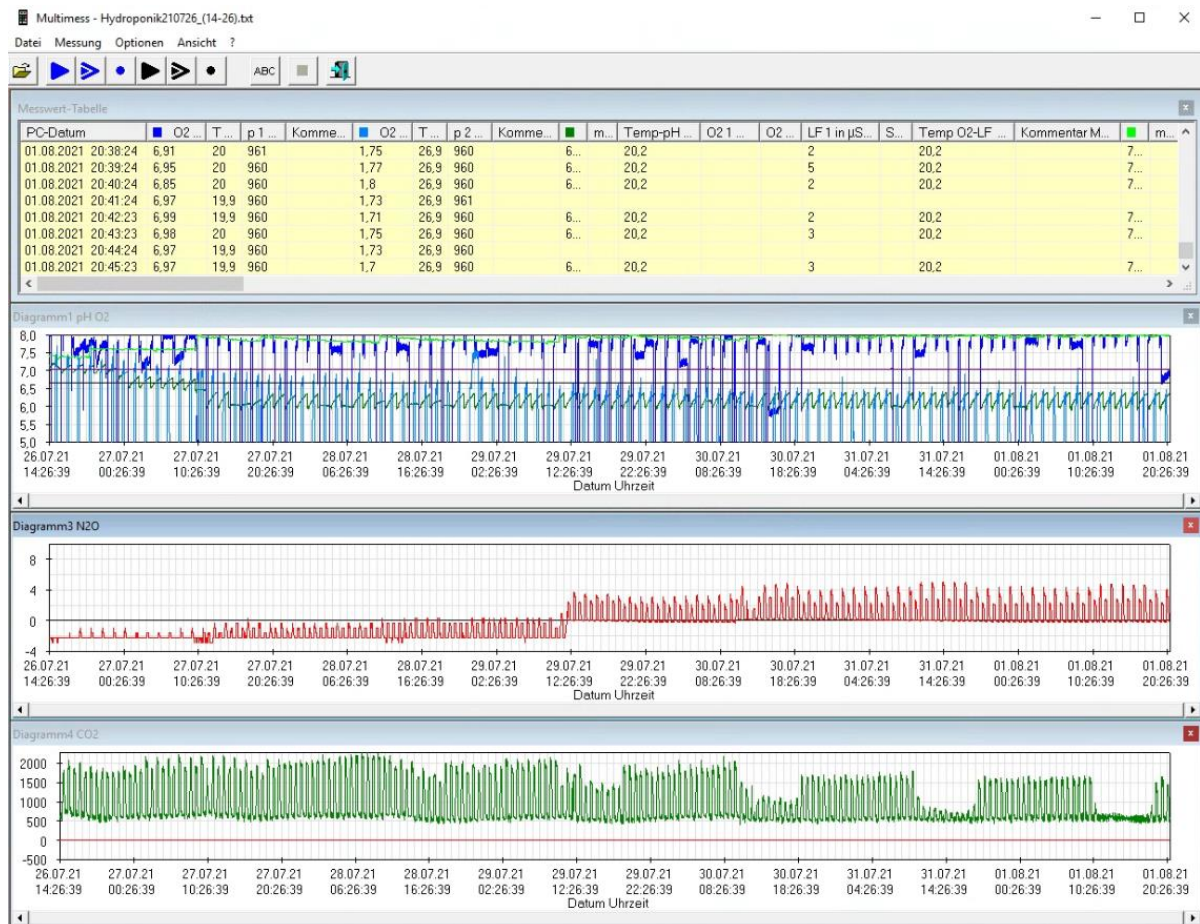


Abb. 14: "Screenshot" MULTIMESS. Oben: Wertetabelle, darunter Diagramme - hier: pH und O₂, N₂O und CO₂ Konzentrationen in Versuch 7

3.5.2 Schaltung der Relais für die Sequenzen und Regelung der Systeme 1 und 2

Mit der gleichen Software und drei Relaisboxen (Cleware USB-Switch 4) wurden Sequenzen definiert, was bedeutet, dass Pumpen und Magnetventile nach bestimmten Zeiten ein- und ausgeschaltet wurden (s. Abb. 15).

Das Relais 10 (= Licht) wird zusätzlich durch die Regelparameter (s. Abb. 16) beeinflusst und steht immer auf „EIN“, da ein Schalter nur dann tatsächlich eingeschaltet wird, wenn ihn sowohl Sequenz als auch Regelung einschalten. Relais 11 und 12 (für konstanten definierten pH) war nur bei Versuch 7 aktiv und ebenfalls durch Regelung beeinflusst.

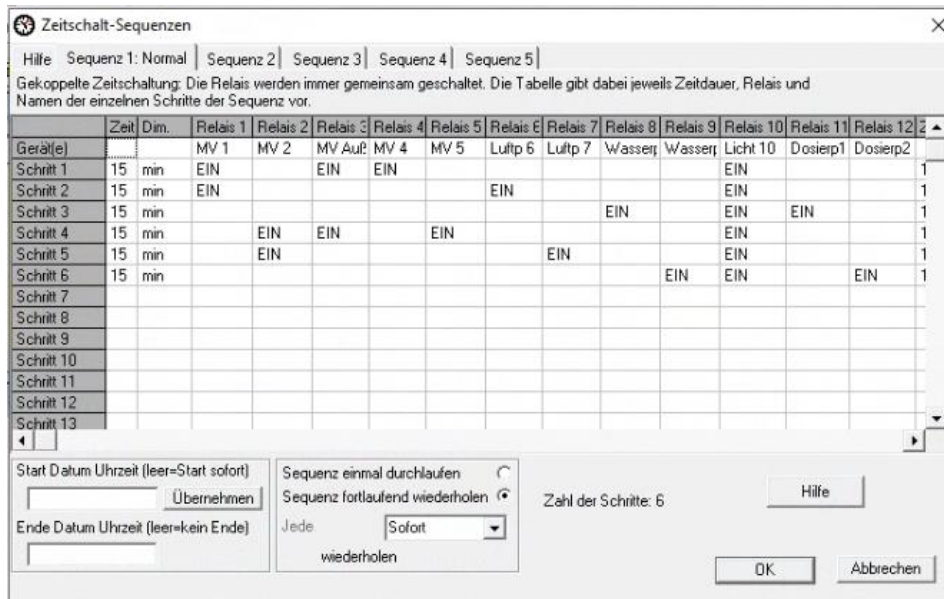


Abb. 15: Einstellungen der Haupt-Sequenz, um den kontinuierlichen Wechsel der Schaltungen zu realisieren.

Abb. 16 zeigt die Einstellung der Regelparameter. Das Licht (Regelkreis RK 1) wurde immer zur gleichen Zeit ein- und ausgeschaltet. Die Wasserpumpen (RK 2 und RK 3) sollten nur laufen, wenn die entsprechenden Sensoren kein Wasser anzeigten. RK 4 bis RK 7 war für die pH-Wert Regulierung da und nur bei Versuch 7 aktiv. Hier wurde ein pH von 6,0 (RK 4) bzw. 8,0 (RK 6) durch Dosierung einer wässrigen HNO_3 -Lösung (1 mol/L) eingestellt. Die elektrische Leitfähigkeit (LF) diente als zusätzlicher Parameter, damit eine Säure-Dosierung nur dann erfolgte, wenn die Anströmung der pH-Elektrode sichergestellt war, weil sonst die gemessenen pH-Werte nicht die Situation im Nährlösungsbehälter abbilden.

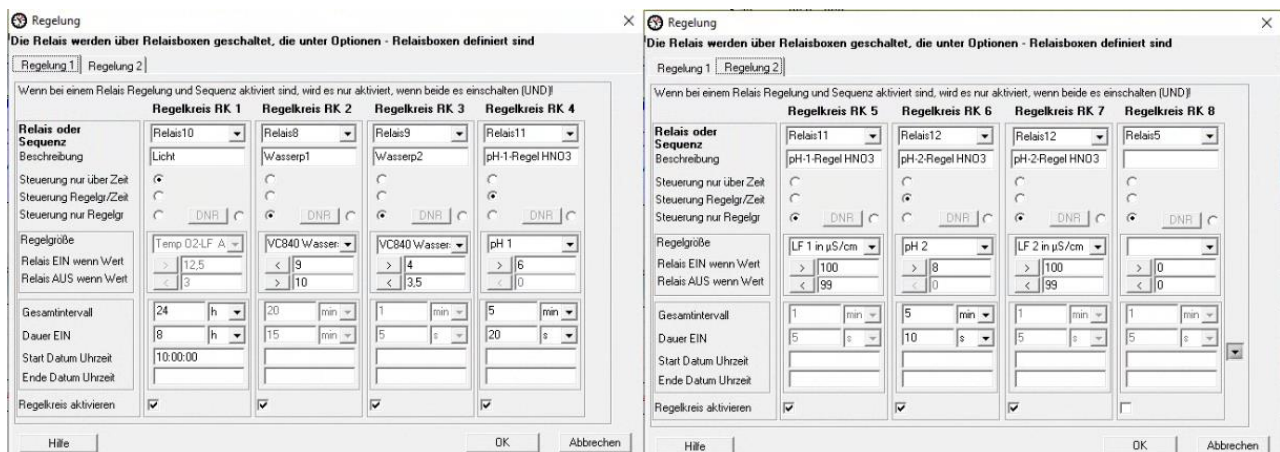


Abb. 16: Einstellungen der Regel-Parameter

3.5.3 Auswertung

Die Auswertung der so erhaltenen Online-Daten erfolgte mit Excel-Makros. Wie Tab. 4 und Abb. 15 zeigt, wurden die Relais für die beiden Systeme in Abständen von 15 min regelmä-

ßig umgeschaltet, um eine Sequenz von Schritten zu ermöglichen. Da die Stellung der jeweiligen Relais mit den jeweiligen Datensätzen abgespeichert werden, können die Messwerte den jeweiligen Schritten zugeordnet werden. Zu jedem Messwert (z.B. CO₂) und jeweils einem Schritt, z.B. „Gasmessung 1“ wurde ein Mittelwert aus den letzten 5 Messwerten (= 5 min) berechnet und in zusätzlichen Spalten eingetragen. Aus sämtlichen Mittelwerten wird dann eine neue Tabelle generiert und für die Diagramme verwendet. Bei dem Beispiel in Abb. 17 kann man so die CO₂ Konzentrationen während der verschiedenen Schritte erkennen.

Die Bedeutung der Legenden in dem Diagramm (analog auch in den weiteren Diagrammen):

- **CO₂ ppm #1 MW:** Schritt 1 - Messung im Pflanzenbehälter 1 (System 1)
- **CO₂ ppm #2 MW:** Schritt 4 - Messung im Pflanzenbehälter 2 (System 2)
- **CO₂ ppm Luft#1 MW:** Schritt 2 - Messung im Pflanzenbehälter 1 (System 1) während der Belüftung mit Außenluft
- **CO₂ ppm Luft#2 MW:** Schritt 5 - Messung im Pflanzenbehälter 2 (System 2) während der Belüftung mit Außenluft
- **CO₂ ppm Außenluft#1 MW:** Schritt 3 - direkte Messung von Außenluft
- **CO₂ ppm Außenluft#2 MW:** Schritt 6 - direkte Messung von Außenluft

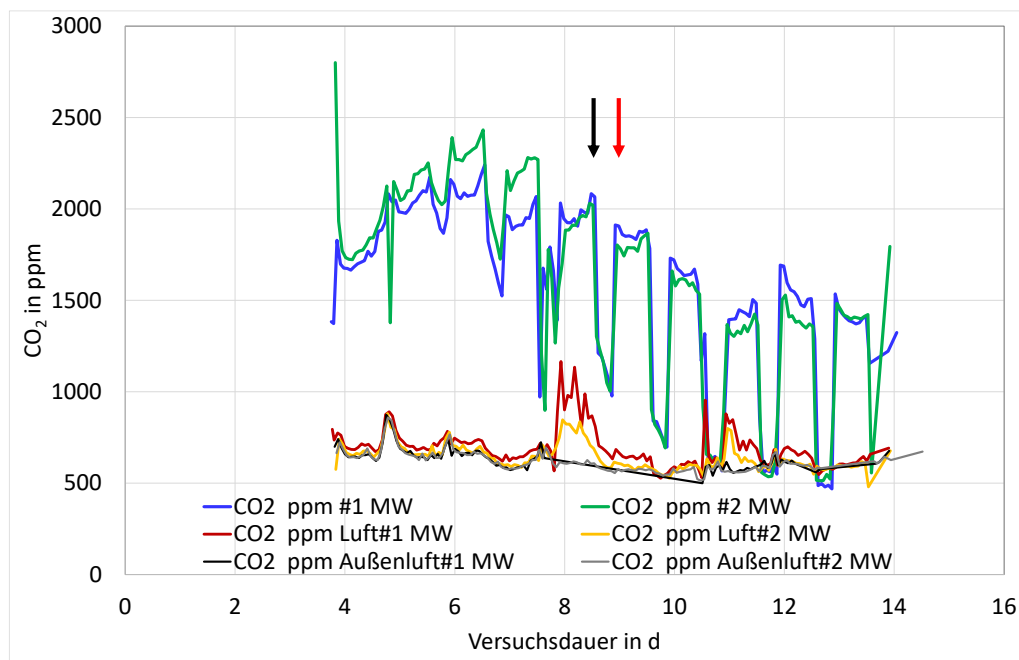


Abb. 17: Beispiel für CO₂ Messwerte bei den verschiedenen Schritten (V3). Exemplarisch: schwarzer Pfeil = Licht an; roter Pfeil = Licht aus.

Bei den CO₂ Emissionen fällt auch auf, dass die Konzentrationen in den Pflanzenkisten zunächst ansteigen und deutlich über denjenigen der Außenluft liegen. Nach ca. 5 d bis 6 d gehen die Konzentrationen zurück. Gleichzeitig gehen die Emissionen immer nach dem Einschalten der Lampen (schwarzer Pfeil in Abb. 17) deutlich zurück, während sie nach dem

Ausschalten des Lichts (roter Pfeil in Abb. 17) wieder ansteigen. Dieser Effekt verstärkte sich mit zunehmendem Alter der Pflanzen.

Die N_2O und CO_2 Konzentrationen der Außenluft dienen als Referenzwert. Um die N_2O und CO_2 Bilanzen im Pflanzenbehälter abzuschätzen, wurden die jeweiligen Referenzwerte (Mittelwerte aus einem Versuch) subtrahiert und als *relative CO_2 Konzentrationen* bezeichnet (s. Abb. 18). In Abb. 18 kann man auch deutlich die Auswirkung der Hell- und Dunkelphasen, sowie die Störung der Messung durch die Probenahme am 7. d erkennen.

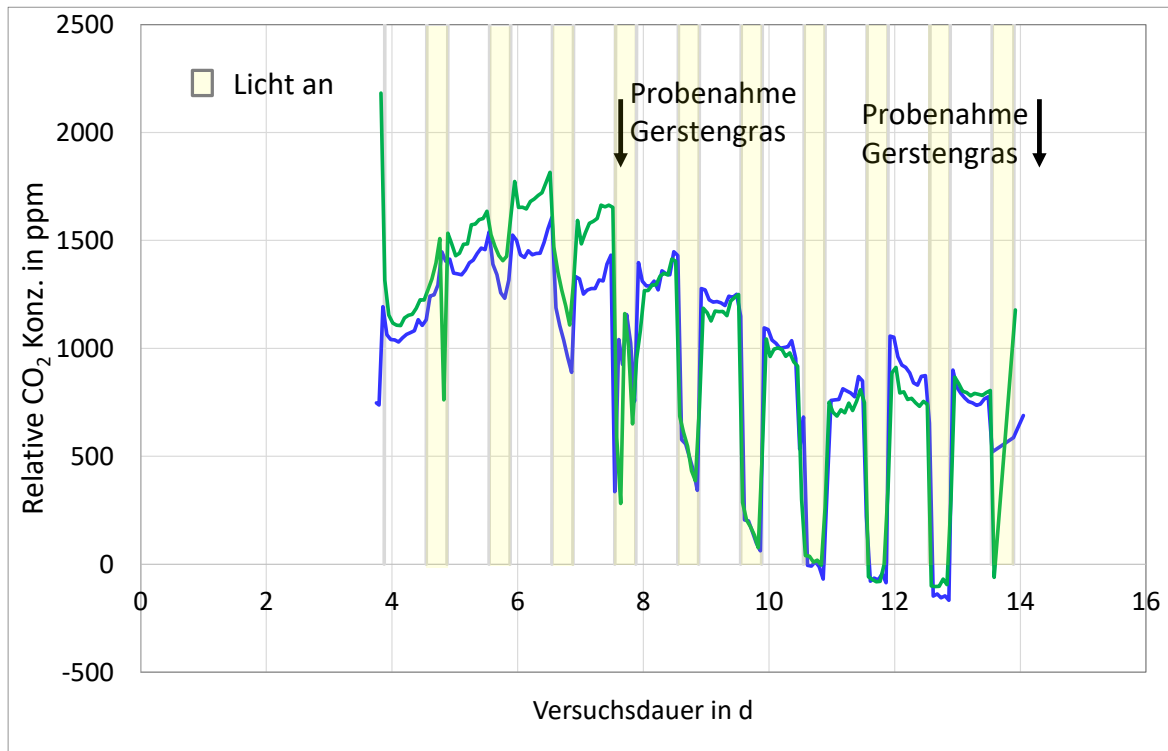


Abb. 18: Beispiel für Relative CO_2 Konzentrationen als Differenz zu Außenluft Konzentrationen bei den verschiedenen Schritten (V3). Exemplarisch: schwarzer Pfeil = Probenahme. Gelb = Belichtungsphasen.

3.6 Abfolge der Hauptversuche

3.6.1 Quellung

Je 100 g trockene Gerstenkörner (ca. 2083 Stück) wurden zu ca. 1 L Leitungswasser hinzugefügt und 12 h bis 17 h quellen gelassen. Die Masse der gequollenen Körner erhöhte sich dadurch auf ca. 150 g bis 160 g.

3.6.2 Vorbehandlung zur Ankeimung

Diese ca. 2083 Körner wurden dann gleichmäßig auf jeweils einer Pflanzschale (24 cm * 18 cm) verteilt, was einer Saatstärke von ca. 48217 Körnern je m² entspricht. Danach wurden die Körner mit Leitungswasser abgespült, da das Wasser, das zum Quellen der Samen verwendet wurde, immer gelbbraun eingetrübt war. Dieser Zeitpunkt wurde als Tag 0 für alle Diagramme und Tabellen definiert.

Die Pflanzschalen (mit den Körnern) wurden dann bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) abgedunkelt in einer weiteren Kiste mit Deckel aufbewahrt und einmal je d mit Leitungswasser besprüht um die Keimung zu ermöglichen.

Nur bei Versuch 4 (mit Blumenerde) wurde dieser Schritt ausgelassen. Die gequollenen Körner wurden auf je 200 g trockene Pflanzenerde gelegt und sofort in die Laboranlagen eingesetzt.

3.6.3 Einsetzen in die Laboranlagen

Nach ca. 2,5 d wurden die Keimlinge bei allen Versuchen (außer V4) in die Laboranlagen eingesetzt.

3.6.4 Kultivierung in den Laboranlagen

Die Hauptversuche in den Laboranlagen wurden durchgeführt, um die Einflüsse von verschiedenen Bedingungen auf Wachstum und Inhaltsstoffe der Pflanzen, sowie auf die Lachgas- und CO₂ Emissionen zu untersuchen. Dazu wurden die Sequenzen gestartet und kontinuierliche Online-Messungen der Parameter pH, O₂, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit in der wässrigen Phase, sowie N₂O und CO₂ in der Gasphase durchgeführt.

Bei den einzelnen Versuchen wurden bestimmte Bedingungen variiert (s. Tab. 8). Die Konzentrationen der Haupt-Nährstoffe in der Nährlösung bei den einzelnen Versuchen sind in Tab. 6 zu finden.

Tab. 8: Übersicht der Ziele und Besonderheiten bei den Versuchen V1-V7

Versuche	Ziel	Besonderheit
V1	Referenz für nachfolgende Versuche	Ohne Nährstoffe, nur Leitungswasser
V2	Einfluss Nährstoffkonzentration und Nachernte	Mittlere Nährstoff-Konz. mit Nachernte
V3	Einfluss Nährstoffkonzentration	Hohe Nährstoff-Konz.
V4	Einfluss Boden	Pflanzenerde, hohe Nährstoff-Konz., Bewässerung nur einmal je d
V5	Relative Luftfeuchtigkeit im Pflanzenbereich verringern	Ohne Abdeckung der Pflanzkisten, hohe Nährstoff-Konz.
V6	Einfluss zusätzlich Ammonium	Hohe Nährstoff-Konz., zusätzlich Ammonium
V7	Einfluss pH-Wert	Hohe Nährstoff-Konz., pH-Wert konstant durch HNO ₃ Dosierung

Zur Bestimmung der Inhaltsstoffe des Gerstengrases wurden meist etwa nach 7 d und 14 d durch Abschneiden mit einer Schere Proben genommen, sofort eingefroren und bei -20 °C bis zur Analyse gelagert.

3.6.5 Ankeimungsphase und Kultivierung der Gerste mit Blumenerde (Versuch 4)

Die Pflanzschalen waren für den Gebrauch mit Blumenerde nicht geeignet, da die Blumenerde durch die Edelstahlrahtgitter hindurch gerieselte wäre. Stattdessen wurden die Böden von Kunststoffgefäßen (ehemalige Eisschachteln), mit je 5 Löchern versehen, um einen Wasseraustausch zu gewährleisten (s. Abb. 19, links). Ein erster Test mit Fliegengitter war nicht erfolgreich, da die Erde zu fein war. Daher wurden die Pflanzschalen mit einem Stück von einem „Getreidesack“ aus Kunststoff ausgekleidet (s. Abb. 19, rechts) und die Blumenerde darauf verteilt (s. Abb. 20, links). Die Körner wurden hier direkt nach der Quellungsphase auf der Erde verteilt (s. Abb. 20, rechts), so dass die Keimung bereits, mit schwarzer Folie abgedeckt, in den Laboranlagen stattfinden konnte.

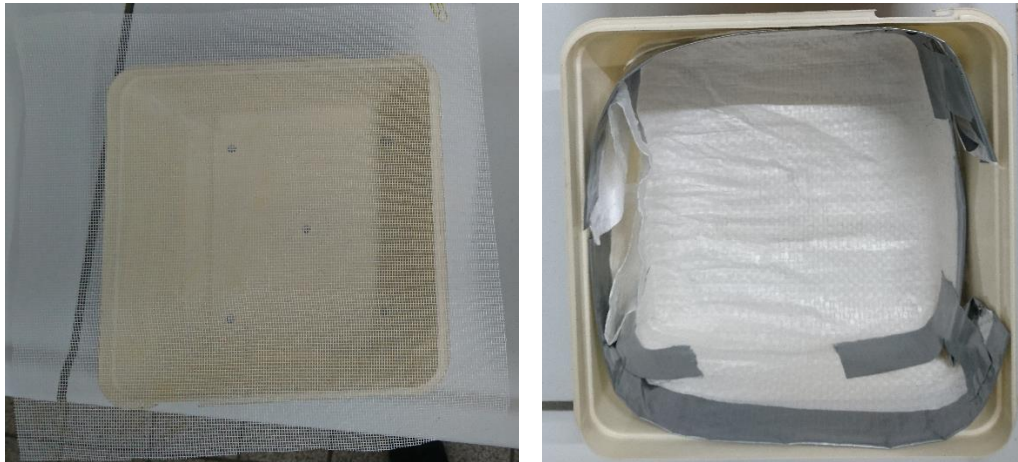


Abb. 19: V4 Pflanzschale für Versuch mit Blumenerde. Links: Test mit Fliegengitter Rechts: „Getreidesack“ aus Kunststoff (jeweils System 1 und System 2)



Abb. 20: Links: Pflanzschale mit Blumenerde. Rechts: Pflanzschale mit Blumenerde und Gerstenkörnern (jeweils System 1 und System 2)

Die automatische Schalt-Sequenz (s. Tab. 9) wurde hier bereits während der Keimung gestartet. Damit waren kontinuierliche Online-Messungen der Parameter pH, O₂, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit in der wässrigen Phase, sowie N₂O und CO₂ in der Gasphase bereits während dieser ersten Phase möglich. Allerdings wurde hier der Wasserkreislauf nur einmal je Tag manuell kurz eingeschaltet.

Tab. 9 Gesamt-Sequenz für V4. Die Schritte 1 bis 4 werden ständig wiederholt.

Sequenzschritt	Beschreibung	Dauer in min
1	Gasmessung System 1	30
2	Lüftung System 1	30
3	Gasmessung System 2	30
4	Lüftung System 2	30

Beleuchtung: wie bei den anderen Versuchen.

Nach 5 d waren die Keimlinge groß genug, dass die schwarze Folie entfernt und die Beleuchtung eingeschaltet werden konnte (wie bei den anderen Versuchen zwischen 10:00 und 18:00). Zu diesem Zeitpunkt wurden dann auch bei der Anlage 1 die Nährstoffe zugegeben.

3.7 Labor-Analytik

3.7.1 Küvettentests

Die Online-Werte wurden durch regelmäßige Analysen im Labor ergänzt. Die verwendeten Küvetten-Testsätze (s. Tab. 10) wurden von Hach-Lange (Düsseldorf) bezogen.

Tab. 10 Küvetten-Testsätze für Analysen (Hersteller: HACH)

Parameter	Küvettentests / Schnelltests	Messbereich
Ammonium	LCK 303	(2...47) mg/L NH ₄ ⁺ -N
CSB	LCK 114	(150...1000) mg/L O ₂
	LCK 314	(15...150) mg/L O ₂
	LCK 614	(50...300) mg/L O ₂
Eisen Crack-Set (Aufschluss)	LCW 021 LCW 902	(0,005...0,250) mg /L (Fe ²⁺ + Fe ³⁺)
Kalium	LCK 228	(5...50) mg/L K ⁺
Magnesium	LCK 326	(0,5...50) mg/L Mg ²⁺
Nitrat	LCK339	(0,23...13,5) mg/L NO ₃ ⁻ -N
	LCK340	(5...35) mg/L NO ₃ ⁻ -N
Nitrit	LCK341	(0,015...0,6) mg/L NO ₂ ⁻ -N
	LCK342	(0,6...6,0) mg/L NO ₂ ⁻ -N
Ortho-Phosphat	LCK349	(0,05...1,5) mg/L PO ₄ ³⁻ -P
	LCK348	(0,5...5,0) mg/L PO ₄ ³⁻ -P
Eisen mit Aufschluss	LCW 021 mit LCW 902 (Crackset)	0.005–0.250 mg/L Fe (Halbmikro-Küvetten 50 mm)
Gesamt N (LATON) *	LCK 238	(5...40) mg/L Gesamt-Stickstoff, TN _b
Gesamt P *	LCK348	(0,5...5,0) mg/L PO ₄ ³⁻ -P
Ca ²⁺ Mg ²⁺ Gesamthärte *	LCK 327	(5...100) mg/L Ca
		(3...50) mg/L Mg
		(1...20) °d
Säurekapazität K _{S4.3} *	LCK 362	(0.5 ... 8.0) mmol/L K _{S 4.3}

*: Diese Tests wurden nicht regelmäßig durchgeführt

Die Küvettentests wurden entsprechend der Arbeitsvorschriften des Herstellers durchgeführt und fotometrisch ausgewertet (Photometer: HACH DR 3900).

Zur Einschätzung der Nitrat-Konzentrationsbereiche wurden Nitrat-Teststäbchen (Supelco/Merck MQuant, Messbereich (2,3...113) mg/l NO₃⁻-N) verwendet. Gleichzeitig konnte man damit qualitativ ggf. eine Nitrit-Bildung detektieren.

3.7.2 Nährstoffe und andere Inhaltsstoffe in den Wasserproben

Je nach Menge der Nährstoffzugaben mussten die Proben für die Analysen mit den Küvettentests noch verdünnt werden. Für die Bestimmungen von Kalium, Phosphat, Eisen und Nitrat wurden die Proben 20-fach verdünnt. CSB, Nitrit, Ammonium und Magnesium wurden aus den unverdünnten Proben bestimmt.

3.7.3 Nährstoffe und andere Inhaltsstoffe in Pflanzenproben (Gerstengras)

In Anlehnung an die DIN EN 12014-2 wurden die Gerstengrasproben zur Bestimmung der Inhaltsstoffe aufgearbeitet. Dazu wurden ca. 2,5 g gefrorene Gerstengrashalme (Einwaage) mit einer Schere in ca. 1 cm lange Stücke geschnitten und in einem Erlenmeyerkolben (200 mL) genau eingewogen. Anschließend wurde der Erlenmeyerkolben mit 100 mL kochendem, deionisiertem Wasser versetzt und, unter Rühren mit einem Glasstab, 15 min in einem kochenden Wasserbad inkubiert.

Der so erhaltene Extrakt wurde anschließend durch einen zuvor mit kochendem deionisiertem Wasser gespültem Faltenfilter in einen 200 mL Messkolben filtriert. Der Faltenfilter wurde mit kochendem deionisiertem Wasser nachgespült und der Messkolben nach dem Abkühlen des Extrakts auf 200 mL aufgefüllt („Messlösung“).

3.7.4 Trockenmassebestimmung bei Gerstengras

Ca. 5 g Gerstengras wurden in eine Porzellanschale eingewogen (Analysewaage Mettler AT250) und 24 h im Trockenschrank bei 105°C getrocknet. Nach dem Abkühlen im Exsikkator wurden die Gefäße erneut gewogen, um so den Masseverlust zu ermitteln s. Gl. (2). Bei der Einwaage des gefrorenen Gerstengrases war darauf zu achten, dass der Vorgang nicht zu lange dauert, damit die Probe nicht auftaut und Wasser verloren geht.

3.7.5 Berechnungen der Inhaltsstoffgehalte in Gerstengras

Zur Berechnung der Inhaltsstoffgehalte (z.B. NO_3^- -N, K^+ , CSB...) bezogen auf Feuchtmasse s. Gl. (1):

$$\text{Gehalt X feucht in mg/kg} = \frac{\beta(X) \cdot V(\text{Mess}) \cdot 1000}{m(\text{Gras})} \quad (1)$$

mit $\beta(X)$ = Konzentration Inhaltsstoff X in der Messlösung in mg/L
 $V(\text{Mess})$ = Volumen der Messlösung in L
 $m(\text{Gras})$ = Einwaage der Grasprobe (Frischmasse) in g

Der Trockenmasse Anteil ergibt sich wie folgt (s. Gl. (2)):

$$\text{Trockenmasse Anteil in \%} = \frac{m(\text{Trocken}) - m(\text{Leer}) \cdot 100}{m(\text{Frisch}) - m(\text{Leer})} \quad (2)$$

mit $m(\text{Trocken})$ = Masse der Porzellanschale mit getrocknetem Gerstengras in g
 $m(\text{leer})$ = Masse der leeren Porzellanschale in g
 $m(\text{Frisch})$ = Masse der Porzellanschale mit frischem Gerstengras in g

Inhaltsstoffgehalte bezogen auf Trockenmasse (TM), s. Gl. (3):

$$\text{Gehalt X bez. auf TM in mg/kg} = \frac{\text{Gehalt X feucht} \cdot 100}{\text{Trockenmasse Anteil}} \quad (3)$$

Inhaltsstoffgehalte bezogen auf Trockenmasse (TM), s. Gl. (4):

$$\text{Gehalt X bez. auf TM in \%} = 10^{-4} \cdot \text{Gehalt X bez. auf TM in mg/kg} \quad (4)$$

Speziell bei Nitrat werden die Gehalte als NO_3^- angegeben. Mit dem Umrechnungsfaktor $\text{NO}_3^- / \text{NO}_3^-$ -N = 4,427 ergibt sich der Nitratgehalt bezogen auf die Trockenmasse n. Gl. (5):

$$\text{NO}_3^- \text{ bez. auf TM in \%} = 4,427 \cdot \text{NO}_3^-$$
-N bez. auf TM in \% \quad (5)

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Keim Vorversuche

4.1.1 Keimversuch 1

Die gequollenen Gerstenkörner, die im Kühlschrank inkubiert wurden, keimten erwartungsgemäß später (s. Abb. 21). Da die gekeimten Körner nicht gezählt wurden, konnte keine Keimquote ermittelt werden.



Abb. 21: Keimversuch 1 (Foto: Bosch 2021)

4.1.2 Keimversuch 2

Bei diesem Versuch wurde der Prozess der Quellung der Körner einmal im Kühlschrank (System 1, 5 °C) und im Vergleich dazu bei Zimmertemperatur (System 2, ca. 20 °C) durchgeführt (s. Kap. 3.2.2). Danach wurden beide Ansätze 7 d bei Zimmertemperatur weiter inkubiert. Bei den Körnern mit einer Kälte-Vorbehandlung (System 1) waren die Keimraten am Ende der Versuchsdauer mit 85 % geringer als bei System 2 mit 99 % (s. Tab. 11). Außerdem war das Wachstum der Keimlinge ungleichmäßiger. Im Mittel hatten die Pflanzen bei beiden Vorbehandlungen am Ende eine Länge zwischen 6 cm und 10 cm. Jedoch keimte die Gerste ohne Kältevorbehandlung gleichmäßiger (s. Abb. 22). So wuchsen nur 5 % der Pflanzen nach Quellung bei 20 °C auf unter 6 cm (1 cm - 5 cm) heran, während bei vorheriger Quellung im Kühlschrank 14 % der Pflanzen kleiner als 6 cm (1 cm - 5 cm) blieben.

Für die nachfolgenden Haupt-Versuche wurde daher von einer vorherigen Kältebehandlung der Körner abgesehen. Ein Kältereiz wäre nur wichtig für eine generative Vermehrung, zu der es aber bei diesem Versuch nicht kommt, da die Pflanzen schon vorher geerntet werden.

Tab. 11: Keimversuch 2 Beobachtungen

Keimversuch K2		2 mal 100 Samen	4g. Ca je 100 Körnern Gerste	
Datum	Uhrzeit	Maßnahme	System 1 / Zimmer	System 2 / Kühlschrank
20.04.2021	22	In Wasser quellen lassen	20°C in Zimmer/ abgedunkelt	6 °C im Kühlschrank
21.04.2021	21	In Saatschale	20 °C in Zimmer/ abgedunkelt	20 °C in Zimmer/ abgedunkelt
22.04.2021	9	Beobachtung	teilweise weiße Keimpunkte/ abgedunkelt	teilweise weiße Keimpunkte/ abgedunkelt
23.04.2021	08:00	Beobachtung	Weißer Punkte / bis 1 cm Wurzel / abgedunkelt	Weißer Punkte / bis 1 cm Wurzel / abgedunkelt
24.04.2021	09:06	Beobachtung	Weißer Punkte + Wurzeln in schn. 2-3 cm / abgedunkelt	Weißer Punkte + Wurzeln in schn. 2-3 cm / abgedunkelt
25.04.2021	10:41	Beobachtung	Weißer Punkte + Wurzeln in schn. 2-3 cm + Spross 1-3 cm	Weißer Punkte + Wurzeln in schn. 2-3 cm + Spross 1-3 cm
26.04.2021	09:00	Beobachtung	Spross 1-5 cm	Spross 1-5 cm
27.04.2021	09:00	Beobachtung	Spross 1-7 cm	Spross 1-7 cm
28.04.2021	10:39	Auszählung	99 % gekeimt / Pflanzen gleichmäßiger/ 6-10 cm im Ø / 5 Pflanzen unter 6cm (1-5cm)	85 % gekeimt / 6-10cm im Ø / 14 Pflanzen unter 6cm (1-5 cm)



Abb. 22: Keimversuch 2 Links: Quellung im Kühlschrank (System 2). Rechts: Quellung bei 20 °C (System 1) Fotos: Bosch 2021

4.2 Hauptversuche in den Versuchsanlagen

4.2.1 Versuch 1 (V1) ohne Dünger

Hierbei wurde für die Nährlösung nur Leitungswasser (Bodensee-Wasserversorgung) eingesetzt und weder Dünger noch zusätzlich KNO_3 zugegeben. Dabei sollte beobachtet werden, wie gut sich die Gerste ohne zusätzliche Nährstoffe entwickeln kann. Dieser Versuch war als erster Test der Mess- und Regeleinstellungen und auch als Referenz für die weiteren Versuche gedacht.

4.2.1.1 Ankeimungsphase

Zudem sollte beobachtet werden, ob durch die Lagerung einer Saatschale im Kühlschrank für einen Tag die Keimung durch eine schnellere Überwindung der Dormanz optimiert werden kann. Wie bereits bei Keimversuch 1 (Kap. 304.1.1) beschrieben, konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Tatsächlich keimten die Körner nach der Lagerung bei 20 °C (System 1) schneller aus als nach Lagerung im Kühlschrank (System 2; s. Abb. 23).



**Abb. 23: V1 Ankeimung in Saatschalen. Links für System 2 und Rechts für System 1
Foto: Bosch 2021**

4.2.1.2 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

Nach Einsetzen der Saatschalen in die Laboranlagen nach 5 d (nach der Aussaat in die Gitterschalen) wuchsen die Gerstenpflanzen und erreichten eine Größe von bis zu 16 cm in der Versuchszeit. Es konnten äußerlich keine Mangelerscheinungen festgestellt werden.

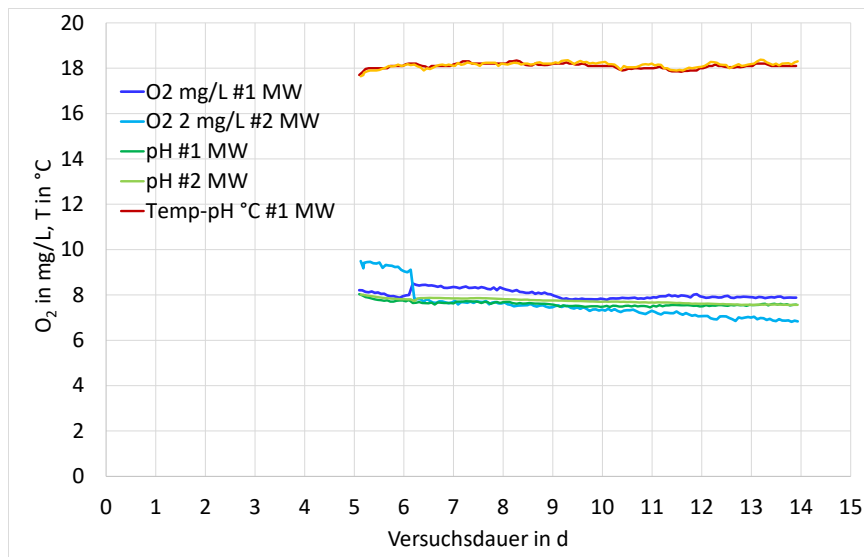


Abb. 24: V1 pH, Sauerstoff und Temperatur

Bei Versuch V1 war die Temperatur der Nährstofflösung in beiden Systemen konstant bei 18 °C. Die pH-Werte sanken während des Verlaufes leicht von anfänglich pH 8 auf pH 7,8 in beiden Systemen (s. Abb. 24). Die hohen Sauerstoffkonzentrationen zeigen, dass in der Wasserphase aerobe Bedingungen herrschten, was vermutlich durch den Sauerstoffeintrag bei den häufigen Wasser-Umwälzungen bedingt war.

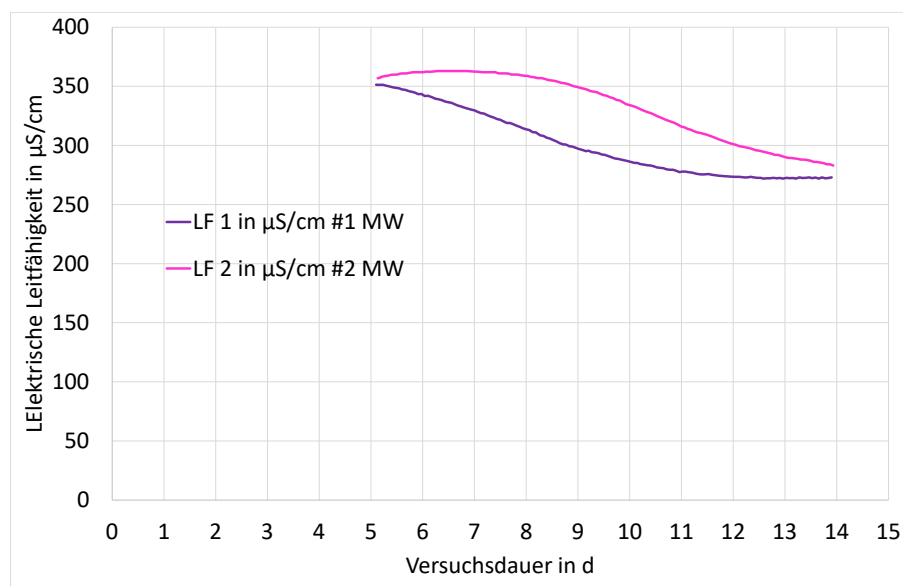


Abb. 25: V1 - Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase

Die Leitfähigkeit als Maß für den Gehalt an Ionen nahm in beiden Systemen im Verlauf des Versuchs ab (s. Abb. 25). Bei Versuch 2 war die Geschwindigkeit dieses Prozesses geringer, wahrscheinlich, weil die Pflanzen aufgrund der Kältebehandlung beim Keimen zurückgeblieben waren und die Nähr-Salze dadurch nur langsamer aufnehmen konnten.

4.2.1.3 N₂O und CO₂ in der Gasphase

Bei Versuch 1 lagen die relativen N₂O Konzentrationen in der Größenordnung des Grundrauschens (s. Abb. 26) - d.h. es konnten erwartungsgemäß keine N₂O Emissionen festgestellt werden, da nur Leitungswasser (mit sehr niedriger Gesamtstickstoffkonzentration) als Wasserphase verwendet wurde.

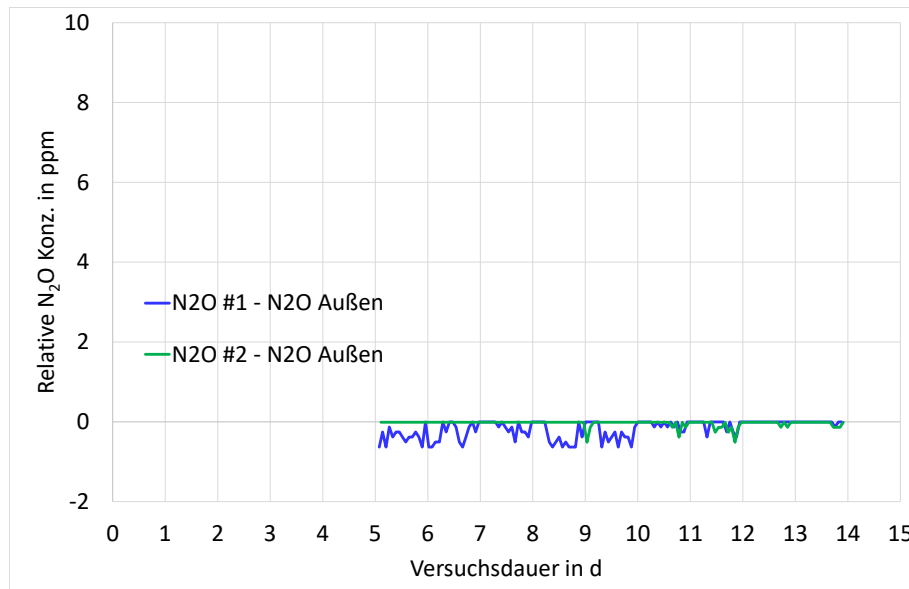


Abb. 26: V1 Relative N₂O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

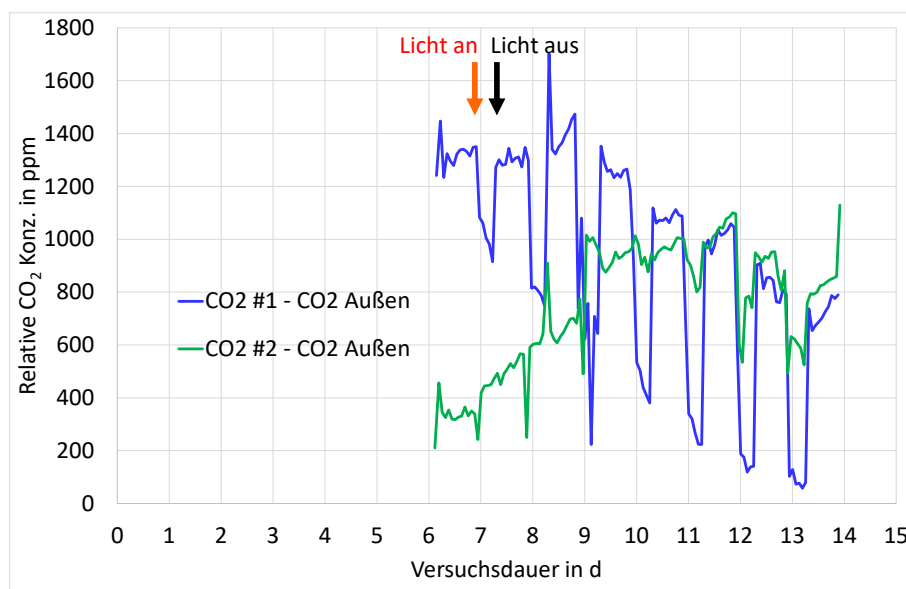


Abb. 27: V1 Relative CO₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

Die CO₂ Werte wurden erst ab dem 6. d aufgezeichnet, da der entsprechende Sensor erst zu diesem Zeitpunkt einsatzbereit war (s. Abb. 27). Durch die unterschiedlichen Wachstumsstadien der Gerste waren auch Unterschiede bei den Kohlenstoffdioxid Konzentrationen zu beobachten. Bei System 1 war bereits nach Einsetzen ins System ein Abfall der Emissionen bei

Beleuchtung festzustellen. Bei System 2 waren die Pflanzen beim Einsetzen in die Anlage noch deutlich kleiner. Hier stiegen die Emissionen noch bis zum 10. d.

Bei den CO₂ Konzentrationen ließ sich ein typisches Muster erkennen, das bei allen weiteren Versuchen wiedergefunden wurde (s. Kap. 0). Beim Einschalten des Lichts (roter Pfeil in Abb. 27) zeigte sich kurz danach eine deutliche Verminderung der CO₂ Konzentrationen, die wahrscheinlich durch die Photosynthese der grünen Sprosssteile der Gerstenpflanzen bedingt war. Beim Ausschalten des Lichts nach 8 h stiegen die CO₂ Konzentrationen sofort wieder an (schwarzer Pfeil in Abb. 27). Dieses Muster konnte man jeden Tag in gleicher Weise beobachten. Je größer die Pflanzen wurden, desto niedriger wurden die CO₂ Konzentrationen während der Belichtungsphase. Aber auch während der Dunkelphase wurden die CO₂ Konzentrationen mit zunehmender Pflanzengröße niedriger. Ob das daran liegt, dass die Metabolisierung der Gerstenkorn-Inhaltsstoffe zu Beginn des Keimens größere Mengen von CO₂ freisetzt, oder das Alter der Pflanzen hier eine wesentliche Rolle spielt, konnte aufgrund der kurzen Versuchsdauer nicht geklärt werden.

4.2.1.4 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Aufgrund der niedrigen Konzentrationen der Nährstoffe im Wasser wurden auch nur geringe Mengen dieser Nährstoffe in den Pflanzen gemessen (s. Abb. 28).

Dabei sind hier und bei allen nachfolgenden Diagrammen die Konzentrationen im Gras bezogen auf die Trockenmasse angegeben. Die Nitrat-Konzentrationen im Wasser sind als NO₃⁻-N, während die Anteile in der Pflanze aus Gründen der Vergleichbarkeit als NO₃⁻ aufgetragen sind (s. Gl. (5)). Phosphor und Kalium im Gras werden als P bzw. K Equivalent in % der Trockenmasse angegeben (s. Gl. (4)), CSB wird ebenfalls nach Gl. (4) als % der Trockenmasse berechnet.

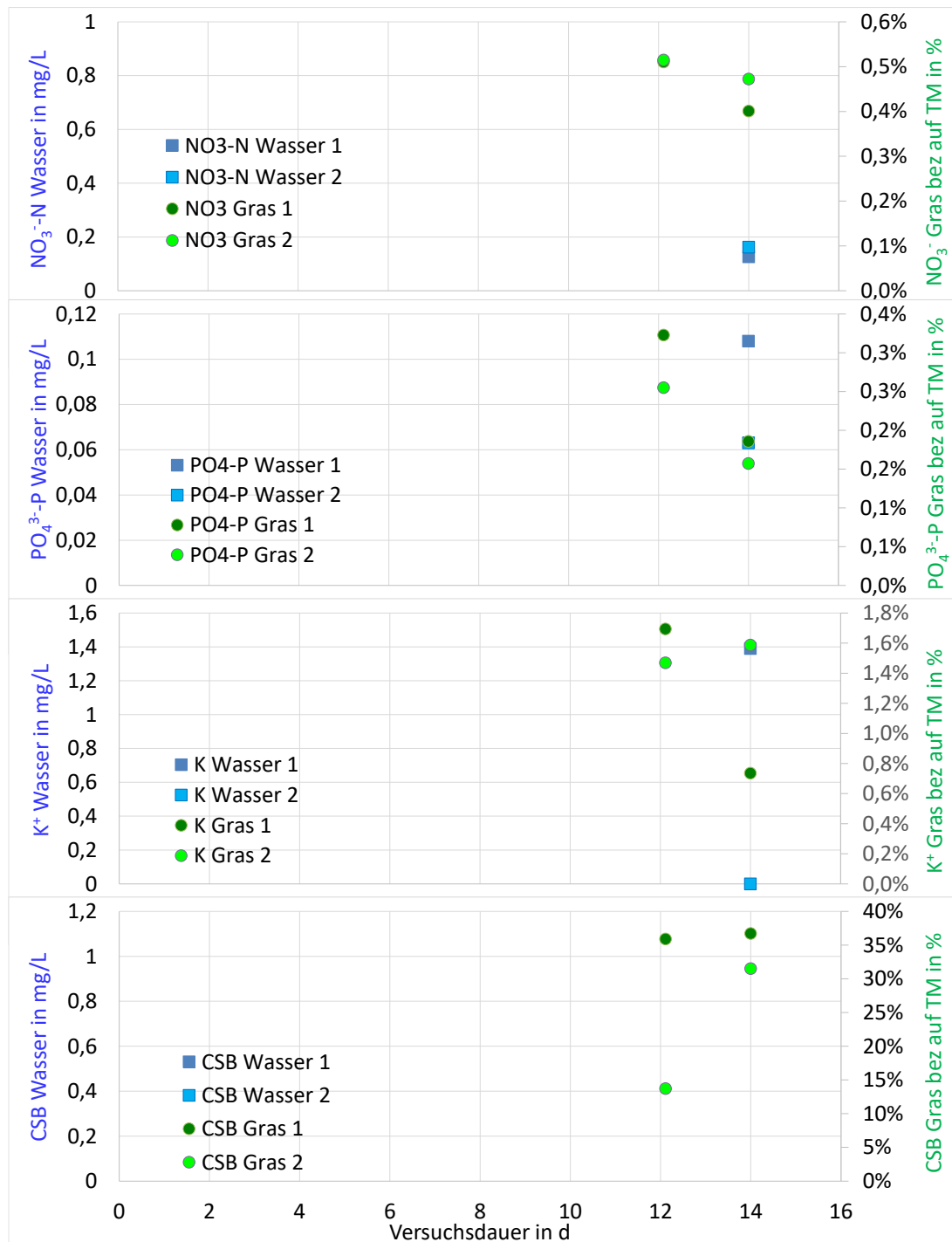


Abb. 28: V1 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

4.2.2 Versuch 2 (V2) Mittlere Düngung mit Nachernte

4.2.2.1 Ankeimungsphase

Da die Lagerung der Saatschale im Kühlschrank bei den Vorversuchen und Versuch 1 keinen positiven Effekt hatte, wurde hier, sowie bei den folgenden Versuchen, die Quellung

(während 14 h) und die anschließende Keimungsphase (3,4 d) vor Licht geschützt bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) durchgeführt.

4.2.2.2 Start des Versuchs und Betrieb

Nach Einsetzen der Saatschalen in die Laboranlagen, 3,4 d nach Aussaat in die Gitterschalen, und Einschalten der Beleuchtung, wurden bei beiden Systemen Dünger und KNO_3 zugegeben, so dass Konzentrationen von ca. 250 mg/L NO_3^- -N, 52 mg/L PO_4^{3-} -P und 780 mg/L Kalium in der Nährlösung entstanden. Weiteren wichtige Nährstoffe und Spurenelemente waren im Dünger vorhanden (s. Tab. 6).

Die Gerstenpflanzen wuchsen erwartungsgemäß schneller als in Versuch 1 und erreichten bereits nach 11 d eine Höhe zwischen 21 cm und 26 cm. Zu diesem Zeitpunkt (nach 11,2 d) wurden erste Proben des Gerstengrases nach 16 h Dunkelphase genommen und weitere Proben nach 8 h Beleuchtung (nach 11,5 d) um den Einfluss des Lichts auf die Nitratanreicherung in der Pflanze zu untersuchen.

Nach 13 d wurden alle Halme abgeschnitten, um am 17. d die Nachernte zu beproben.

4.2.2.3 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

Nach der Aufwärmzeit von ca. 0,5 d, bei der sich das kalte Leitungswasser an die Raumtemperatur anpasste, blieb die Temperatur der Nährlösung in beiden Systemen konstant bei $(18,5 \pm 0,2)$ °C (s. Abb. 29). Die pH-Werte stiegen während des Verlaufes von anfänglich pH 6,9 bzw. 6,7 auf pH 8,3 bzw. 8,2 in System 1 und 2 (s. Abb. 29).

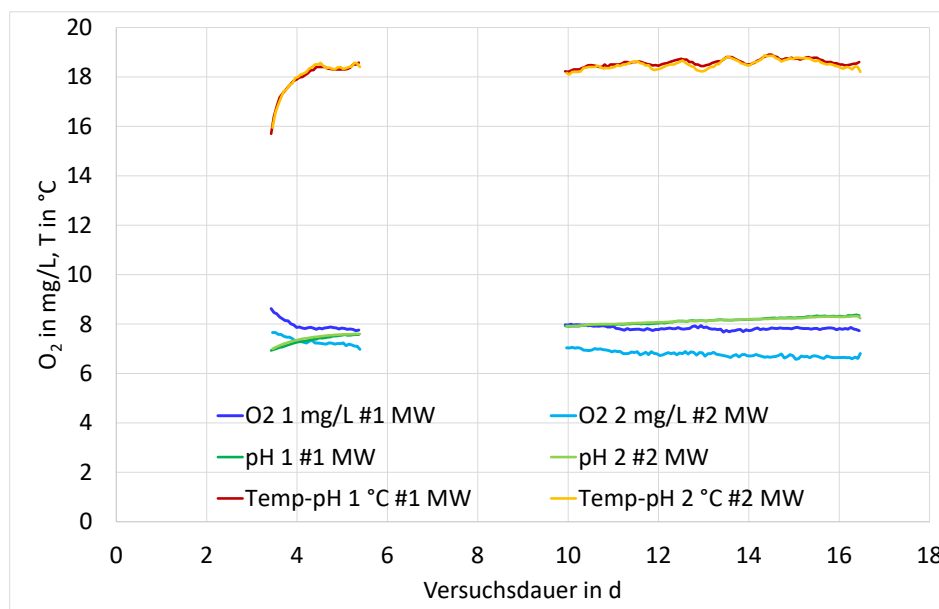


Abb. 29: V2 pH, Sauerstoff und Temperatur

Auch die Sauerstoffkonzentrationen zeigen, dass auch hier aerobe Bedingungen in der Wasserphase herrschten. Wie auch bei allen anderen Versuchen zeigte die Sauerstoffelektrode in System 2 eine um ca. 5 °C zu hohe Temperatur an, was zu einer geräteinternen Überkompensation führte und somit eine zu niedrige Sauerstoffkonzentration gemessen wurde. Da

dieser Parameter jedoch nur anzeigen sollte, ob zu irgendeinem Zeitpunkt anaerobe Bedingungen herrschen könnten, wurde auf einen (kostenintensiven) Ersatz der Elektrode verzichtet.

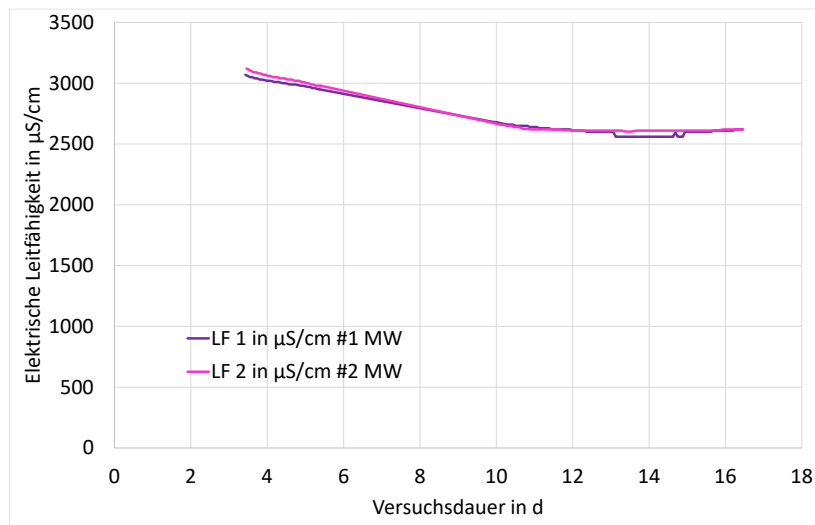


Abb. 30: V2- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase

Die Leitfähigkeit als Maß für den Gehalt an Ionen war hier zu Beginn aufgrund der höheren Salzkonzentration mit 3100 µS/cm deutlich höher als in V1 (um 300 µS/cm). Sie sank in beiden Systemen im Verlauf des Versuchs auf 2600 µS/cm ab (s. Abb. 30).

4.2.2.4 N₂O und CO₂ in der Gasphase

Bei Versuch V2 ist die Aufzeichnung der Versuchsdaten zwischen 5. d und 10. d ausgefallen, daher sind hier Lücken in den Online-Aufzeichnungen.

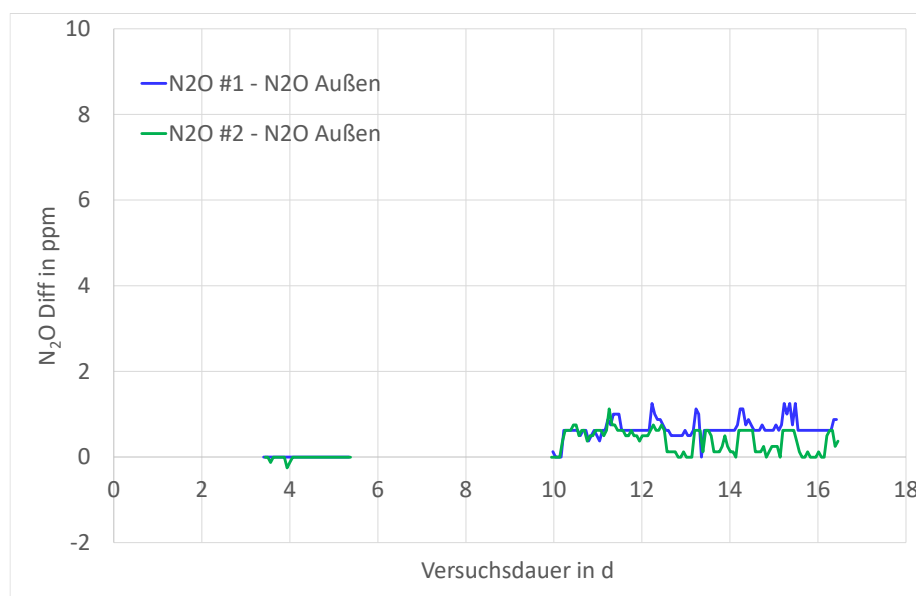


Abb. 31: V2 Relative N₂O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

Bei Versuch V2 lagen die relativen N₂O Konzentrationen etwas höher als bei V1, jedoch fast immer unter 1 ppm (s. Abb. 31).

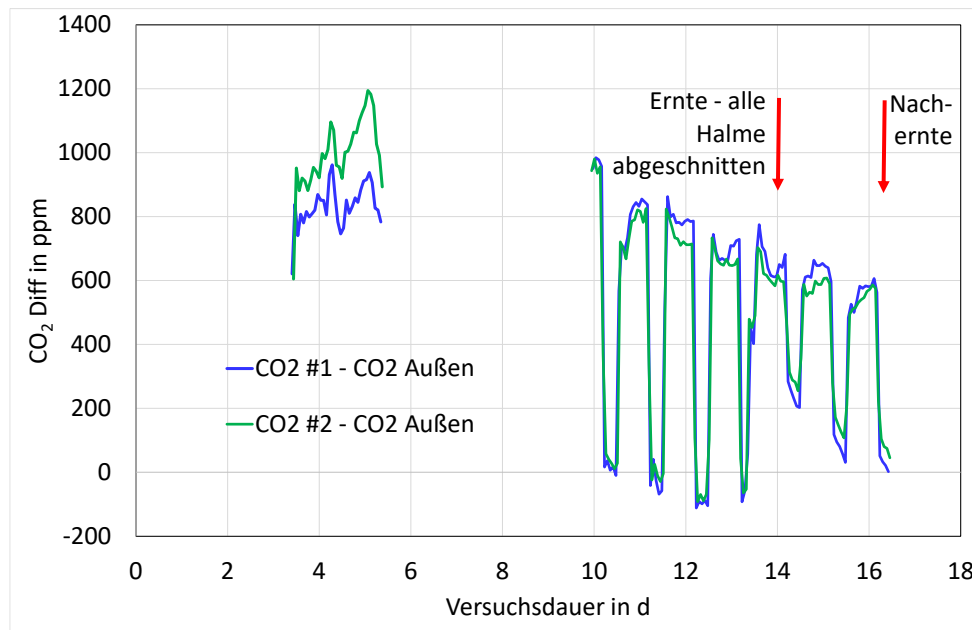


Abb. 32: V2 Relative CO₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

Die CO₂ Emissionen sind bei beiden Systemen sehr ähnlich, da sich die Gerstenpflanzen - anders als bei Versuch 1 - im gleichen Wachstumsstadium befanden (s. Abb. 32). Auch hier stiegen die Emissionen zu Beginn und sanken dann mit zunehmendem Alter und Länge der Pflanze in der Dunkelphase (obere Werte) und der Hellphase (untere Werte) wieder ab (s. Abb. 18).

Interessant war hier auch die Auswirkung der Ernte nach 14 d. Hier wurden alle Halme abgeschnitten (roter Pfeil links in Abb. 32). Während sich die relativen CO₂ Konzentrationen bei Dunkelheit weiter langsam verminderten, stiegen die CO₂ Konzentrationen in der Belichtungsphase nach dieser Aktion deutlich an, und sanken danach allmählich wieder ab, während die Halme wieder nachwuchsen.

4.2.2.5 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Da die Pflanzen höhere Konzentrationen von Nährstoffen im Wasser zur Verfügung hatten als bei Versuch 1, konnte man erwarten, dass auch höhere Konzentrationen dieser Nährstoffe in den Pflanzen akkumuliert werden. Dies war dann auch tatsächlich der Fall (s. Abb. 33).

Bei diesem Versuch wurde auch untersucht, ob sich ein Zusammenhang zwischen dem Erntezeitpunkt und den Nährstoff-Konzentrationen in der Pflanze ergibt. Dazu wurde am 11. d morgens kurz vor dem Einschalten des Lichts und nachmittags nach der Beleuchtungsphase von 8 h je eine Probe des Gerstengrases genommen. Die roten Pfeile in Abb. 33 zeigen die entsprechenden Werte.

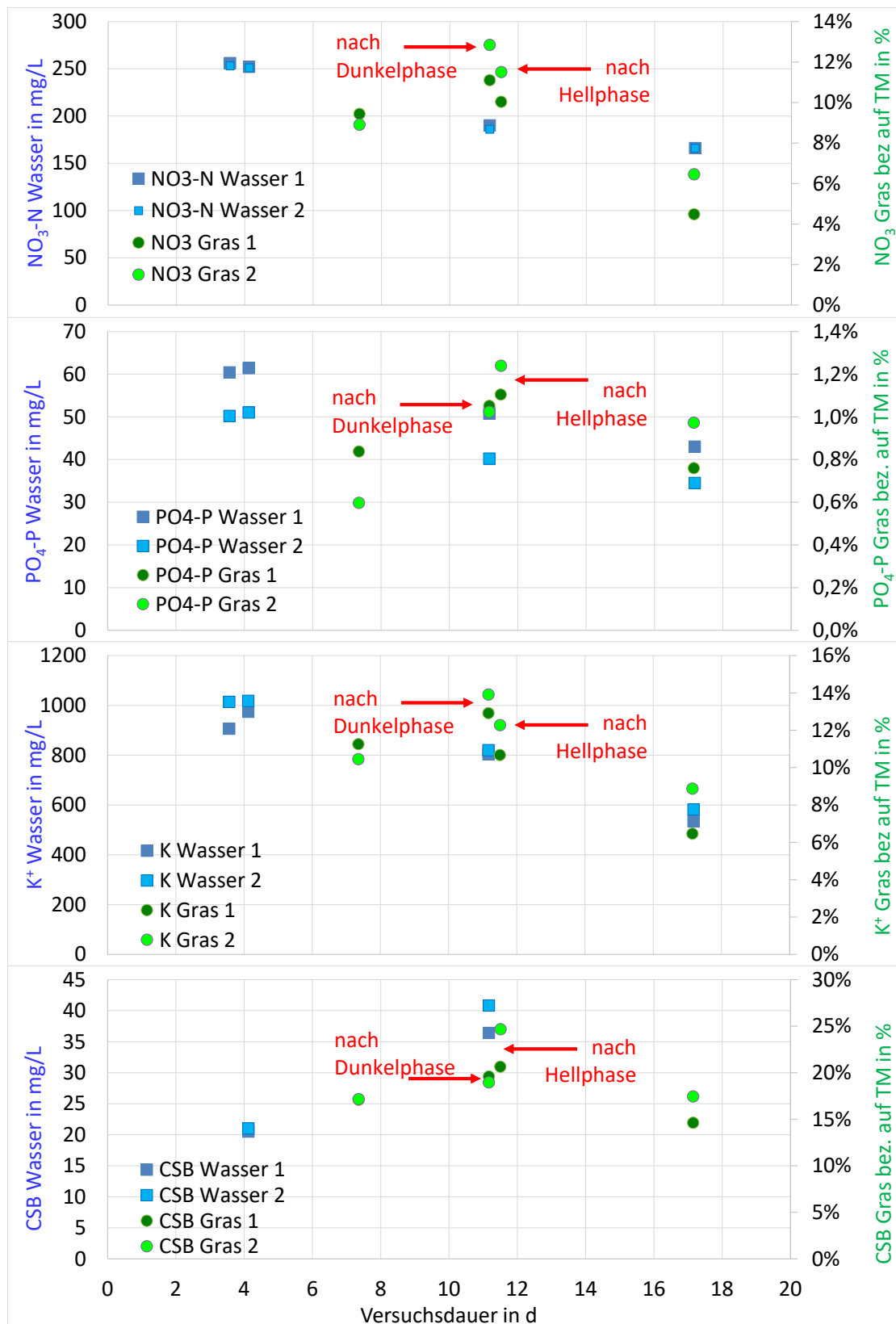


Abb. 33: V2 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

Es zeigte sich, dass die Nitrat- und Kaliumkonzentrationen nach der Dunkelphase höher waren als nach der Hell-Phase, während die Phosphat- und CSB-Konzentrationen niedriger waren. Allerdings waren diese Effekte nicht stark ausgeprägt. Erklären lässt sich dies damit,

dass KNO_3 während der Dunkelphase von den Pflanzen nicht zu Proteinen umgewandelt werden kann und daher vermehrt gespeichert wird. Bei der Photosynthese in der Hellphase werden mehr lösliche Kohlenstoffverbindungen gebildet, die für höhere CSB-Konzentrationen sorgen. Warum die $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ Konzentrationen stiegen, bleibt unklar.

4.2.2.6 V2 Zusätzliche Analysen der Nährstofflösung

Es wurden zusätzliche Untersuchungen am Tag der Zwischenernte (11. d) auf Gesamt-Stickstoff (LATON), Calcium, Gesamthärte und Säurekapazität durchgeführt (s. Tab. 12). Zum Vergleich sind die Konzentrationen des zur Herstellung verwendeten Leitungswasser aufgeführt.

Tab. 12: V2 Zusätzliche Analysen

	V2 System 1	V2 System 2	Leitungswasser *
Gesamt-Stickstoff (in Klammern: $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NO}_2^- \text{-N}$) in mg/L	226 (194)	208 (190)	-
Gesamt Phosphor (in Klammern: Orthophosphat $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) in mg/L	50,4 (50,8)	40,4 (40,2)	< 0,003
Ca^{2+} in mg/L (in Klammern: in mmol/L)	56,3 (1,4)	53,7 (1,3)	50
Mg^{2+} in mg/L (in Klammern: in mmol/L)	38,8 (1,6)	34,5 (1,4)	8,5
Gesamthärte in mmol/L CaCO_3	3,0	2,8	1,61
Säurekapazität $K_S 4.3$	5,41	5,08	2,56

* Bodenseewasserversorgung 2021

Die Gesamt-Stickstoff Konzentrationen waren dabei bei beiden Systemen höher als die Summe der Konzentrationen von ($\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NO}_2^- \text{-N}$). Da bei diesem Versuch kein Ammonium eingesetzt wurde, ist die Differenz vermutlich auf gelöste organische Stickstoff-Verbindungen (z.B. Aminosäuren, Proteine) aus den Pflanzen oder den Gerstensamen zurückzuführen.

Der Gesamtphosphor-Gehalt unterschied sich dagegen nicht von der Konzentration an Orthophosphat. Somit waren keine relevanten Mengen an organischen Phosphor-haltigen Verbindungen in der Nährstofflösung vorhanden.

4.2.2.7 Nachernte V2

Am 13. d wurden - wie bei den anderen Versuchen auch - alle Halme abgeschnitten. Am 17. d waren die Pflanzen innerhalb der 4 d um 5 cm bis 7 cm nachgewachsen (s. Abb. 34). Die Trockenmasse lag bei den jungen nachgeschobenen Trieben unter denen der anderen Versuche. Die Nitratkonzentrationen, sowie auch die Konzentrationen aller weiteren untersuchten Inhaltsstoffe der Nachernte-Proben lagen deutlich unter denen der Proben vom 11. d (s. Abb. 33).



**Abb. 34: Links: V2 System 2 nach der Ernte (13. d), Rechts: V2 System 2 vor der Nach-
ernte (17. d) Fotos Bosch 2021**

4.2.3 Versuch 3 (V3) hohe Düngung

4.2.3.1 Ankeimungsphase

Die Quellung (während 15 h) und die anschließende Keimungsphase (3,8 d) wurde, wie bei allen Versuchen vor Licht geschützt bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) durchgeführt.

4.2.3.2 Start des Versuchs und Betrieb

Nach Einsetzen der Saatschalen in die Laboranlagen nach 3,8 d (nach der Aussaat in die Gitterschalen) und Einschalten der Beleuchtung, wurden bei beiden Systemen Dünger und KNO_3 zugegeben, so dass sich Konzentrationen von ca. 425 mg/L NO_3^- -N, 52 mg/L PO_4^{3-} -P und 1272 mg/L Kalium in der Nährlösung ergaben. Weitere wichtige Nährstoffe und Spurenelemente waren im Dünger vorhanden (s. Tab. 6).

Die Gerstenpflanzen wuchsen in etwa so schnell wie in Versuch 2 und erreichten bereits nach 10 d eine Höhe zwischen 20 cm und 24 cm. Nach ca. 7 d (Zwischenernte) und 14 d (Schlussernte) wurden jeweils Gerstengrasproben genommen und analysiert.

4.2.3.3 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

Nach der Aufwärmzeit von ca. 1 d, bei der sich das kalte Leitungswasser an die Raumtemperatur anpasste, blieb die Temperatur der Nährlösung in beiden Systemen konstant bei $(19,0 \pm 0,2)$ °C (s. Abb. 35). Bei beiden Systemen war der pH-Wert zu Beginn des Versuchs bei pH 7,0 und stieg dann an. Durch manuelle Zugabe von insgesamt 45 mmol HCl (wässr. Lösung, 1 mol/L) wurde der pH auf Werten zwischen 7,0 und 7,6 in System 1 bzw. zwischen 7,0 und 7,9 in System 2 gehalten.

Die Sauerstoffkonzentrationen zeigten aerobe Bedingungen in der Wasserphase an.

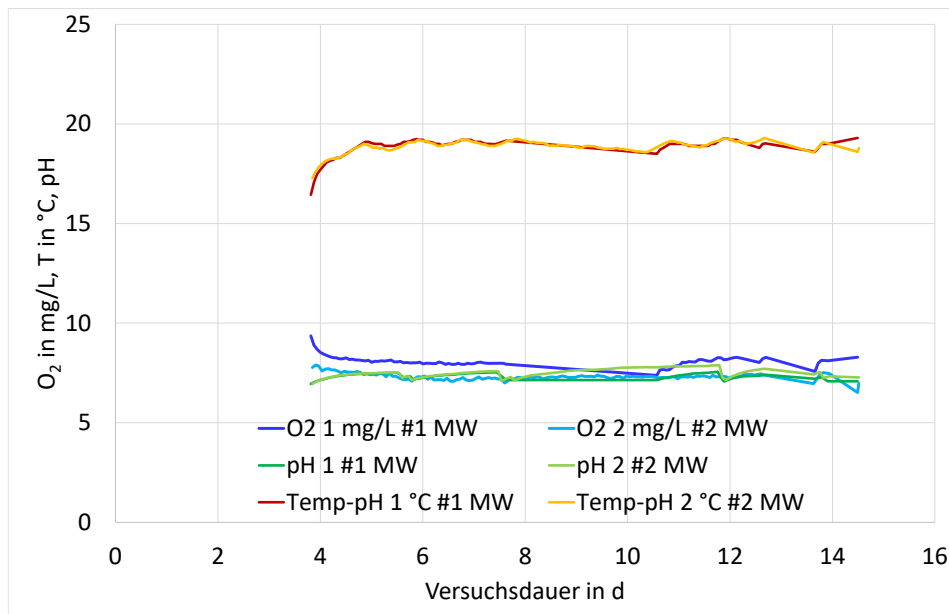


Abb. 35: V3 pH, Sauerstoff und Temperatur

Die höhere Salzkonzentration gegenüber Versuch 2 verursachte eine höhere Leitfähigkeit (s. Abb. 36) und war zu Beginn mit 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 1) bzw. 4600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 2) nochmals deutlich höher als bei Versuch 2 (beide 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Auch hier war eine Abnahme im Verlauf des Versuchs auf ca. 4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu beobachten (s. Abb. 36), da ein Teil der Salze von den Pflanzen aufgenommen wurde. Bei System 1 fiel die Wasserpumpe 3 d lang aus, da der Wassersensor fälschlicherweise einen zu hohen Wasserstand signalisierte.

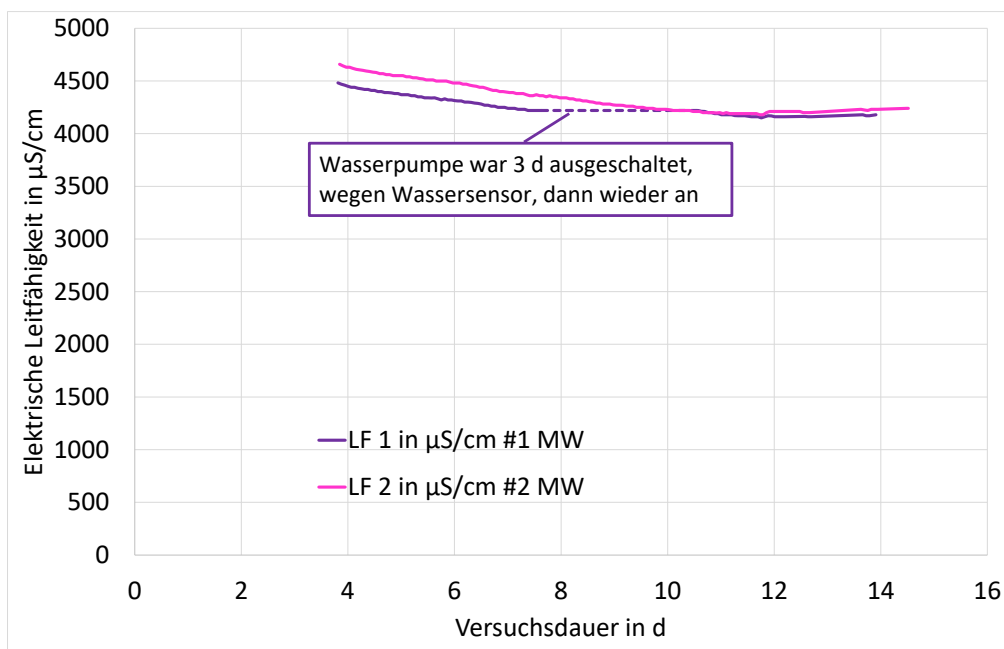


Abb. 36: V3- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase

4.2.3.4 N₂O und CO₂ in der Gasphase

Die Lachgas Konzentrationen waren auch bei Versuch 3 im Allgemeinen sehr niedrig (< 1 ppm). Nachdem jedoch die Wasserpumpe bei System 1 drei Tage lang ausgefallen war, gab es nach dem wieder Einschalten des Wasserkreislaufs einen sehr schnellen Anstieg der N₂O Konzentrationen auf bis zu 7,6 ppm, die ca. 7 h nach dem maximalen Wert bereits wieder auf unter 1 ppm abgesunken waren (s. Abb. 37). In der gesamten Versuchszeit wurden die Sequenzen der Gasmessung und Lüftung beibehalten, so dass die hohen Konzentrationen nicht von einer längeren Anreicherungszeit herrühren konnten.

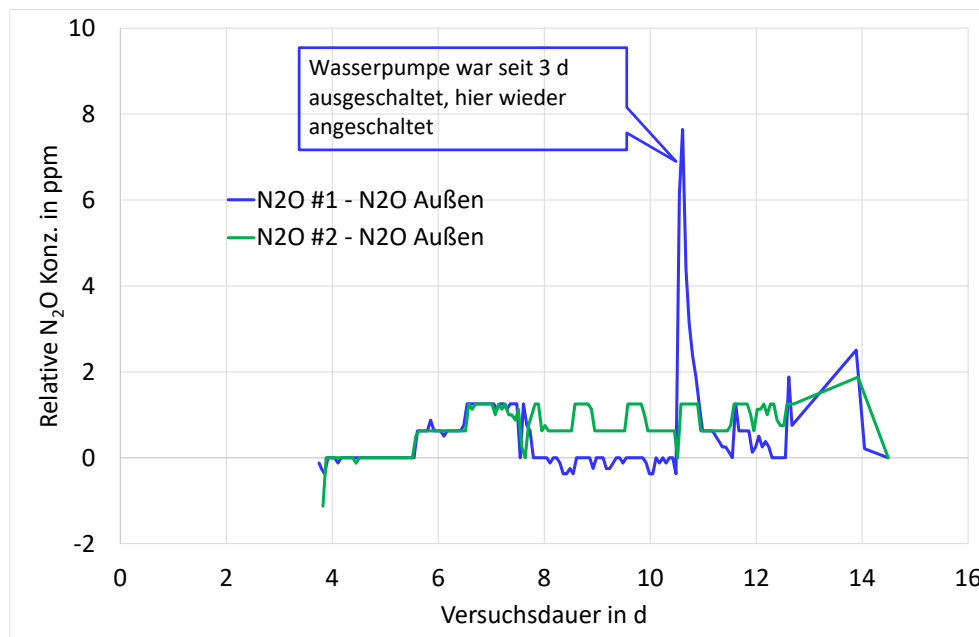


Abb. 37: V3 Relative N₂O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

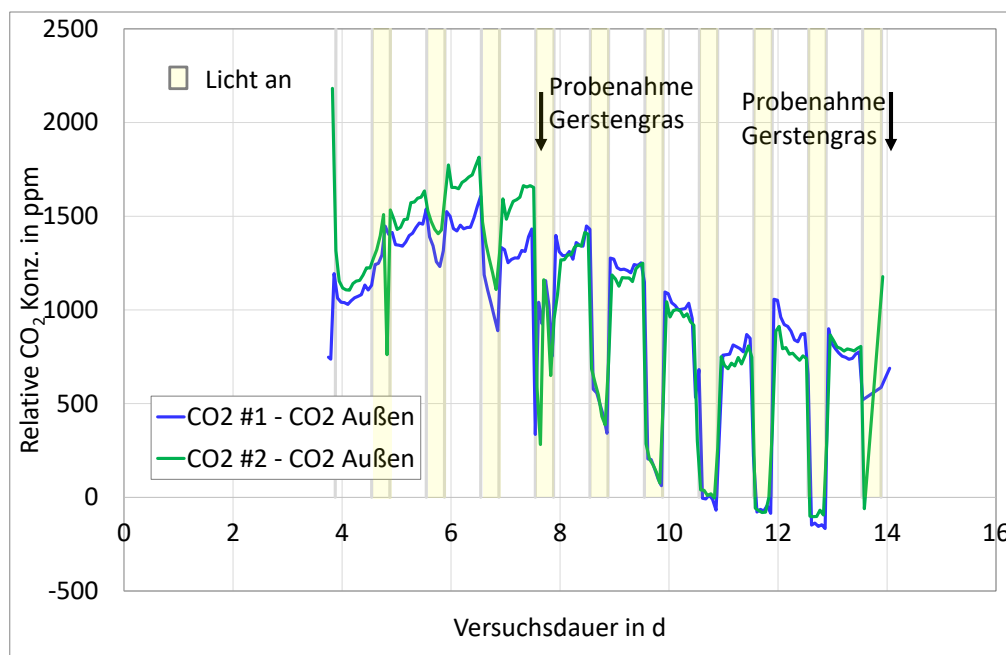


Abb. 38: V3 Relative CO₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2). Gelb = Licht an.

Dass sich nach einer Trockenphase die Lachgas-Emissionen erhöhen, ist aus der Literatur bekannt (Harris et al. 2021), jedoch im Zusammenhang mit Bodenbakterien. Hier war zwar kein Boden beteiligt, jedoch könnten sessile Bakterien auf den Pflanzenoberflächen dafür verantwortlich sein.

Die CO₂ Emissionen waren bei beiden Systemen wieder sehr ähnlich (s. Abb. 38). Die hohen Emissionen zu Beginn der Versuche sind vermutlich hauptsächlich auf den Abbau der Nährstoffe im Gerstenkorn und die natürliche Atmung der Pflanzen zurückzuführen. Bis zum 6. d stiegen die CO₂ Konzentrationen bis maximal 1770 ppm (System 1) bzw. 1477 ppm (System 2), danach nahmen die Konzentrationen wieder ab. Ab dem 10. d bis 11. d war die Bilanz der CO₂-Produktion bei Belichtung sogar negativ, also die CO₂ Konzentrationen in den Pflanzenbehältern waren niedriger als in der Außenluft.

4.2.3.5 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Da die Nitratkonzentrationen im Nährmedium ca. doppelt so hoch waren, wie bei Versuch 2, hätte man erwarten können, dass auch die Nitratkonzentrationen in den Pflanzen höher sind. Dies war jedoch nicht der Fall (s. Abb. 39). Vielmehr waren die gemessenen Nährstoff-Konzentrationen in einer ähnlichen Größenordnung, was darauf hinweist, dass die Anreicherung dieser Salze eine natürliche Obergrenze erreicht haben könnte.

Bei diesem Versuch wurde auch untersucht, welche Verteilung sich zwischen Spross und Wurzel ergibt. Bei den Nitrat Gehalten wurden höhere Werte in den Wurzeln gemessen, während bei den übrigen Komponenten keine eindeutige Zuordnung möglich ist.

Bei allen Inhaltsstoffen zeigte sich, dass die Gehalte in der Pflanze nach 14 d nicht höher waren als nach 7 d.

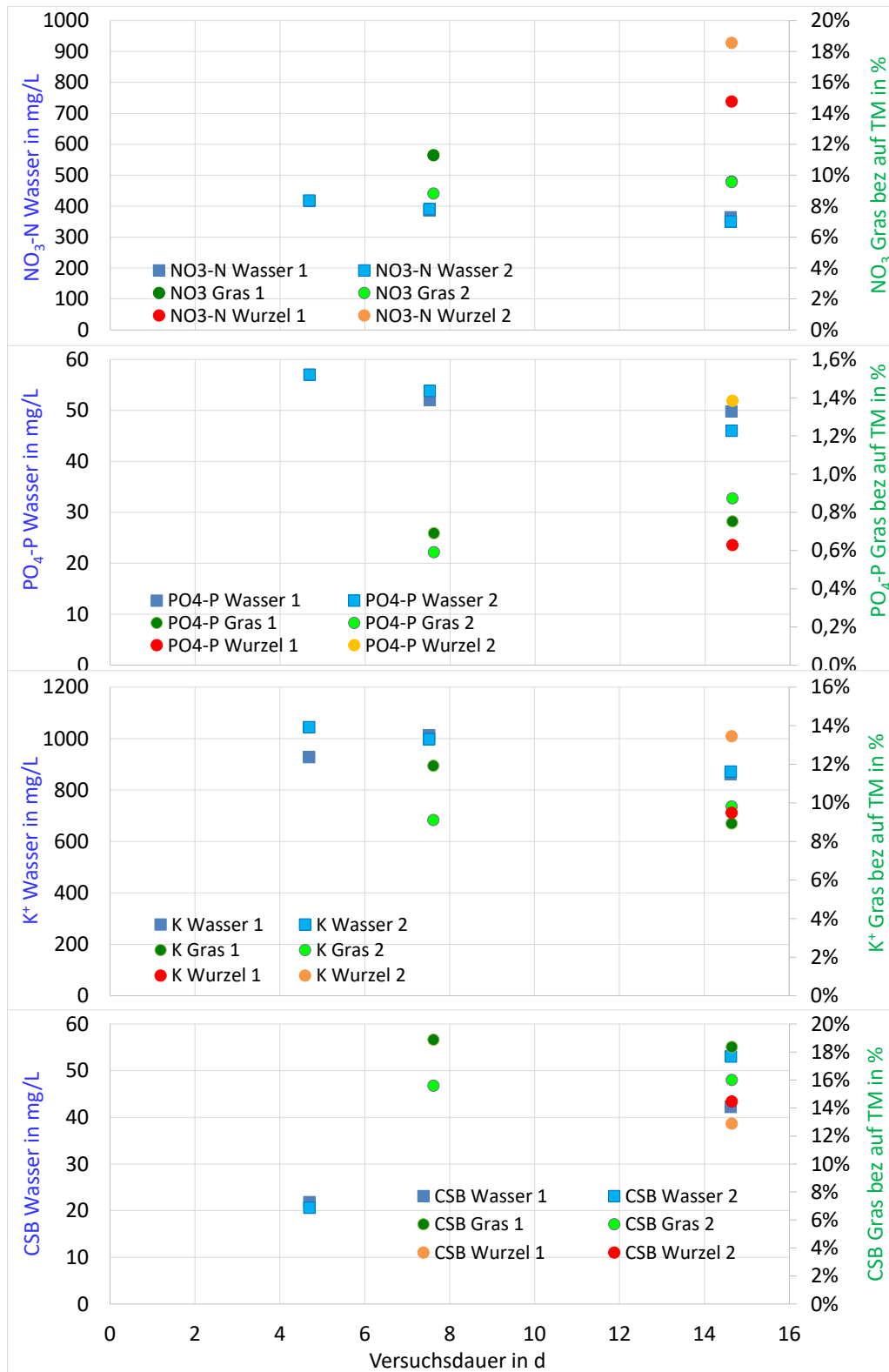


Abb. 39: V3 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze und der Wurzel bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

4.2.4 Versuch 4 (V4) mit Boden

4.2.4.1 Ankeimungsphase

Die Vorbereitung und Ankeimungsphase bei Versuch 4 wurde gegenüber den anderen Versuchen abgeändert, da hier Blumenerde eingesetzt wurde. Die Vorgehensweise ist in Kap.3.6.5 beschrieben.

4.2.4.2 Start des Versuchs und Betrieb

Da die Saatschalen bereits beim Ankeimen in die Laboranlagen eingesetzt wurden, konnten hier die Messwerte von Anfang an verfolgt werden. Nach 5 d wurde die Beleuchtung eingeschaltet und bei Anlage 1 Dünger und KNO_3 zugegeben, so dass sich Konzentrationen von ca. 425 mg/L NO_3^- -N, 52 mg/L PO_4^{3-} -P und 1272 mg/L Kalium in der Nährlösung ergaben. Anlage 2 sollte als Referenz dienen. Deshalb wurden hier keine Nährstoffe zugegeben.

Dennoch wuchsen die Gerstenpflanzen in Anlage 2 nur etwas langsamer. Nach 12 d erreichten die Pflanzen eine Höhe von 24 cm bis 28 cm in Anlage 1, sowie 20 cm bis 26 cm in Anlage 2. Auch bei diesem Versuch wurde nach ca. 7 d (Zwischenernte) und 14 d (Schluss-ernte) jeweils Gerstengrasproben genommen und analysiert.

4.2.4.3 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

Nach der Aufwärmzeit stiegen die Temperaturen der Nährlösung in beiden Systemen langsam von ca. 18 °C auf 19 °C an (s. Abb. 40). Bei System 1 lag der Start pH bei 7,8, bei System 2 (ohne Dünger) bei pH 7,0. Im Verlauf des Versuchs glichen sich die pH-Werte auf 7,3 bis 7,4 an.

Da der Wasserkreislauf nur einmal je Tag ca. 2 min bis 5 min aktiviert wurde, waren die Sauerstoffkonzentrationen niedriger, teilweise unter 5 mg/L, jedoch immer noch im aeroben Bereich.

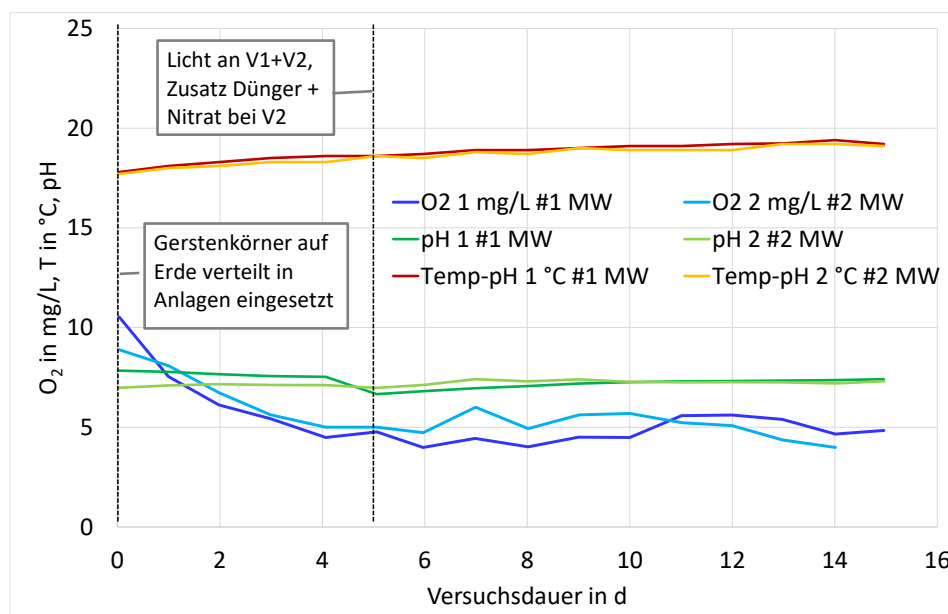


Abb. 40: V4 pH, Sauerstoff und Temperatur

Die Leitfähigkeit (s. Abb. 41) in System 1 war nach dem Zusatz der Nährsalze mit ca. 4600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ etwa ebenso hoch wie bei Versuch 3, während sie in System 2 (ohne Nährstoffe) bei 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ stagnierte. Im Gegensatz zu Versuch 3 nahm die Leitfähigkeit jedoch auch bei System 1 nahezu nicht ab.

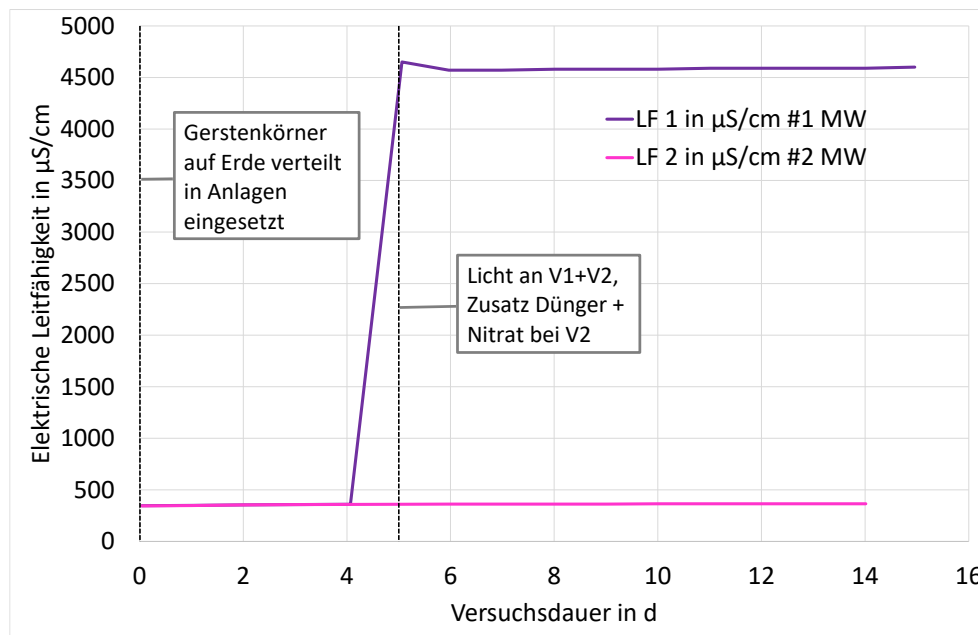


Abb. 41: V4- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase

4.2.4.4 N_2O und CO_2 in der Gasphase

Bei den Lachgas Konzentrationen zeigte sich beim Einsatz von Blumenerde ein anderes Bild als bei den anderen Versuchen (s. Abb. 42). Bereits während der Keimungsphase zeigte sich ein leichter Anstieg der relativen N_2O Konzentrationen auf ca. 4 ppm bei beiden Systemen, was vermutlich mit den Nährstoffen in der Erde zusammenhängt.

Nach der Zugabe von Nährstoffen bei System1 zeigte sich nur dort jeweils ein Peak kurz nach dem Aktivieren des Wasserkreislaufs, der einmal am Tag (bei beiden Systemen) für 2 min bis 5 min gestartet wurde. Um auszuschließen, dass das Lachgas aus dem Wasser im Wasserbehälter herrührt, wurde am 12.d die Gasmessung umgestellt und die Luft über einen Zeitraum von 18 h in der fortlaufenden Sequenz immer wieder aus dem abgedeckten Wasserbehälter abgezogen (s. Abb. 42, schwarze Quadrate). Die Konzentrationen waren hier nur wenig höher (ca. 0,5 ppm) als in der Außenluft, so dass aus dem Wasserbehälter keine Emissionen zu erwarten sind. Je weiter der Versuch fortschritt, desto höher wurden diese N_2O -Peaks. Die maximale Konzentration mit 11 ppm wurde am 14. d erreicht.

Von ähnlichen Beobachtungen wird in der Literatur berichtet. Harris et al. 2021 stellten höhere N_2O Emissionen nach Trockenperioden im Boden fest. Llorach-Massana et al. 2017 ermittelten, dass N_2O -Emissionen aus erdelosen Kulturen im Vergleich zu konventionellen Kulturen deutlich geringer waren.

Während der Keimphase, bis zum Zeitpunkt der Düngerzugabe in System 1, stiegen die CO_2 Emissionen im Gasraum beider Pflanzenkisten in sehr ähnlicher Weise an (s. Abb. 43). Danach unterschieden sie sich auch nur geringfügig, wobei System 1 (mit Dünger) eher etwas weniger CO_2 emittierte. Die CO_2 Konzentrationen waren bei Versuch 4 insgesamt deutlich

höher als in den anderen Versuchen. Dies könnte ein Hinweis auf biologische Abbau-Vorgänge in der Blumenerde sein. **Genau wie bei den Versuchen zuvor, waren die CO_2 Konzentrationen am 6. d während der Dunkelphase maximal und ab dem 10. d waren sie in der Hellphase niedriger als in der Außenluft.**

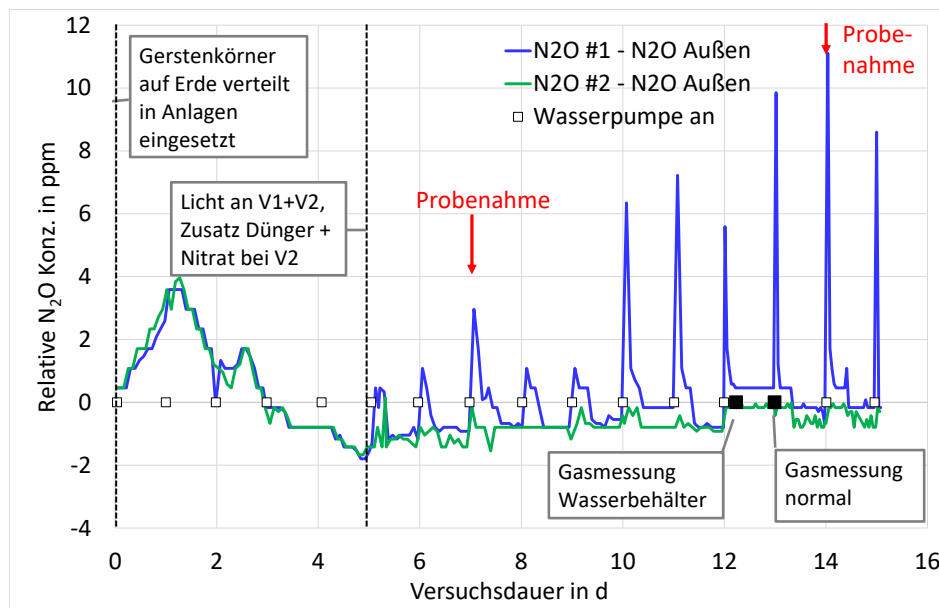


Abb. 42: V4 Relative N_2O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

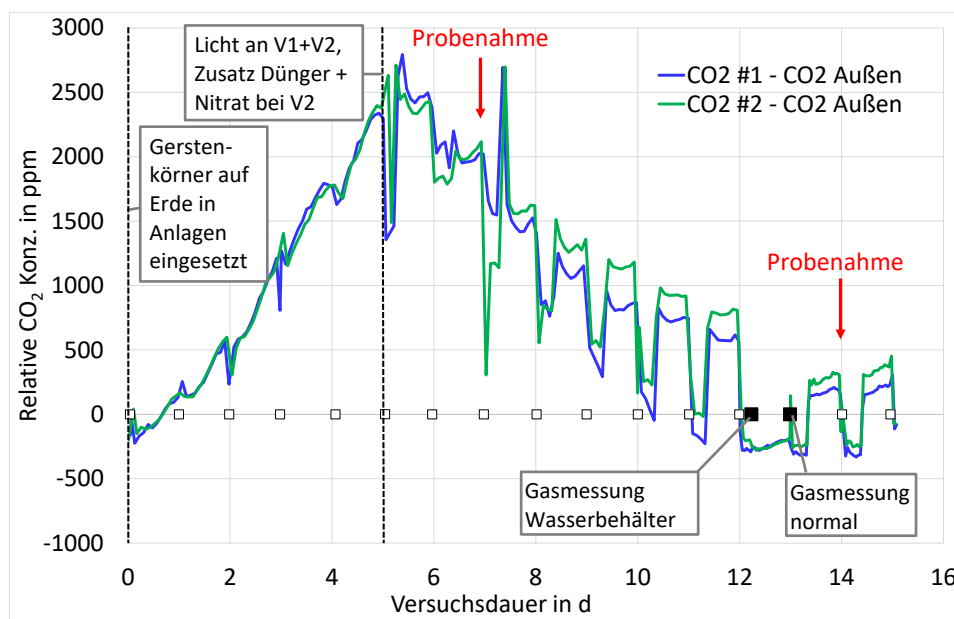


Abb. 43: V4 Relative CO_2 Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2).

4.2.4.5 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Obwohl die Nitratkonzentrationen im Nährmedium von System 1 genauso hoch waren, wie bei Versuch 3, waren die Nitratkonzentrationen in den Pflanzen mit 1,4 % NO_3^- bezogen auf Trockenmasse viel geringer (s. Abb. 44).

Auch die Kalium- und Phosphatkonzentrationen waren deutlich niedriger, was auch dadurch bestätigt wurde, dass die Konzentrationen im Nährmedium kaum abnahmen. Dagegen waren die CSB-Gehalte deutlich höher als in den anderen Versuchen. Eine plausible Erklärung für diese Unterschiede wurde noch nicht gefunden. Um eine fundierte Aussage zu machen, wäre es erforderlich weitere Versuche mit verschiedenen anderen Böden durchzuführen, was aber aufgrund der begrenzten Ressourcen bisher nicht möglich war.

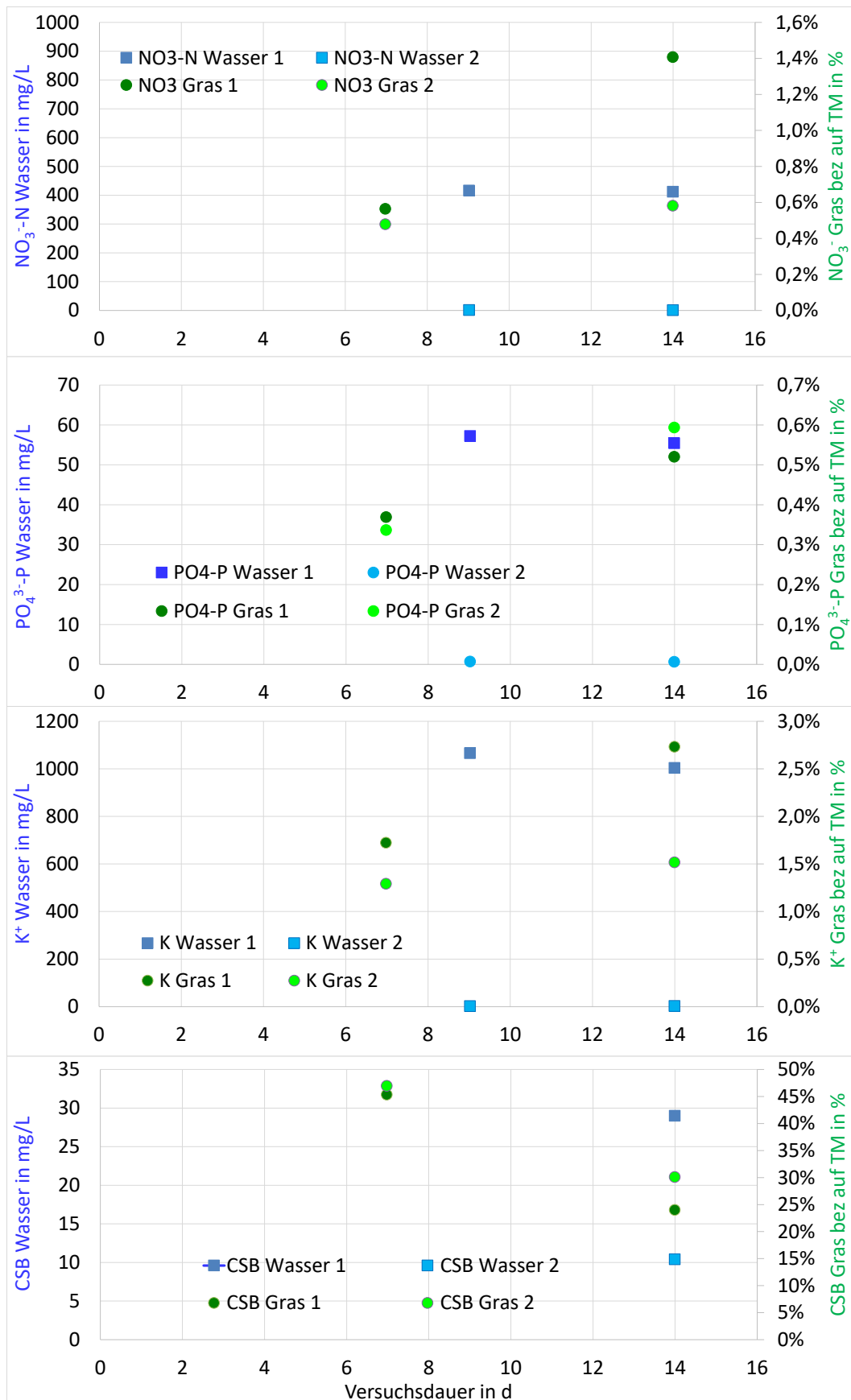


Abb. 44: V4 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

4.2.5 Versuch 5 (V5) ohne Abdeckung

4.2.5.1 Ankeimungsphase

Die Quellung (während 12 h) und die anschließende Keimungsphase (2,5 d) wurde, wie bei allen Versuchen vor Licht geschützt bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) durchgeführt.

4.2.5.2 Start des Versuchs und Betrieb

Nach Einsetzen der Saatschalen in die Laboranlagen und Einschalten der Beleuchtung, wurden beiden Systemen Dünger und KNO_3 zugegeben, so dass sich wie in Versuch 3 Konzentrationen von ca. 425 mg/L NO_3^- -N, 52 mg/L PO_4^{3-} -P und 1272 mg/L Kalium in der Nährlösung ergaben. (Weitere wichtige Nährstoffe und Spurenelemente im Dünger s. Tab. 6). Einziger Unterschied zu Versuch 3 war die Tatsache, dass beide Pflanzenkisten nicht mit Plexiglas-scheiben abgedeckt waren.

Die Gerstenpflanzen wuchsen etwas langsamer als in Versuch 3 und erreichten nach 10 d eine Höhe zwischen 18 cm und 22 cm. Nach ca. 7 d (Zwischenernte) und 14 d (Schluss-ernte) wurden jeweils Gerstengrasproben genommen und analysiert.

4.2.5.3 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

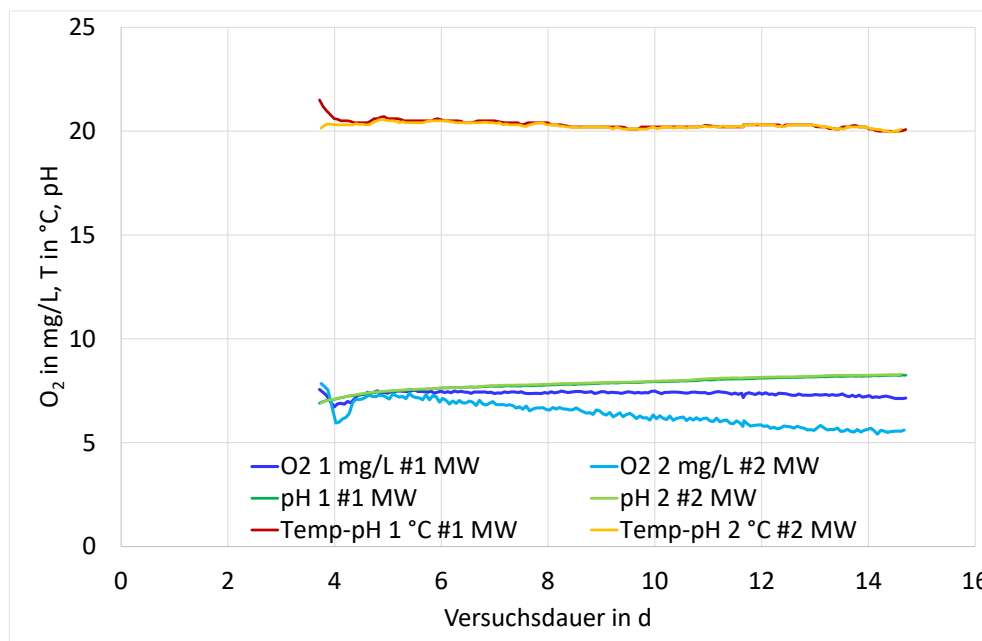


Abb. 45: V5 pH, Sauerstoff und Temperatur

Hier wurde das Wasser bereits ein paar Tage vor dem Start der Hauptversuche in die Wasserbehälter gegeben, so dass die Temperatur sich zu Beginn nicht mehr änderte. Daher blieb die Temperatur der Nährlösung in beiden Systemen konstant bei $(20,3 \pm 0,1)$ °C (s. Abb. 45). Bei beiden Systemen war der pH-Wert zu Beginn des Versuchs bei pH 7,0 und stieg im Verlauf des Versuchs auf pH 8,3 an. Die Sauerstoffkonzentrationen zeigten aerobe Bedingungen in der Wasserphase an.

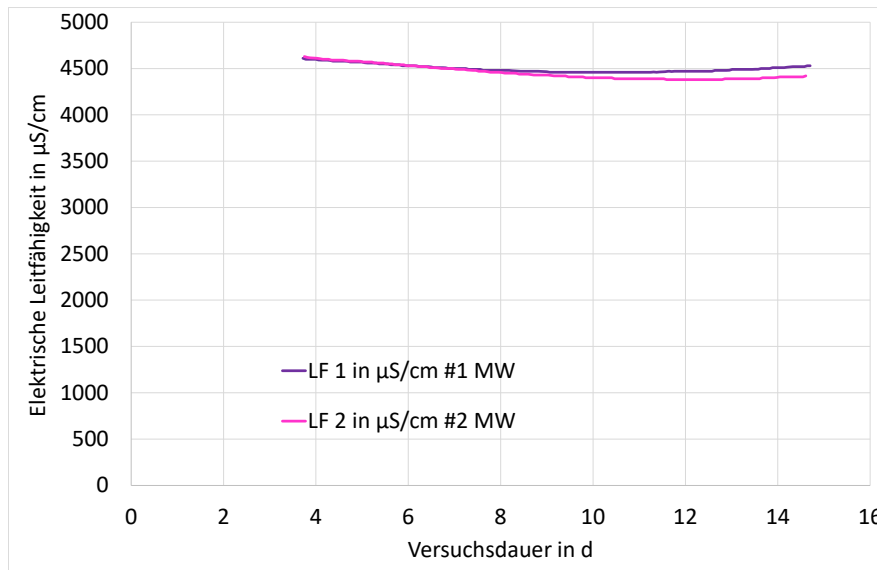


Abb. 46: V5- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase

Die Salzkonzentrationen waren genauso hoch wie in Versuch 3, so dass sich die Leitfähigkeitswerte in der gleichen Größenordnung bewegten (s. Abb. 46). Die Abnahme im Verlauf des Versuchs auf 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bzw. 4400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ war etwas geringer als bei Versuch 3.

4.2.5.4 N_2O und CO_2 in der Gasphase

Da die beiden Systeme nicht abgedeckt waren, geben die Lachgas und CO_2 Konzentrationen nur die Werte der Raumluft wieder und sind daher nicht relevant. Einzelne Spitzen bei CO_2 Konzentrationen können durch die Atmung der Personen im Labor ausgelöst worden sein. Diese Messungen sind jedoch nicht aussagekräftig. Dennoch wurden die Schalt-Sequenzen beibehalten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen.

4.2.5.5 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Die Intention dieses Versuchs war es die Frage zu klären, ob eine Erniedrigung der Luftfeuchtigkeit die Pflanzen zu erhöhter Wasserabgabe an den Blättern und dadurch zur verstärkten Nährlösungsaufnahme über die Wurzeln veranlasst. Da die Nitratkonzentrationen im Nährmedium genauso hoch waren, wie bei Versuch 3, hätte man sonst erwarten können, dass auch die Nitratkonzentrationen in den Pflanzen genauso hoch sind. Tatsächlich waren Nitrat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Gerstengras bezogen auf die Trockenmasse um ca. 20 % höher, während die Phosphat-Konzentrationen etwa gleich hoch waren (s. Abb. 47). damit wurden in diesem Versuch **die höchsten Nährstoffgehalte** im Gras erreicht.

Außer beim Phosphat zeigte sich bei allen Inhaltsstoffen, dass die Gehalte in der Pflanze auch hier nach 14 d nicht wesentlich höher waren als nach 7 d.

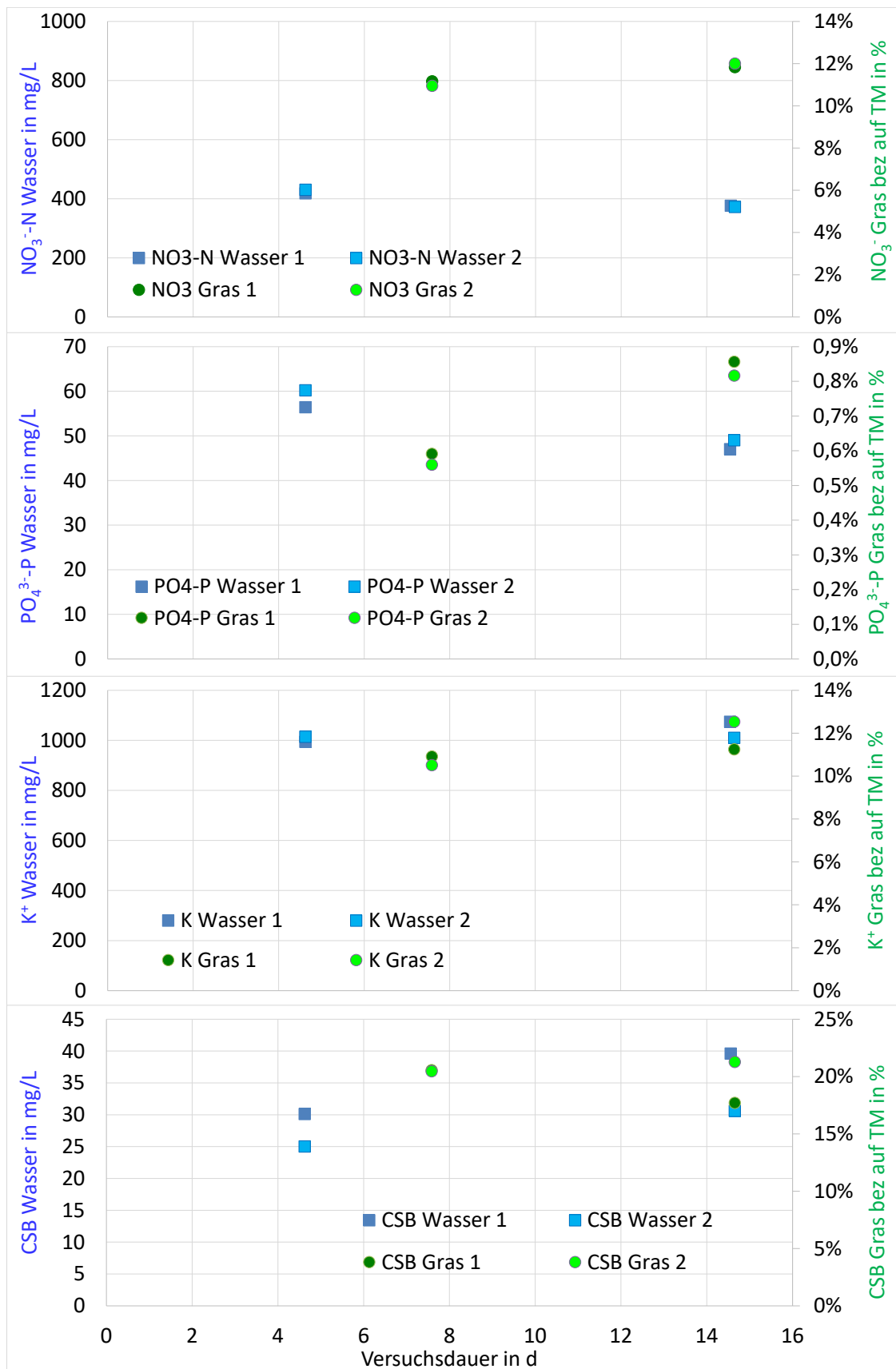


Abb. 47: V5 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

4.2.6 Versuch 6 (V6) Ammonium-Düngung

4.2.6.1 Ankeimungsphase

Die Quellung (während 12 h) und die anschließende Keimungsphase der Gerstenkörner (2,5 d) wurde, wie bei allen Versuchen vor Licht geschützt bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) durchgeführt, wobei die Körner jeden Tag angefeuchtet wurden.

4.2.6.2 Start des Versuchs und Betrieb

Nach Einsetzen der Saatschalen in die Laboranlagen und Einschalten der Beleuchtung, wurden bei beiden Systemen je 20 g Dünger zugegeben, so dass sich Konzentrationen von ca. 75 mg/L NO_3^- -N, 52 mg/L PO_4^{3-} -P und 300 mg/L Kalium in der Nährlösung ergaben. Um den Effekt von Ammonium auf die Lachgas Emissionen zu erkunden, wurden die Nährstoffe diesmal mit 24 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ statt KNO_3 als zusätzliche N-Quelle ergänzt, so dass eine Konzentration von 254 mg/L NH_4^+ -N bei beiden Systemen erreicht wurde (weitere Salze und Spurenelemente s. Tab. 6).

Die Gerstenpflanzen wuchsen in etwa so schnell wie in Versuch 3 und erreichten nach 11 d eine Höhe zwischen 21 cm und 26 cm (s. Abb. 48). Nach ca. 7 d (Zwischenernte) und 14 d (Schlussernte) wurden jeweils Gerstengrasproben genommen und analysiert.

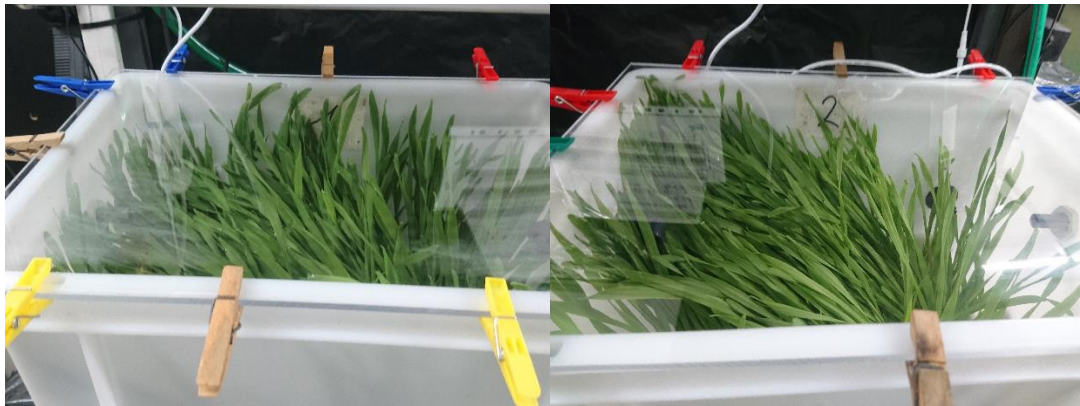


Abb. 48: V6 Aussehen der Gerstenpflanzen nach 11 d, links: System 1; rechts: System 2. Halme stoßen bereits am Deckel an.

4.2.6.3 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

Nach der Aufwärmzeit von ca. 1 d blieb die Temperatur der Nährlösung in beiden Systemen annähernd konstant bei $(20 \pm 0,1)$ °C (s. Abb. 49).

Die pH-Werte sanken in beiden Systemen von anfänglich pH 7,1 (nach der Temperatur-Angleichung) ab. Daher wurde am 12. d (System 1) bzw. 13. d (System 2) kleine Mengen KOH zugegeben, so dass der pH von 5,1 (#1) bzw. 6,2 (#2) wieder auf ca. 6,5 anstieg. Die Ursache für die pH-Erniedrigung ist wahrscheinlich eine Nitrifikation im Kreislaufwasser. Dafür sprechen auch die erhöhten Nitritkonzentrationen (System 1: 1,0 mg/L NO_2^- -N, System 2: 0,8 mg/L NO_2^- -N) im Nährmedium. Aerobe Bedingungen, als Voraussetzungen dafür, waren durch die hohen Sauerstoff-Konzentrationen gegeben.

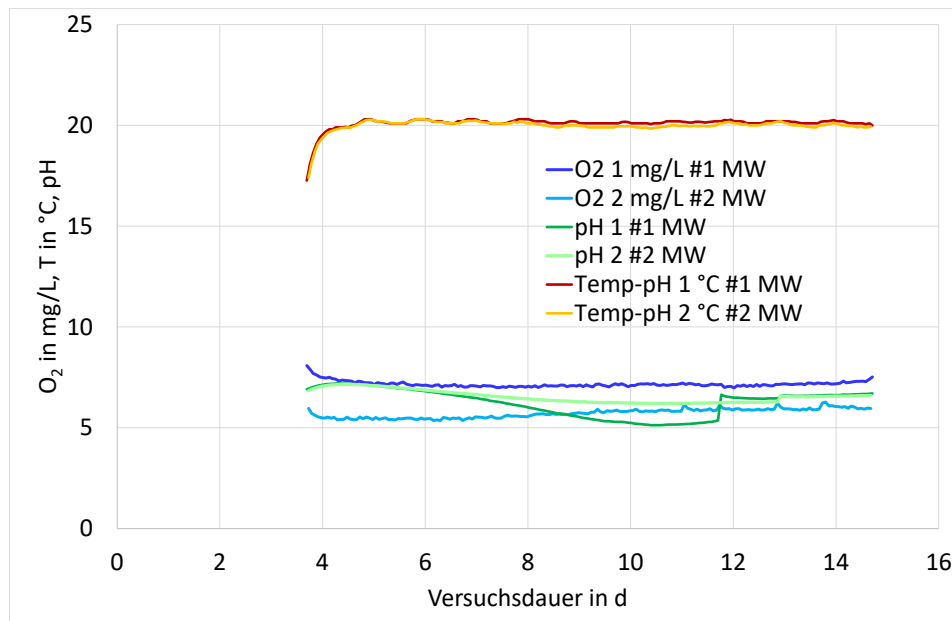


Abb. 49: V6 pH, Sauerstoff und Temperatur

Die Leitfähigkeit und damit die Salzkonzentrationen waren niedriger als bei den Versuchen 3 bis 5 (s. Abb. 50). Die Konzentration an anorganischen Stickstoff (hier als $\text{NH}_4^+\text{-N}$), entsprach in etwa derjenigen in Versuch 2 (als $\text{NO}_3^-\text{-N}$). Die Zugaben von KOH für die pH-Korrektur (s.o.) sind als kleine Stufen auch in Abb. 50 erkennbar.

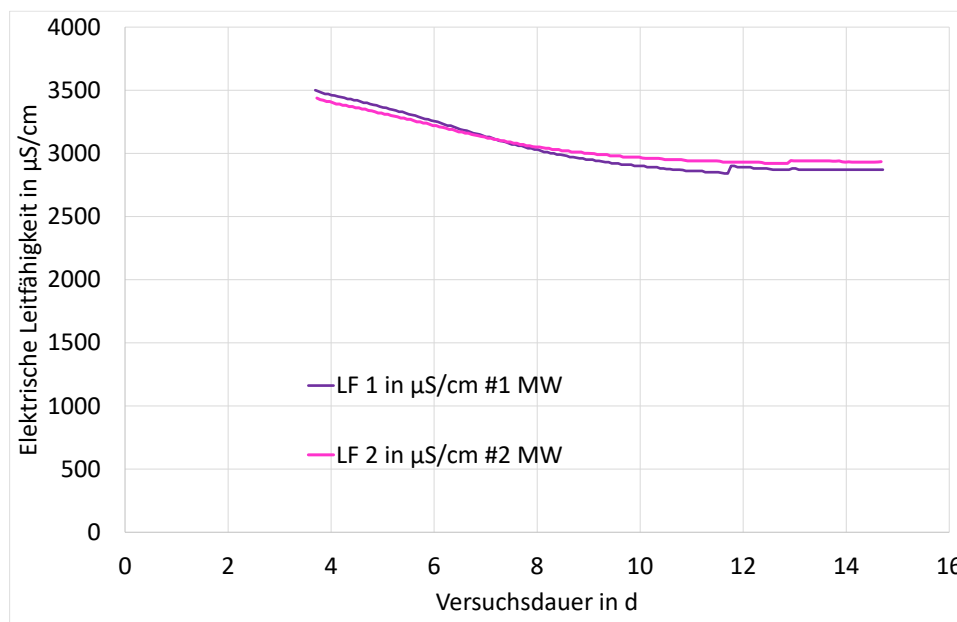


Abb. 50: V6- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase

4.2.6.4 N_2O und CO_2 in der Gasphase

Die Lachgas Konzentrationen waren auch bei Versuch 6 relativ niedrig, wobei die Emissionen ab dem 8. d auf ca. 1 ppm bis 3 ppm anstiegen (s. Abb. 51).

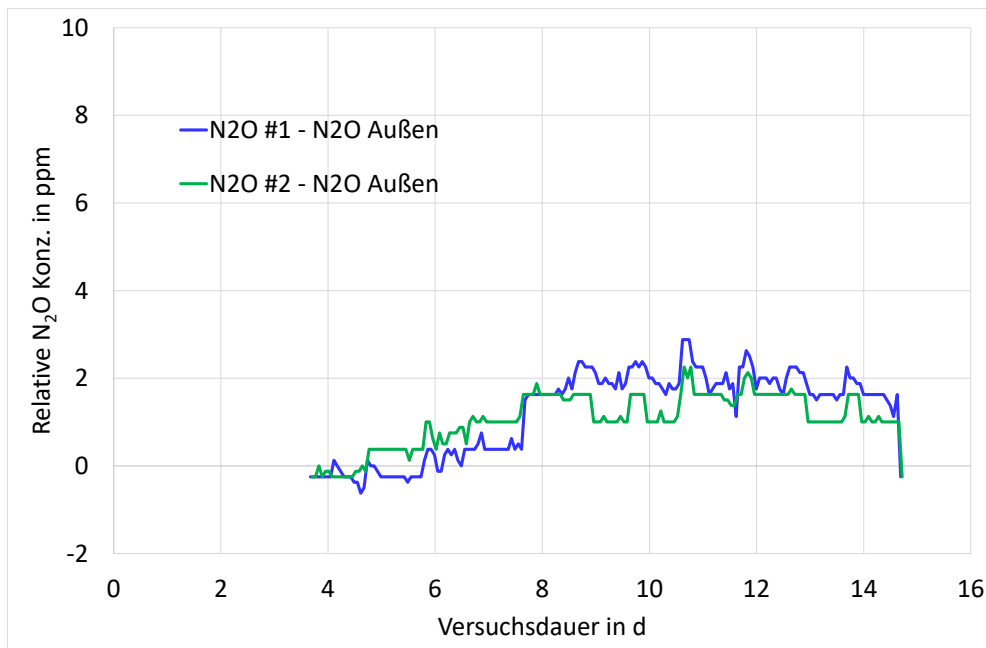


Abb. 51: V6 Relative N₂O Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

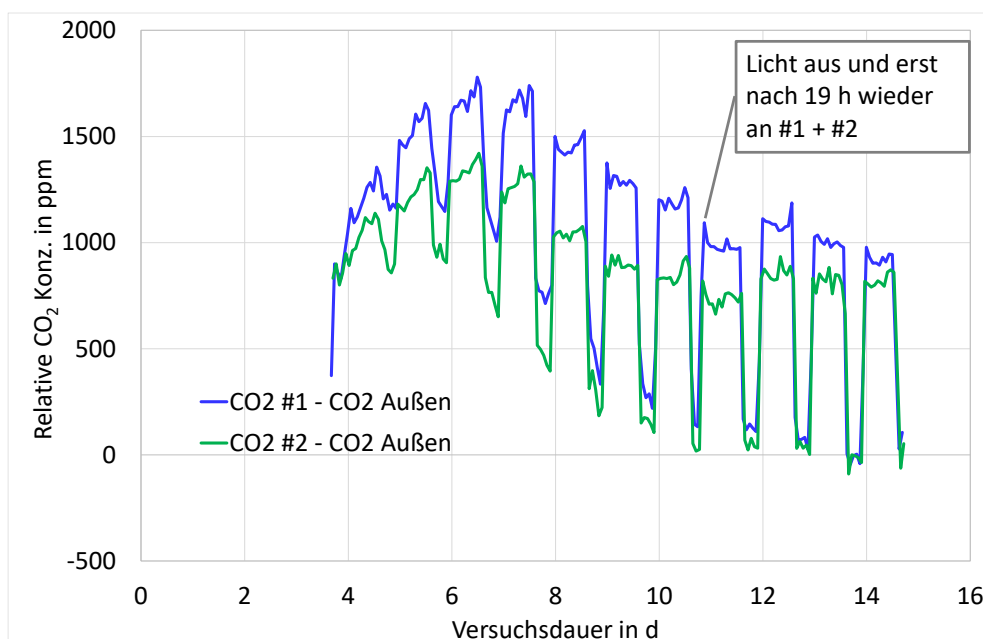


Abb. 52: V6 Relative CO₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2)

Bei diesem Versuch wurden unterschiedliche CO₂ Emissionen gemessen, obwohl die Gerstenpflanzen in beiden Systemen vergleichbare Bedingungen hatten (s. Abb. 52). Die Ursache hierfür konnte nicht gefunden werden. Auch hier waren die höchsten CO₂ Konzentrationen nach 6 d bis 7 d zu beobachten und nach 10 d bis 13 d wurde bei Beleuchtung eine niedrige CO₂ Konzentration in der Größenordnung der Außenluft erreicht. Am 11. d wurde zur fotografische Dokumentation die Pflanzenlampen ausgeschaltet und erst 19 h später wieder eingeschaltet, woraus eine kürzere „Niedrig-CO₂ Phase“ resultierte.

4.2.6.5 Ammonium

Trotz der hohen Ammonium-Konzentrationen in der Nährlösung konnten in der Pflanze nur geringe Ammonium-Gehalte ermittelt werden (s. Abb. 53).

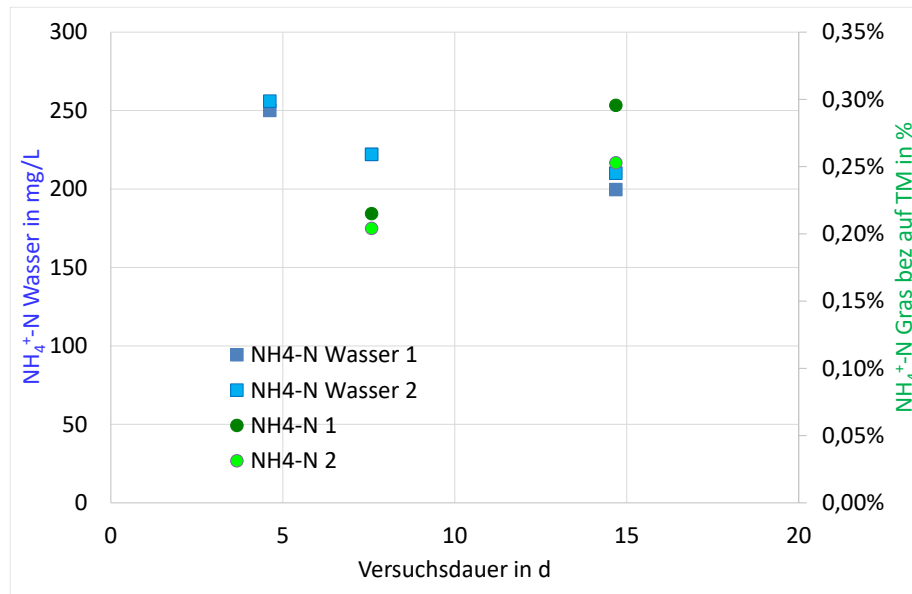


Abb. 53: V6 Ammonium-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

Dennoch nahmen die Ammonium-Konzentrationen in der Nährlösung im Verlauf des Versuchs ab, was, wie auch die Erniedrigung der pH-Werte, für eine Nitrifikation im Nährmedium spricht.

4.2.6.6 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Da die Nitratkonzentrationen im Nährmedium beim Start des Versuchs mit 75 mg/L NO_3^- -N sehr viel geringer waren, als bei den anderen Versuchen, ist hier die Abnahme im Verlauf des Versuchs verhältnismäßig gut im Diagramm zu erkennen (s. Abb. 54). Die Konzentrationen nahmen um ca. 50 mg/L ab.

Aufgrund der geringeren Nitratkonzentrationen im Nährmedium waren auch die Konzentrationen in der Pflanze nur ca. halb so hoch wie bei Versuch 2, 3 und 5. Offenbar wurden die hohen Ammonium-Konzentrationen im Nährmedium von den Pflanzen nicht für eine Akkumulation von Nitrat genutzt.

Aus der Abnahme der Nitratkonzentrationen im Wasser und den Volumina des Nährmedium berechnet sich die Abnahme von NO_3^- -N zu 668 mg (Anl. 1) bzw. 626 mg (Anl. 2). Die Zunahme von NO_3^- -N in der gesamten im Versuch erzeugten Pflanzenmasse kann zu 779 mg (Anl. 1) bzw. 687 mg (Anl. 2) geschätzt werden. D.h. zwischen 90 und 110 % des Nitrats wird in der Pflanze gespeichert, wenn man davon ausgeht, dass Ammonium nicht umgewandelt und gespeichert wird, was allerdings nicht ausgeschlossen werden kann.

Auch die Kaliumgehalte waren sehr viel geringer als bei den anderen Versuchen, so zeigte sich hier ein ähnliches Bild wie bei den Nitratgehalten.

Wie bei den anderen Versuchen waren auch hier die Nährstoff-Gehalte in der Pflanze nach 14 d nicht wesentlich höher waren als nach 7 d.

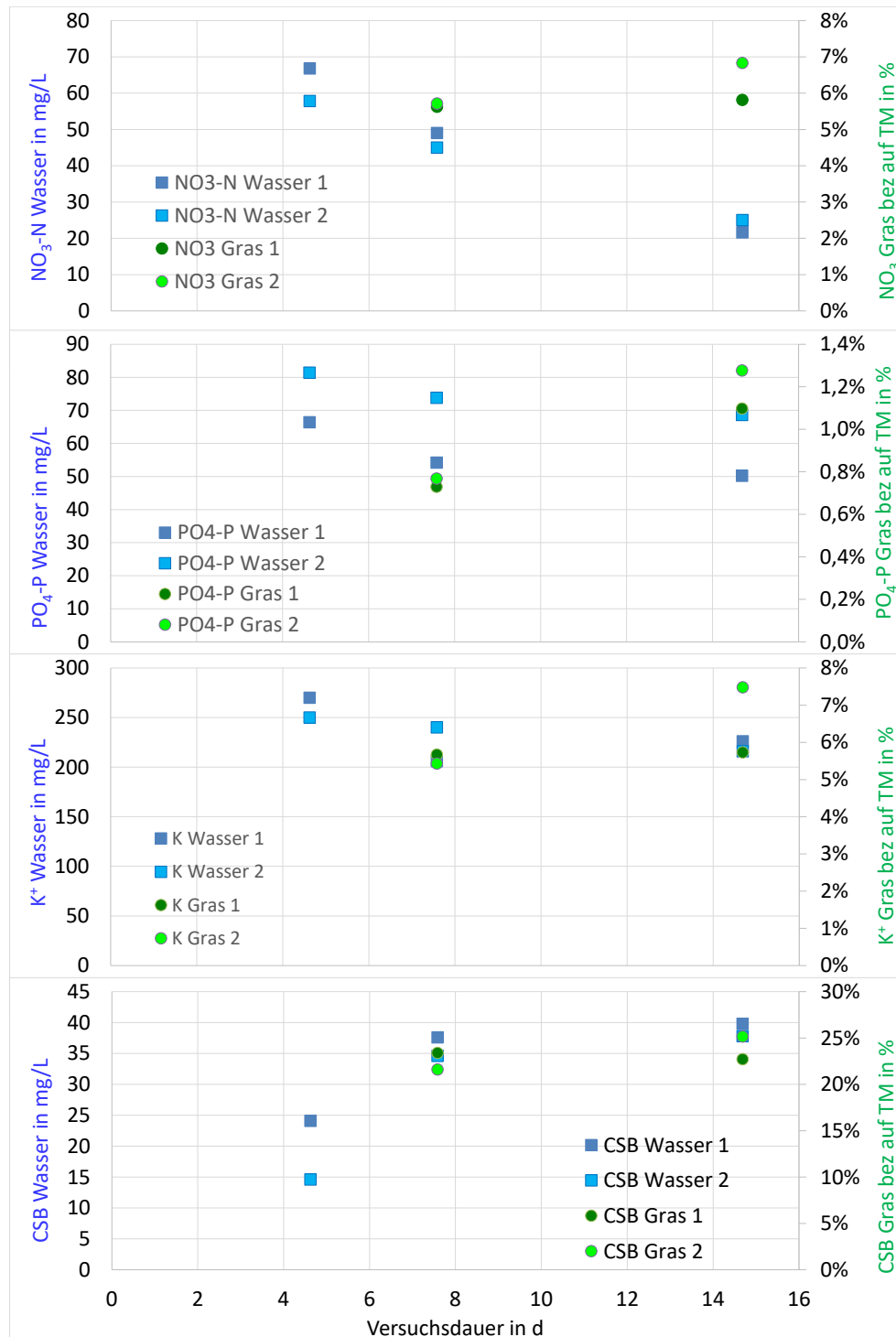


Abb. 54: V6 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

4.2.7 Versuch 7 (V7) pH-Wert Einfluss

Bei diesem Versuch sollte die Auswirkung von unterschiedlichen pH-Werten untersucht werden. Durch eine automatische Dosierung wurde der pH-Wert bei System 1 auf 6,0 bzw. bei System 2 auf 8,0 durch Dosierung einer wässrigen HNO_3 -Lösung ($c = 1 \text{ mol/L}$) gehalten. Dazu wurden Dosierpumpen eingesetzt, die bei pH-Werten über pH 6 bzw. pH 8 eingeschaltet wurden (s. Kap. 3.5.2). Zusätzliche Bedingung für den Dosiervorgang waren aktive Wasserpumpen, denn dadurch war die Rezirkulation der Nährlösung und damit die Anströmung der pH-Elektroden gewährleistet. Die Flaschen mit der HNO_3 -Lösung wurden vor und nach dem Versuch gewogen, um die dosierte NO_3^- -N Masse zu berechnen.

4.2.7.1 Ankeimungsphase

Die Quellung (während 12 h) und die anschließende Keimungsphase (3,7 d) wurde, wie bei allen Versuchen vor Licht geschützt bei Raumtemperatur (ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$) durchgeführt.

4.2.7.2 Start des Versuchs und Betrieb

Nach Einsetzen der Saatschalen in die Laboranlagen nach 3,7 d (nach der Aussaat in die Gitterschalen) und Einschalten der Beleuchtung, wurden bei beiden Systemen Dünger und KNO_3 zugegeben, so dass Konzentrationen von ca. 425 mg/L NO_3^- -N, $52 \text{ mg/L PO}_4^{3-}$ -P und 1272 mg/L Kalium in der Nährlösung entstanden. (Weitere Nährstoffe und Spurenelemente s. Tab. 6).

Die Gerstenpflanzen wuchsen in etwa so schnell wie in Versuch 3 und erreichten nach 10 d eine Höhe von 20 cm bis 26 cm bei System 1, sowie 23 cm bis 28 cm bei System 2. Nach ca. 7 d (Zwischenernte) und 14 d (Schlussernte) wurden jeweils Gerstengrasproben genommen und analysiert.

4.2.7.3 Leitfähigkeit, pH, Sauerstoff und Temperatur in der Wasserphase

Nach der Aufwärmzeit von ca. 0,5 d, bei der sich das kalte Leitungswasser an die Raumtemperatur anpasste, blieb die Temperatur der Nährstofflösung in beiden Systemen konstant bei ($20,2 \pm 0,16$) $^\circ\text{C}$ bzw. ($20,1 \pm 0,16$) $^\circ\text{C}$ (System 1 bzw. System 2 s. Abb. 55).

Bei beiden Systemen war der pH-Wert zu Beginn des Versuchs ca. bei pH 7,2. Nach ca. 1 d wurde durch die Dosierung bei System 1 der Zielwert von pH 6,0 erreicht, danach blieb er konstant bei 6,0 (s. Abb. 55). System 2 sollte auf pH 8,0 eingestellt werden. Hierzu wurde zu Beginn und bis zum 7. d jeden Tag KOH manuell dosiert, um den pH zwischen 7,8 und 8,0 konstant zu halten. Insgesamt wurden dabei $27,5 \text{ mmol KOH}$ zugegeben. Danach war keine Zugabe mehr erforderlich, da der pH, vermutlich durch die dann einsetzende Denitrifikation, anstieg. Damit setzte dann auch die Dosierung von HNO_3 ein. Insgesamt wurden dabei bei System 1 114 mmol HNO_3 (entsprechend 84 mg/L NO_3^- -N) und bei System 2 $27,5 \text{ mmol KOH}$ und 41 mmol HNO_3 (entsprechend 30 mg/L NO_3^- -N) zudosiert.

Die Sauerstoffkonzentrationen zeigten, ähnlich wie bei den anderen Versuchen, aerobe Bedingungen in der Wasserphase an.

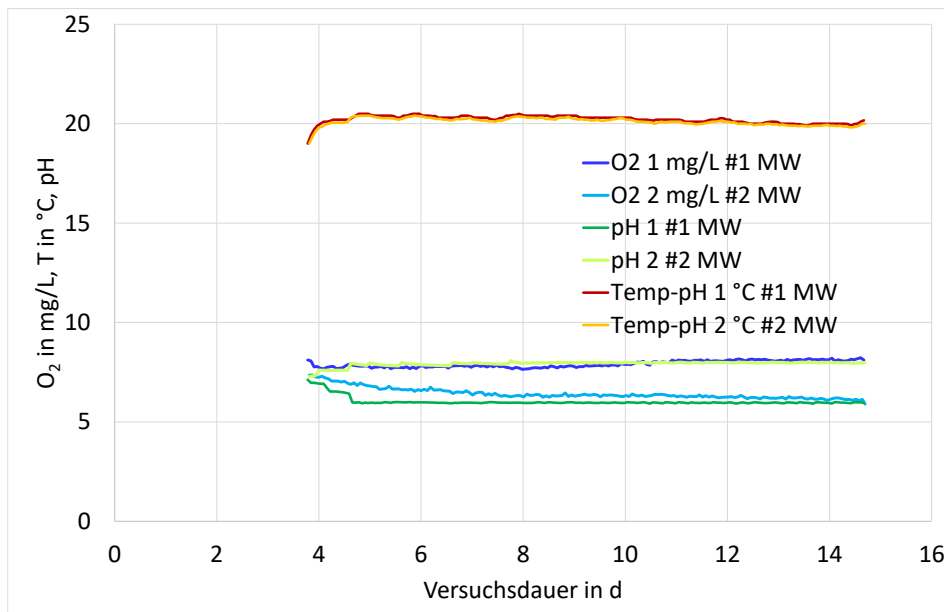


Abb. 55: V7 pH, Sauerstoff und Temperatur

Die Leitfähigkeit war zu Beginn mit 4460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 1) bzw. 4440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 2) genauso hoch wie bei Versuch 3. Sie verringerte sich im Verlauf des Versuchs auf ca. 4160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 1) bzw. 4180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 2) am 9. d und erhöhte sich danach wieder etwas auf 4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 1) bzw. 4240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (System 2), was vermutlich durch die Dosierung verursacht wurde (s. Abb. 56).

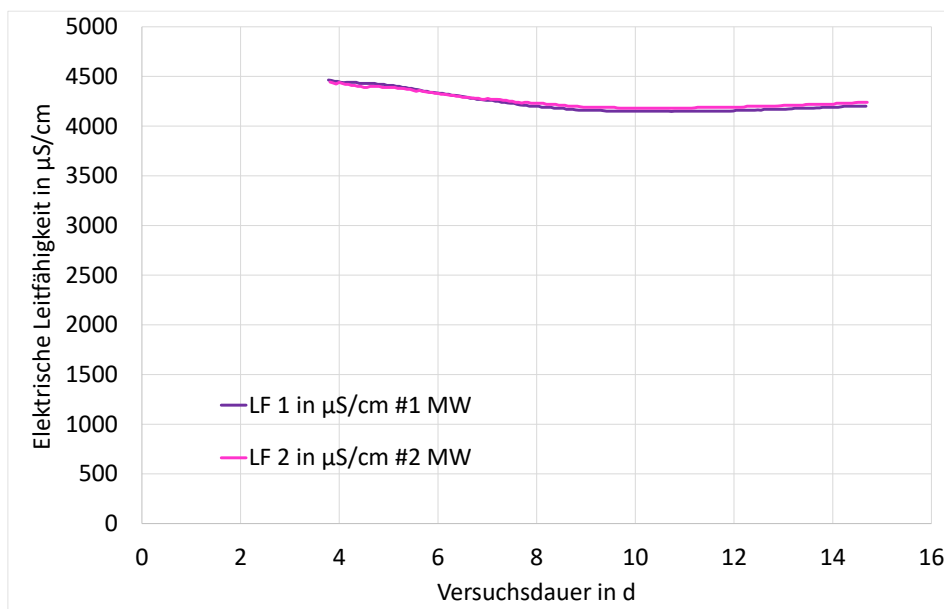
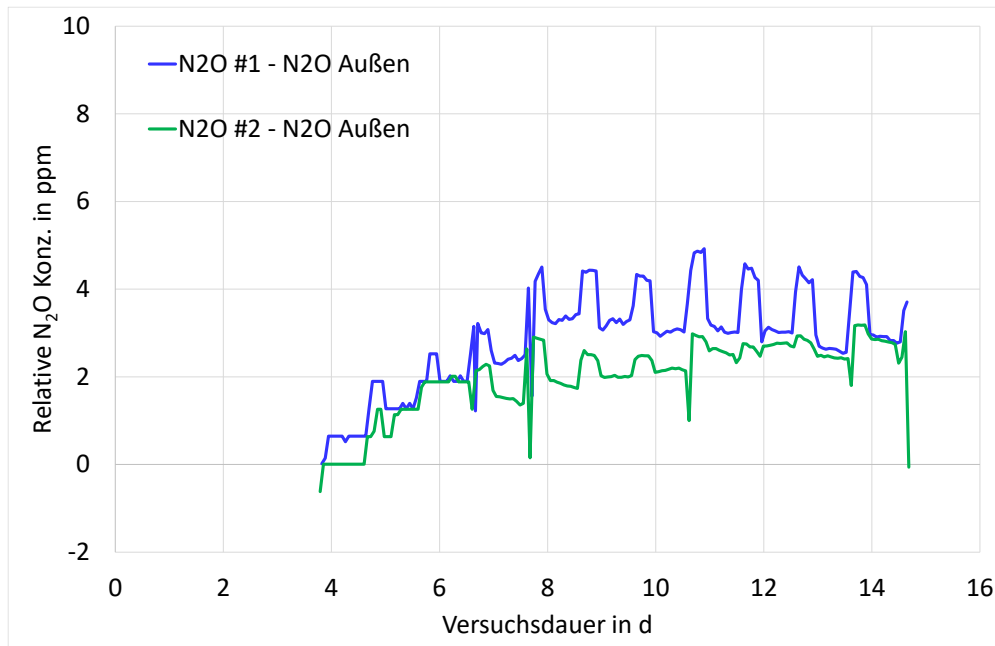


Abb. 56: V7- Elektrische Leitfähigkeit der Wasserphase (ähnlich wie V3)

4.2.7.4 N₂O und CO₂ in der Gasphase

Die Lachgas Konzentrationen stiegen im Verlauf von Versuch 7 auf maximal 5 ppm bei System 1 (pH 6) bzw. 3 ppm bei System 2 (pH 8) an (s. Abb. 57).



**Abb. 57: V7 Relative N₂O Konzentrationen
„#1“ System 1 (pH 6); „#2“ = System 2 (pH 8)**

Interessant hierbei ist auch der Vergleich mit den CO₂ Messwerten. So stiegen die N₂O Konzentrationen mit einsetzender Beleuchtung an, während die CO₂ Werte sanken. Eine Erklärung für dieses Verhalten konnte noch nicht gefunden werden. In der gesamten Versuchszeit wurden die Sequenzen der Gasmessung und Lüftung beibehalten, so dass die Unterschiede nicht aus dieser Ursache herrühren können.

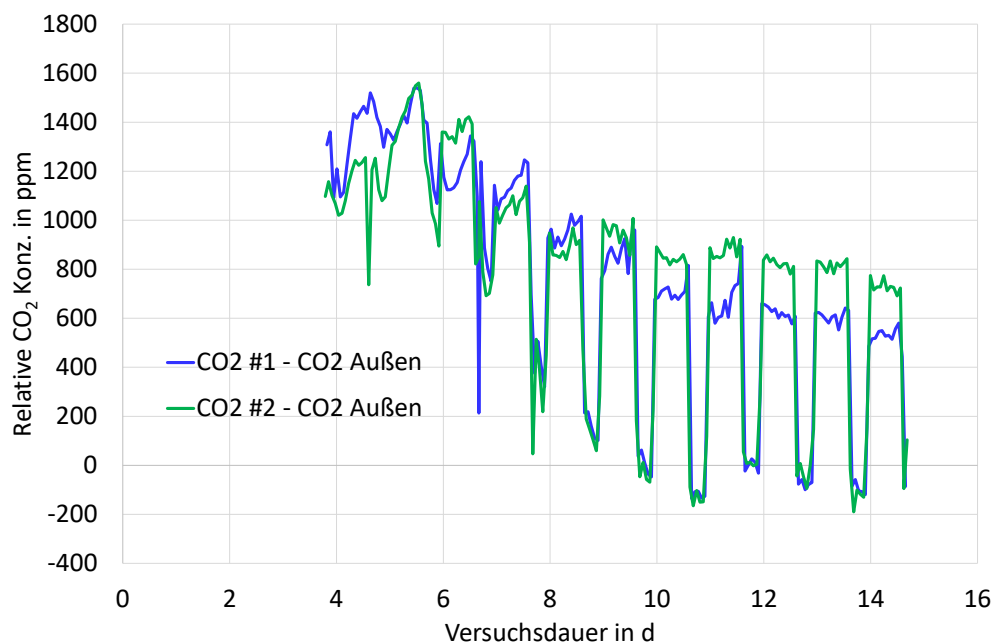


Abb. 58: V7 Relative CO₂ Konzentrationen („#1“ System 1; „#2“ = System 2).

Die CO₂ Emissionen zeigten einen ähnlichen Verlauf wie bei den übrigen Versuchen (s. Abb. 58): Das Maximum der CO₂ Konzentrationen mit 1540 ppm (System 1) bzw. 1560 ppm (System 2) wurde am 5. d erreicht, danach fielen die Konzentrationen und ab dem 9. d war die Bilanz der CO₂-Produktion bei Belichtung negativ, d.h. die CO₂ Konzentrationen in den Pflanzenbehältern waren niedriger als in der Außenluft.

4.2.7.5 Nitrat, Phosphat, Kalium und CSB

Die Nitratkonzentrationen im Nährmedium sanken nicht so schnell ab, wie bei den anderen Versuchen, was sich mit der Dosierung von HNO₃ erklären lässt (s. Abb. 59). Man erkennt auch, dass die Konzentration von NO₃⁻-N bei System 1 am Ende des Versuchs mit 412 mg/L um 42 mg/L höher war, als in System 2 mit 370 mg/L. Dies passt zu der höheren zudosierten HNO₃ Menge, die einer Differenz der Konzentrationen von 53 mg/L NO₃⁻-N entspricht.

Die Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Gehalte in der Pflanze waren sehr ähnlich wie in Versuch 3 und unterschieden sich nur geringfügig bei den unterschiedlichen pH-Werten. Auch hier waren nur geringe Unterschiede zwischen den Konzentrationen nach 7 d und nach 14 d.

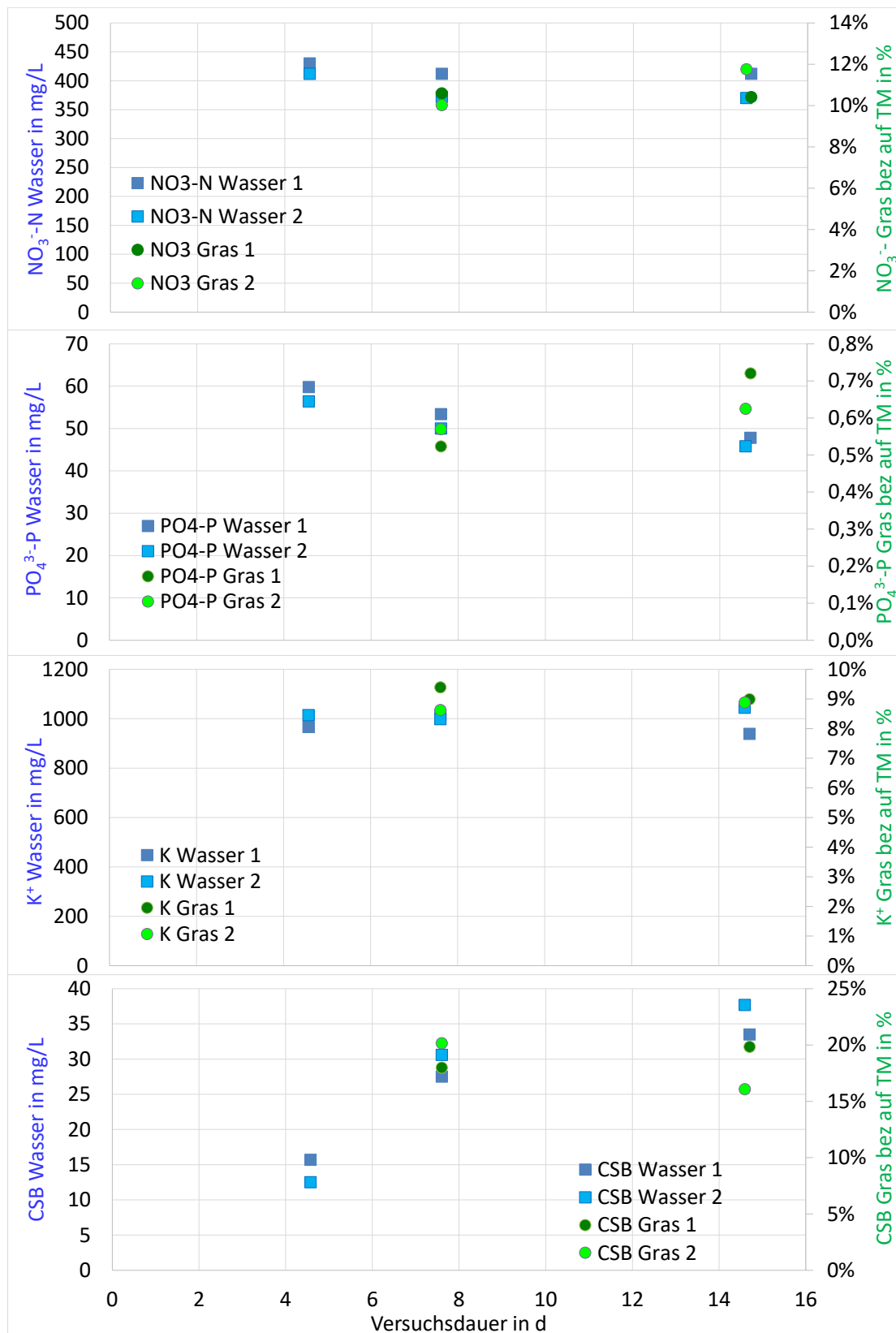


Abb. 59: V3 Nitrat-, Phosphat-, Kalium- und CSB-Konzentrationen im Wasser und in der Pflanze bez. auf die Trockenmasse (System 1 und System 2)

4.3 Vergleich der Ergebnisse V1-V7

Zum Vergleich der unterschiedlichen Versuche wurden die Analysen-Ergebnisse der Probenahmen von 5. d (1 d nach Start), 8. d und 15. d in Balkendiagrammen zusammengefasst.

4.3.1 $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Nährstofflösung und im Gerstengras

Die Konzentrationen von Nitrat im Wasser entsprachen zu Beginn der Versuche (Start / Tag 5) den eingestellten, erwarteten Werten und nahmen mit fortschreitendem Wachstum des Gerstengrases ab (s. Abb. 60), da die Pflanzen den Stickstoff für ihr Wachstum verbrauchten. Dies war bei allen Versuchen zu beobachten. Ein ähnliches Verhalten zeigten auch die untersuchten Parameter $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, K^+ , während der CSB im Verlauf der Versuche meist etwas anstieg.

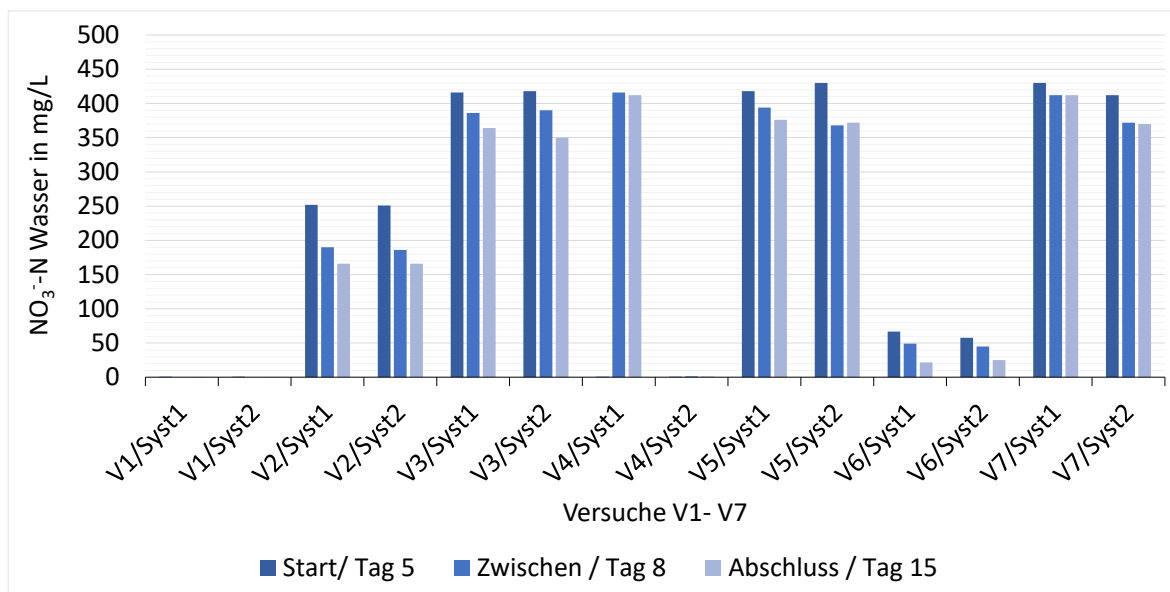


Abb. 60: $\text{NO}_3\text{-N}$ im Wasser

In den meisten Versuchen unterschieden sich die Nitratgehalte im Gerstengras bei Zwischen- (7. d) und Abschlussernte (14. d) nur geringfügig (s. Abb. 61).

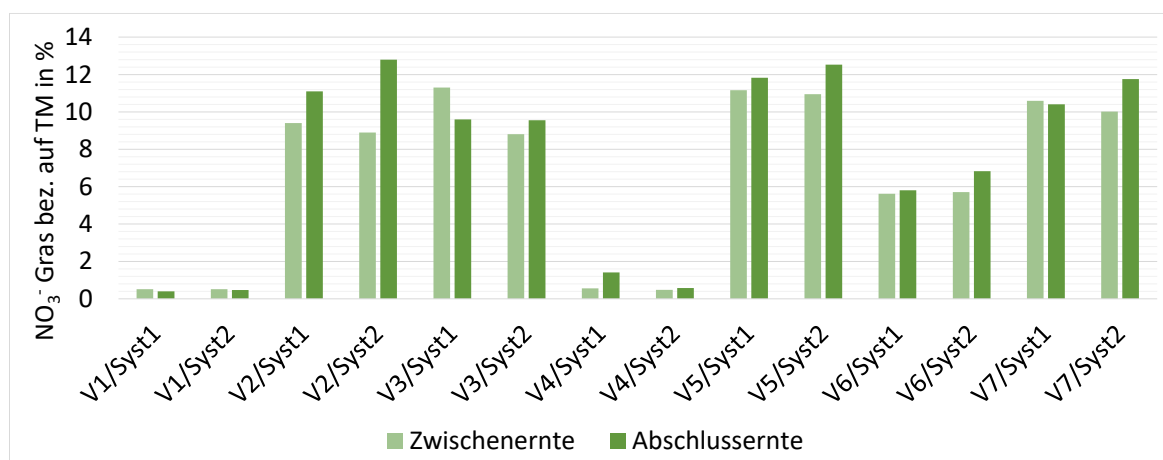


Abb. 61: NO_3 im Gras in % bezogen auf die Trockenmasse

Dagegen spielt die Zusammensetzung der Nährlösung offenbar eine wichtige Rolle. Nur bei Versuch 4 (mit Blumenerde) waren in beiden Anlagen nur geringe Mengen Nitrat in den Pflanzen vorhanden, obwohl in Anlage 1 gleich hohe Konzentrationen im Wasser wie z.B. bei Versuch 3 zur Verfügung gestellt wurden. Bei allen anderen Versuchen kann man deutlich den Einfluss der hohen Nährstoffkonzentrationen in der Nährlösung erkennen. Bei Versuch 5 war keine Abdeckung auf den Versuchsanlagen, damit auf den Blättern der Pflanzen mehr Wasser verdunsteten und damit auch mehr Nitrat angereichert werden konnte. Tatsächlich waren die Nitratgehalte im Vergleich zu Versuch 3 und 7, mit ähnlichen Bedingungen, etwas erhöht.

Die Daten der Abschlussernten nach 14 d wurden als Funktion der Konzentrationen in der Nährlösung beim Start der jeweiligen Versuche aufgetragen. Bei den Parametern Nitrat und Kalium kann man eine deutliche Abhängigkeit erkennen (s. Abb. 62). Allerdings scheint die Erhöhung der Nitratkonzentration in der Nährlösung von 250 mg/L auf 422 mg/L NO_3^- -N, sowie der Kalium Konzentration von 784 mg/L auf 1267 mg/L keine weitere Erhöhung der jeweiligen Konzentrationen in der Pflanze mehr zu bewirken.

Der pH-Wert Unterschied in V7 verursachte keine gravierende Auswirkung auf die Nitrataufnahme.

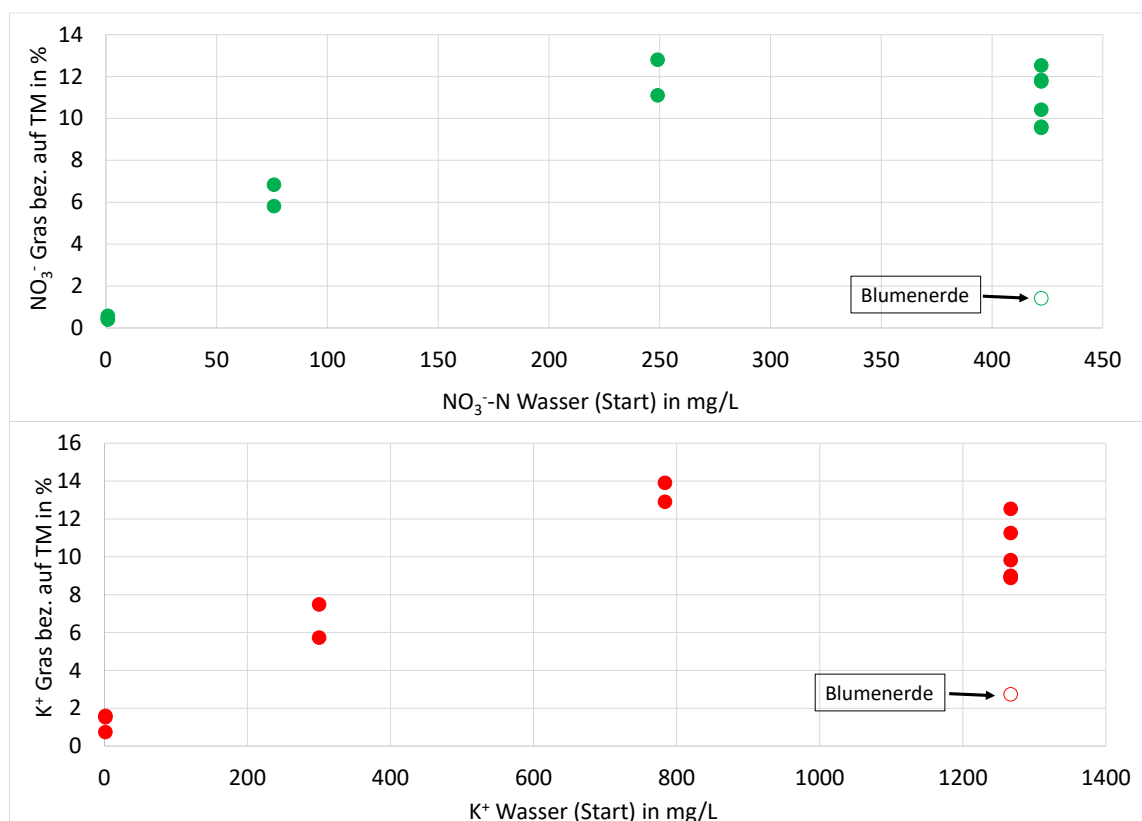


Abb. 62: Zusammensetzung der Pflanzen aus der Abschlussernte (nach 14 d) bei Nitrat (oben) und Kalium (unten) als Funktion der Konzentrationen in der Nährlösung bei Start der Versuche. Angaben für NO_3^- bzw. Kalium im Gras jeweils als % bezogen auf Trockenmasse.

Ausgehend von der Tatsache, dass bei diesen Versuchen Nitrat hauptsächlich als KNO_3 in die Nährlösung eingebracht wurde, ist es interessant, ob sich das Verhältnis von Kalium und

Nitrat in der Pflanze änderte. Dazu wurde jeweils die (Massen-)Relation von Kalium und Nitrat einerseits in der Nährlösung („Wasser“) und in der Pflanze mit der Relation dieser Ionen im Salz KNO_3 gegenübergestellt, s. Abb. 63.

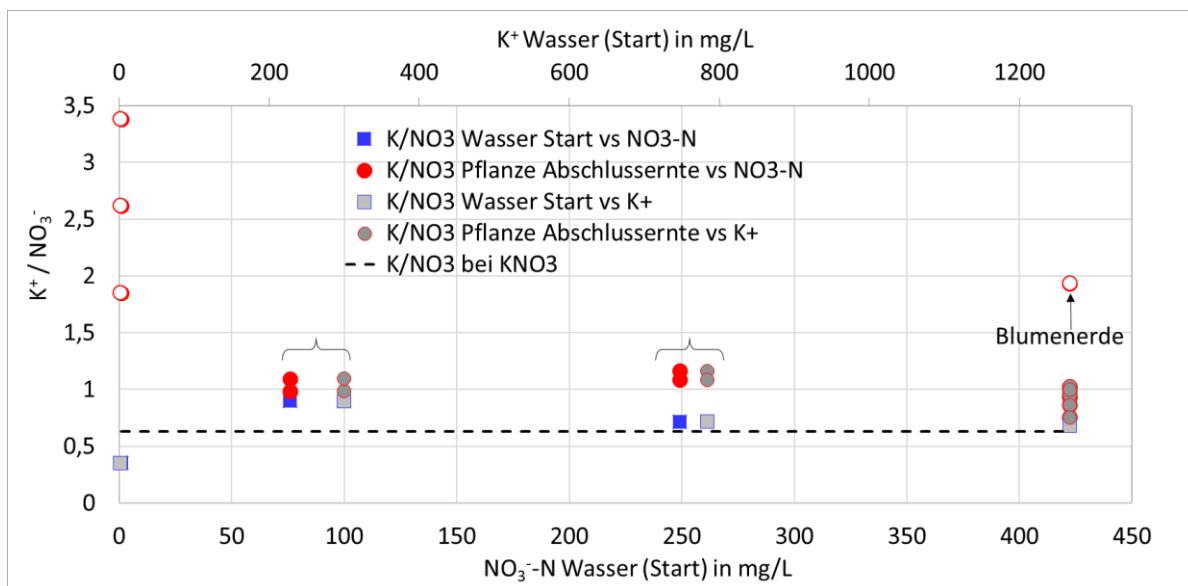


Abb. 63: Verhältnis der K^+ und NO_3^- -Ionen in der Nährlösung („Wasser“) bei Start der Versuche und der Pflanze bei der Abschlussernte. Bei den mit $\{ \}$ gekennzeichneten Punkten handelt es sich um identische Proben, die auf die Kalium- bzw. die Nitratkonzentration bezogen werden (obere bzw. untere X-Achse).

Daraus lässt sich erkennen, dass - außer bei V1 (ohne Nitrat und Dünger) und V4 (Blumenerde) - die Relation Kalium / Nitrat

- in den Pflanzen immer ähnlich hoch war (ca. 0,9 g/g bis 1,1 g/g),
- immer etwas höher war, als in der Nährlösung,
- und deutlich höher war, als im Salz KNO_3 (0,63 g/g).

Eventuell könnte man mit zusätzlichen Kaliumsalzen die Nitrataufnahme erhöhen. Auch der verwendete Dünger (Yara Tera Kristalon) enthält zusätzliche Kaliumsalze (vermutlich u.a. als K_2HPO_4 und KH_2PO_4). Ob man mit einem höheren Kalium / Nitrat Verhältnis auch die Nitrataufnahme begünstigen kann, wurde nicht getestet, könnte jedoch in Zukunft ein interessanter Punkt werden. Andererseits waren am Ende der Versuche immer noch hohe Konzentrationen an Kalium und Nitrat in den Nährstofflösungen vorhanden.

4.3.2 Ammonium, Phosphat und Magnesium in der Nährstofflösung und im Gerstengras

Bei den Parametern Ammonium, Phosphat und Magnesium lassen sich diese Zusammenhänge nicht so deutlich erkennen, da hier jeweils nur zwei unterschiedliche Startkonzentrationen vorhanden waren (s. Abb. 64). Aber auch hier wird deutlich, dass niedrige Startkonzentrationen auch niedrige Konzentrationen im Gras zur Folge haben.

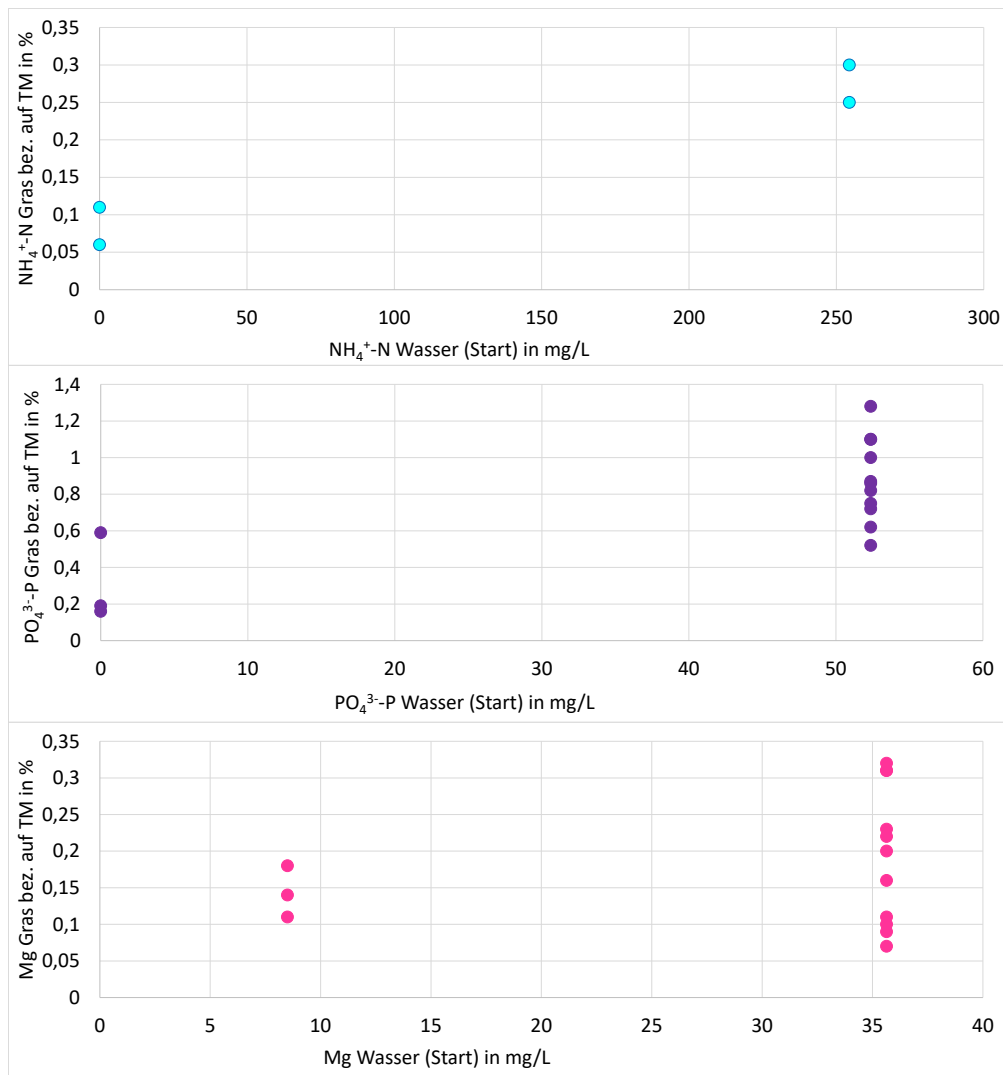


Abb. 64: Zusammensetzung der Pflanzen in der Abschlussernte (nach 14 d) bei Ammonium (oben), Phosphat (Mitte) und Magnesium (unten) als Funktion der Konzentrationen in der Nährlösung bei Start der Versuche. Angaben für Gras jeweils als % bezogen auf Trockenmasse.

Mit Ausnahme von Versuch 1 stiegen die Phosphatmengen in der Pflanze mit zunehmendem Alter der Pflanzen an, wie Abb. 65 zeigt.

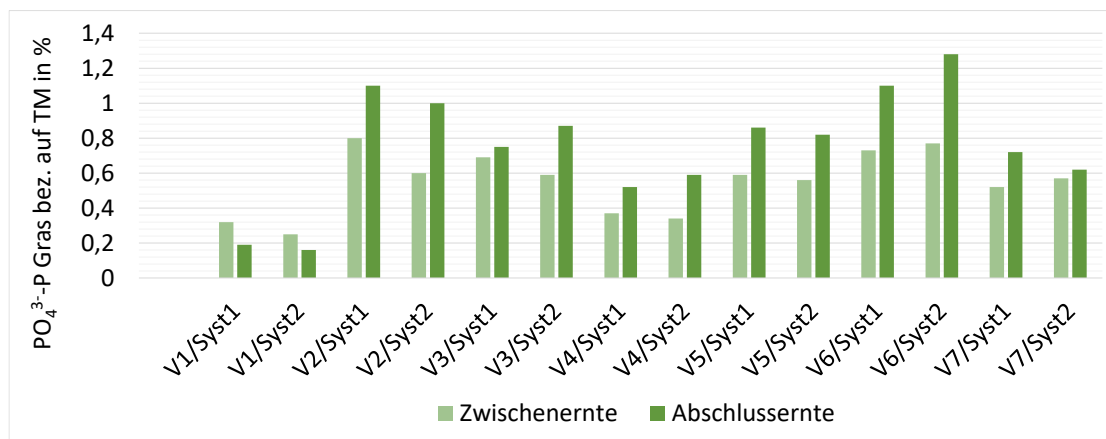


Abb. 65: PO₄³⁻-P im Gras in % der Trockenmasse

4.3.3 Gehalte an Hauptnährstoffen, kumuliert

In Abb. 66 werden die gemessenen, löslichen Haupt-Bestandteile der Gerstengras-Pflanzen bezogen auf die gesamte Trockenmasse der Pflanzen kumuliert betrachtet. Dabei wurden hier die Konzentrationen von Phosphat- als PO₄³⁻ und von CSB als Glucose-Equivalente berechnet. Die Summe dieser Bestandteile berechnet sich zu ca. 28 % bis 48 %.

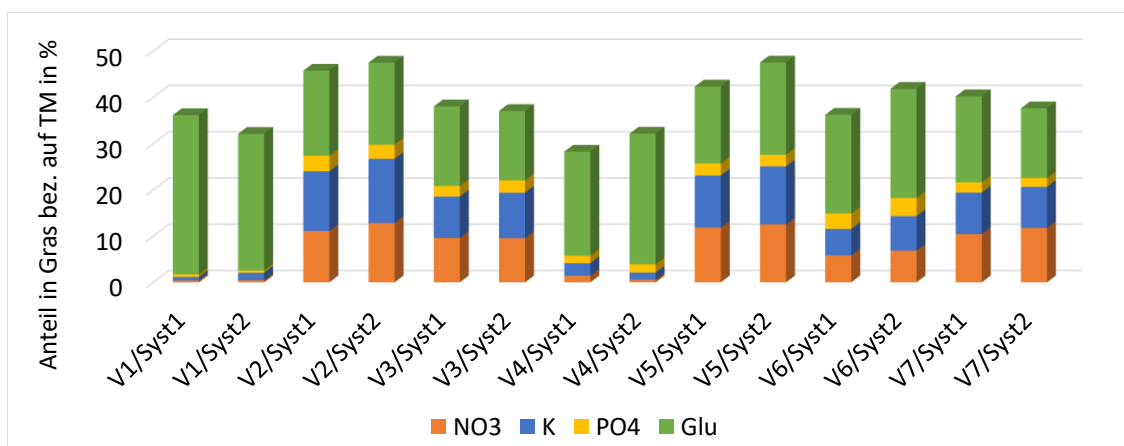


Abb. 66: Lösliche Bestandteile der Pflanzen bezogen auf die (gesamte) Pflanzen-Trockenmasse

Der Rest der Trockenmasse besteht vermutlich hauptsächlich aus unlöslichen Kohlehydraten (z.B. Stärke), Cellulose, Proteinen und Fetten. Es könnten jedoch auch weitere lösliche Bestandteile in der Pflanze vorhanden gewesen sein, die durch das heiße Wasser nicht aus den Zellen herausgelöst werden konnten.

4.3.4 Erntemengen

Bei Probenahmen und der Ernte am Ende des Versuchs wurden jeweils die Massen der Bestandteile, wie Korn, Wurzel, Stängel und Blatt, teilweise auch Kombinationen bestimmt, so dass eine Abschätzung der Erntemengen und Verteilung zwischen den Pflanzenbestandteilen möglich ist (s. Abb. 67).

Bei Versuch 1 wurde nicht - wie bei den anderen Versuchen - die Pflanzenmasse ausgewogen, daher sind dazu auch keine Ergebnisse in Abb. 67 gezeigt. Im Versuch 2 wurde die meiste Pflanzenmasse produziert, jedoch konnte keine Unterteilung der einzelnen Bestandteile vorgenommen werden, da hier noch eine Nachernte (nach dem Abschneiden der Halme) stattgefunden hat. Bei dieser Nachernte wurden nach 72 h noch 36 g bzw. 29 g Nachaufwuchs in System 1 bzw. System 2 gemessen. Diese sind im Diagramm nicht berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Bei Versuch V4 war es nicht möglich die Erntemenge so zu erfassen wie bei den anderen Versuchen, da eine Ablösung des Pflanzsubstrates (Blumenerde) von den Wurzeln nicht möglich war. Es wurde deshalb die (Start-)Masse der Blumenerde von 200 g von der Pflanzengesamtmasse abgezogen.

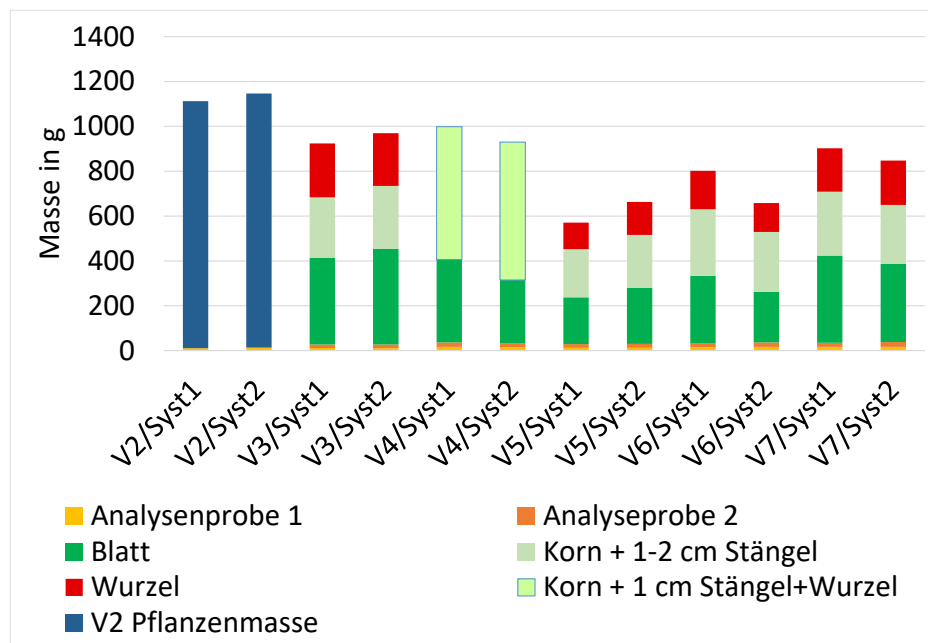


Abb. 67: Erntemengen und Aufteilung auf die Bestandteile Blatt, Stängel und Wurzel (alles bezogen auf Feuchtmasse)

4.3.5 Wasser-Verbrauch

Nach dem Abschluss der Versuche wurden die Volumina der Nährlösungen ermittelt, die noch im Wasser- und Pflanzenbehälter waren, allerdings erst ab Versuch 3. Dabei wurde festgestellt, dass am Ende nur wenig Wasser im Vergleich zur eingesetzten Menge fehlte (s. Abb. 68).

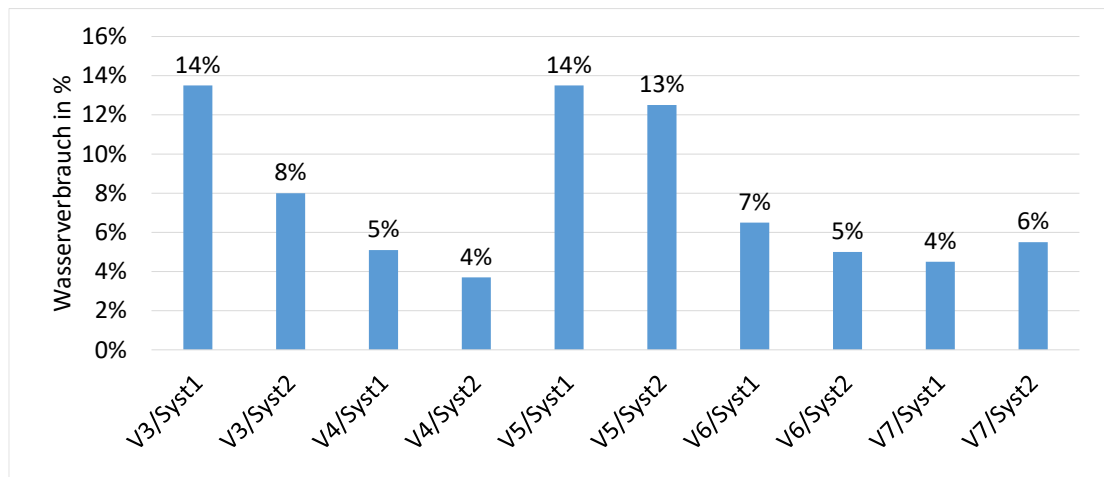


Abb. 68: Wasserverbrauch in % der eingesetzten Menge

Ein Teil dieses Wassers ist am Ende in der Pflanzenmasse gespeichert, eine weitere Teilmenge ist durch Verdunstung aus dem System verschwunden. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch Teile der Nährstofflösungen bei Kalibrier- und Reinigungsmaßnahmen entwichen sind (z.B. V3/Syst1).

Daraus ist zu erkennen das ein geschlossenes Hydroponik-System die eingesetzten Ressourcen sehr effektiv nutzt. Bei Versuch 5 sind deutlich höhere Verluste zu erkennen, da bei diesem Versuch keine Abdeckungen benutzt wurden und das verdunstende Wasser das System verlassen konnte.

4.3.6 Höhenwachstum Gerstengras

Während der Versuche wurden auch die Längen der Gerstengras Pflanzen über der Gerstenkörnerschicht gemessen und jeweils ein Bereich abgeschätzt (s. Abb. 69). Die höchsten Wachstumsraten waren zwischen Tag 5 und 10 zu beobachten. Hier wurden Tageszuwächse von 4 cm bis 5 cm festgestellt. Ab dem 11. d flachte das Höhenwachstum ab, was vermutlich auch an der begrenzten Höhe im Pflanzenbehälter liegt.

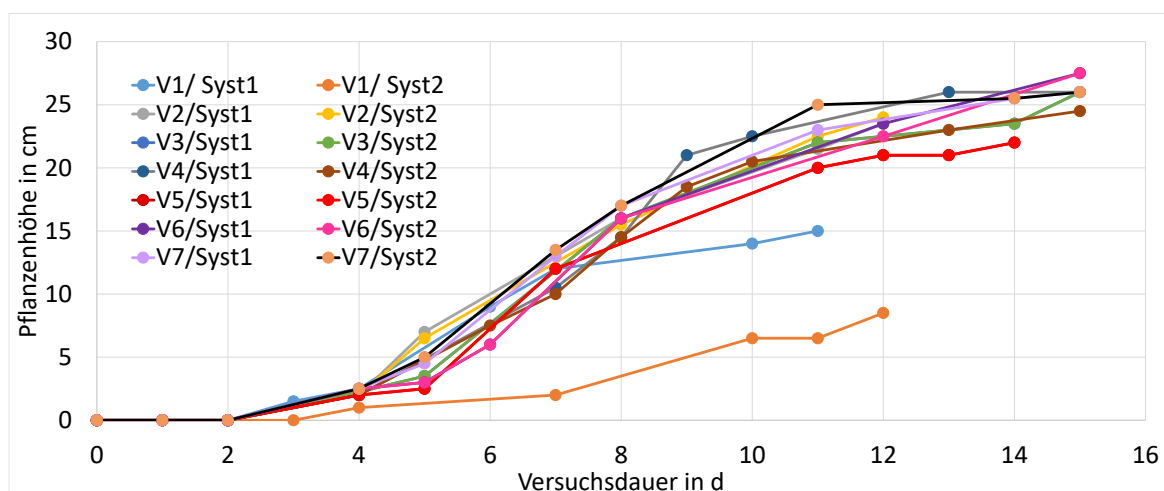


Abb. 69: Höhenwachstum Gerstengras

4.3.7 Emissionen von N_2O und CO_2 im Gasraum der Pflanzenbehälter

Um die Emissionen von Lachgas und CO_2 im Gasraum der Pflanzenbehälter vergleichen zu können, wurden gestutzte Mittelwerte (20 % Elimination) aller gemessener relativen Konzentrationen im Gasraum berechnet (s. Abb. 70 und Abb. 71). Außer bei den Versuchen 6 und 7, waren nur sehr niedrige Lachgas Emissionen zu beobachten. Bei Versuch 5 waren die Messungen nicht relevant, da der Deckel der Pflanzenbehälter fehlte. Daher sind hier auch keine Werte eingetragen. Die Werte in Versuch 7 sind eventuell nicht gut vergleichbar, da sie mit einem niedrigeren Messbereich des Messgerätes aufgenommen wurden.

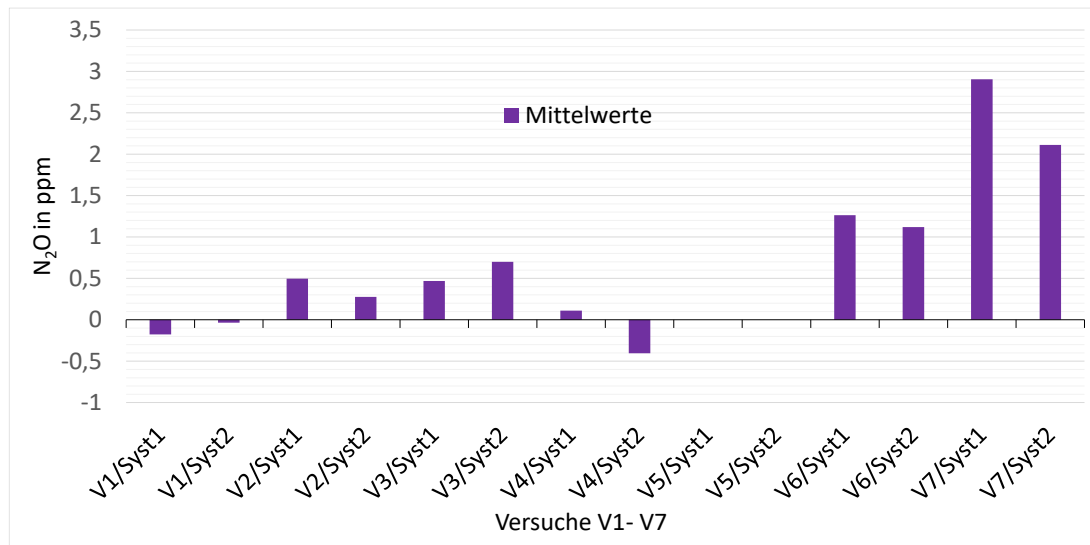


Abb. 70: N_2O im Gasraum

Die CO_2 Konzentrationen im Gasraum der Pflanzenbehälter zeigten sehr unterschiedliche Konzentrationen je nach Alter und Beleuchtung der Pflanze. Daher kann ein solcher Mittelwert die Bedingungen nur unzureichend abbilden.

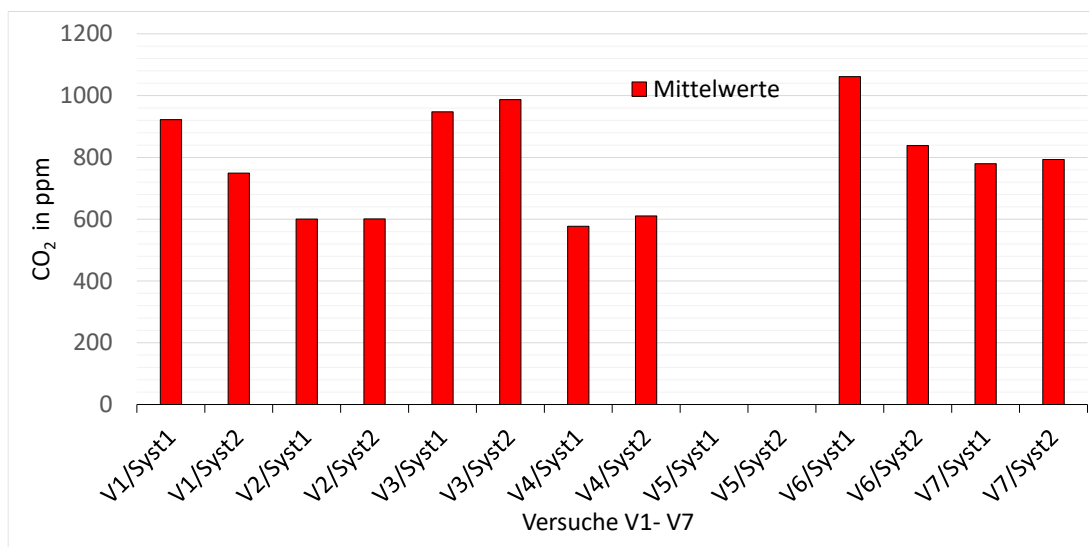


Abb. 71: CO_2 im Gasraum

5 Literaturverzeichnis

Akiyama, Hiroko; McTaggart, Iain P.; Ball, Bruce C.; Scott, Albert (2004): N₂O, NO, and NH₃ Emissions from Soil after the Application of Organic Fertilizers, Urea and Water. In: *Water, Air, Soil Pollut.* 156 (1-4), S. 113–129. DOI: 10.1023/B:WATE.0000036800.20599.46.

Al Ajmi, Asadullah; Salih, Ahmed Ali; Kadim, Isam; Othman, Yahia (2009): Yield and water use efficiency of barley fodder produced under hydroponic system in GCC countries using tertiary treated sewage effluents. In: *Journal of phytology* 1 (5), S. 342–348. Online verfügbar unter www.journal-phytology.com.

Bateman, E. J.; Baggs, E. M. (2005): Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. In: *Biology and Fertility of Soils* 41 (6), S. 379–388.

Bodenseewasserversorgung (2021): Trinkwasseranalyse 2020. Qualitätsdaten des Trinkwassers aus dem Bodensee – Jahresmittelwerte 2020. Hg. v. Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung. Online verfügbar unter www.bodensee-wasserversorgung.de, zuletzt geprüft am 14.10.2021.

Boley & Boley (1999 – 2021): Multimesh. Eigenentwicklung in Visual Basic 6. Version 2.6.2.

Bundesinstitut für Risikoforschung (2005): Rucola kann sehr viel Nitrat enthalten. BfR rät zu maßvollem Verzehr. Pressemittd. 02.02.2005. BfR. Online verfügbar unter https://www.bfr.bund.de/de/presseinformation/2005/05/rucola_kann_sehr_viel_nitrat_enthalten-5982.html?list_documents_sort_by=date&list_documents_order_by=asc, zuletzt geprüft am 21.10.2020.

Harris, E.; Diaz-Pines, E.; Stoll, E.; Schloter, M.; Schulz, S.; Duffner, C. et al. (2021): Denitrifying pathways dominate nitrous oxide emissions from managed grassland during drought and rewetting. In: *Science advances* 7 (6). DOI: 10.1126/sciadv.abb7118.

Jahangir, Mohammad Mofizur Rahman; Roobroeck, Dries; van Cleemput, Oswald; Boeckx, Pascal (2011): Spatial variability and biophysicochemical controls on N₂O emissions from differently tilled arable soils. In: *Biology and Fertility of Soils* 47 (7), S. 753–766. DOI: 10.1007/s00374-011-0580-2.

Jockel-Schneider, Yvonne; Gossner, Sophia K.; Petersen, Nicole; Stolzel, Peggy; Hagele, Florian; Schweiggert, Ralf Martin et al. (2016): Stimulation of the nitrate-nitrite-NO₂-metabolism by repeated lettuce juice consumption decreases gingival inflammation in periodontal recall patients: a randomized, double-blinded, placebo-controlled clinical trial. In: *Journal of clinical periodontology* 43 (7), S. 603–608. DOI: 10.1111/jcpe.12542.

Jonvik, Kristin L.; Nyakayiru, Jean; Pinckaers, Philippe J. M.; Senden, Joan M. G.; van Loon, Luc J. C.; Verdijk, Lex B. (2016): Nitrate-Rich Vegetables Increase Plasma Nitrate and Nitrite Concentrations and Lower Blood Pressure in Healthy Adults. In: *The Journal of Nutrition* 146 (5), S. 986–993. DOI: 10.3945/jn.116.229807.

KWS (2021): KWS MERIDIAN - Die ausgewogene Hohertragssorte. Hg. v. KWS. Online verfügbar unter <https://www.kws.com/de/de/produkte/getreide/gerste/sortenubersicht/kws-meridian/>, zuletzt geprüft am 06.10.2021.

Larsen, F. J.; Weitzberg, E.; Lundberg, J. O.; Ekblom, B. (2007): Effects of dietary nitrate on oxygen cost during exercise. In: *Acta physiologica (Oxford, England)* 191 (1), S. 59–66. DOI: 10.1111/j.1748-1716.2007.01713.x.

Li, Y. K.; Li, B.; Guo, W. Z.; Wu, X. P. (2015): Effects of Nitrogen Application on Soil Nitrification and Denitrification Rates and N₂O Emissions in Greenhouse. In: *J. Agr. Sci. Tech.* (17), S. 519–530.

Llorach-Massana, Pere; Muñoz, Pere; Riera, M. Rosa; Gabarrell, Xavier; Rieradevall, Joan; Montero, Juan Ignacio; Villalba, Gara (2017): N₂O emissions from protected soilless crops for more precise food and urban agriculture life cycle assessments. In: *Journal of Cleaner Production* 149, S. 1118–1126. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.191.

Löffler, A. (2018): Untersuchung der Nährstoffkonzentrationen in Gerstengras in einem hydroponischen System. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft.

Tian, Hanqin; Yang, Jia; Xu, Rongting; Lu, Chaoqun; Canadell, Josep G.; Davidson, Eric A. et al. (2019): Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty. In: *Global change biology* 25 (2), S. 640–659. DOI: 10.1111/gcb.14514.

Wongkiew, Sumeth; Popp, Brian N.; Khanal, Samir Kumar (2018): Nitrogen recovery and nitrous oxide (N₂O) emissions from aquaponic systems: Influence of plant species and dissolved oxygen. In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 134, S. 117–126. DOI: 10.1016/j.ibiod.2018.08.008.