



Lehr- und Forschungszentrum
Landwirtschaft
www.raumberg-gumpenstein.at



Abschlussbericht Lysi-T-FACE

Wissenschaftliche Tätigkeit Nr. 100719

**Umsetzung und Weiterentwicklung eines
technischen Versuchskonzeptes zur
Quantifizierung des Einflusses der Erderwärmung
auf Grünland**

**Implementation and advancement of a technical
experimental concept to quantify global warming
impact on grassland**

Projektleitung:

Dr. Markus Herndl, LFZ Raumberg-Gumpenstein

Projektmitarbeiter:

Univ. Doz. Dr. E.M. Pötsch, LFZ Raumberg-Gumpenstein

Projektpartner:

DI Georg von Unold, UMS GmbH

Projektlaufzeit:

2011 – 2013



lebensministerium.at

www.raumberg-gumpenstein.at

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	4
Einleitung.....	5
Material und Methoden	6
VERSUCHSKONZEPT ZUR SIMULATION VON FAKTOREN DER ERDERWÄRMUNG IM GRÜNLAND	6
<i>Infrarot-Heizungssystem.....</i>	<i>7</i>
<i>Mini-FACE-System.....</i>	<i>8</i>
<i>Lysimeter-System.....</i>	<i>9</i>
<i>Feldversuch</i>	<i>10</i>
Ergebnisse	12
UMSETZUNG DES VERSUCHSKONZEPTES IM FELDVERSUCH.....	12
<i>Infrarot-Heizungssystem.....</i>	<i>12</i>
<i>Mini-FACE-System.....</i>	<i>20</i>
<i>Lysimeter-System.....</i>	<i>25</i>
ERWEITERUNG DES VERSUCHSKONZEPTES IM JAHR 2013.....	27
<i>Regenüberdachungen</i>	<i>27</i>
<i>Adaption Feldversuch.....</i>	<i>28</i>
Schlussfolgerungen.....	30
Literatur.....	31

Zusammenfassung

Klimaschutz und Klimawandelanpassung sind heutzutage nicht mehr nur Schlagworte, sondern beeinflussen neben der nationalen auch die internationale Politik und Wirtschaft. In Österreich gibt es zahlreiche Forschungsvorhaben und Programme die auf eine nationale Klimaanpassungsstrategie hin zielen. In der Landwirtschaft und hier vor allem in der Grünlandwirtschaft zeigte das Jahr 2003 (mit dessen Trockenheit), wie sensitiv dieses System auf Temperaturanstieg bzw. Niederschlagsänderung reagiert. Um die weiteren Auswirkungen von Erderwärmung auf Grünland heute schon möglichst real abschätzen zu können, sind Versuchskonzepte erforderlich, die eine Simulation der zentralen Faktoren der Erderwärmung ermöglichen. Am LFZ Raumberg-Gumpenstein wurde im Jahr 2010 ein technisches Versuchskonzept (Lysi-T-FACE) erstellt, das eine Erwärmung mittels Infrarot-Heizungssystem, eine Erhöhung der CO₂-Konzentration der Luft mittels Mini-FACE-System und zugleich die Messung der Auswirkungen dieser beiden Faktoren im Boden mittels eines Lysimeter-Systems ermöglicht. Dazu wurde in einem Feldversuch ein Versuchsaufbau installiert, der zwei gesteigerte Temperatur- bzw. zwei CO₂-Konzentrationsszenarien unter Freilandbedingungen auf 24 Wirtschaftsgrünlandparzellen bietet. Eine Wiederholung der Faktorkombinationen wird dabei auch mittels Monolithlysimeter untersucht, um spezifische Informationen über Wasser- und Nährstoffkreisläufe unter den zu erwarteten künftigen Klimabedingungen zu bekommen. Im Zuge der Umsetzung des Versuchskonzeptes hat sich die Möglichkeit ergeben, zusätzlich den Faktor Trockenheit in das Konzept einzuarbeiten. Dazu wurden Regenüberdachungen installiert, die für eine ausgewählte Faktorkombination zeitlich begrenzte Trockenheit auf zusätzlich acht Parzellen simulieren kann. Das daraus resultierende umfassende technische Versuchskonzept, soll eine detaillierte Bewertung der Folgen der Erderwärmung erlauben und zukünftig interdisziplinäre Projekte im Bereich Klimafolgenforschung ermöglichen. Schlussendlich sollen die erzielten Resultate dazu dienen, konkrete Anpassungsstrategien für die Grünlandbewirtschaftung unter zukünftigen Klimabedingungen zu entwickeln.

Summary

Climate protection and accordingly the adjustment to global warming are today no longer only key words, but affect beside national also international policy and economy. In Austria numerous research projects and programs focus on a national climatic adjustment strategy. In agriculture and particularly in grassland management the year 2003 (with its dryness) showed, how sensitive this system reacts to temperature rise and accordingly to change of precipitation. In order to be able to measure further effects of global warming on grassland, an experimental concept is necessary that makes simulation of factors for global warming possible. At AREC Raumberg-Gumpenstein in 2010 a technical experimental concept (Lysi-T-FACE) was developed, that enables i) heating up by means of an infrared heating system ii) enhancing the CO₂ content of the air by means of a Mini-FACE system and iii) measuring the effects of the two factors in the soil by means of lysimeters. For that purpose, an experimental setup was established in a field experiment, which provides two increased temperature and accordingly two CO₂ concentration scenarios under open-field conditions at 24 grassland plots. One replication of the factor combination thereby will be examined on six lysimeters to get information about water and nutrient fluxes under expected future conditions. In the course of the realization of the experimental concept, a way was found to incorporate the factor drought in the concept. For this purpose, rainout shelters were installed that can simulate dryness on further eight field plots during a limited time of period for a specific factor combination. The resulting comprehensive technical experimental concept permits a detailed evaluation of consequences to global warming and will allow future interdisciplinary projects within the range of climatic consequences research. Finally, the obtained results should help to develop adjustment strategies for grassland management under future climatic conditions.

Einleitung

Die Landwirtschaft als klimasensitiver Wirtschaftszweig, hat sich seit jeher an klimatische Bedingungen und den Verlauf der Witterung anpassen müssen. Verändert sich das Klima, so ändern sich auch die Standortbedingungen und damit die Wachstums- und Entwicklungsbedingungen für Pflanzengesellschaften und Kulturarten. Je nach Art und Weise der klimatischen Veränderungen können sich die Bedingungen verbessern oder verschlechtern und damit Ertragshöhe, -stabilität und Qualität der Pflanzen beeinflussen. Bereits heute sind Wirkungen jüngster Klimaänderungen auf einzelne Kulturarten zu erkennen. In Österreich hat vor allem das Jahr 2003 gezeigt, dass Grünland sehr sensitiv auf Temperatur- und Niederschlagsänderungen reagiert, was in einigen Gebieten zu schweren Schäden und zeitweiligem Futtermangel führte, in anderen Regionen hingegen Höchstertträge zur Folge hatte.

Wissenschaftlich werden die Auswirkungen von Temperatur- und CO₂-Anstieg auf Boden und vor allem auf Pflanzen schon seit den 60er Jahren untersucht. Diese Experimente wurden meist unter künstlichen Bedingungen in Klimakammern und Gewächshäusern betrieben was einige Nachteile wie veränderte Luftzirkulation, Beschattung etc. mit sich bringt (z.B. KIMBALL et al. 1997). Um den CO₂-Effekt unter Freilandbedingungen testen zu können, haben sich in den letzten Jahren zwei Methoden durchgesetzt: „Open-top chambers“ (OTC) und „Free-Air Carbon Dioxide Enrichment“ (FACE) wobei FACE in nahezu allen Kulturarten über den Globus hinweg eingesetzt wurde und wird (<http://public.ornl.gov/face>). Um den Einfluss von Temperaturerhöhung im Feld simulieren zu können, gibt es auch einige Ansätze wie z.B. Bodenerwärmung mit Heizschlangen oder Erwärmung über Abdeckung (BEIER et al. 2004, INESON et al. 1998). Der erfolgversprechendste Ansatz um Faktoren der Erderwärmung in Feldversuchen simulieren zu können, ist die Erwärmung der Vegetation mit Infrarotheizung in Kombination mit einer FACE-Begasungsanlage – T-FACE (PARTON et al. 2007).

Zur Beschreibung und Untersuchung von Wasser- bzw. Nährstoffkreisläufen im Boden haben sich Lysimeter als geeignete Messtechnik erwiesen. Im Projekt „TERENO“ (www.tereno.net) wird eine Lysimeter-Systemlösung zum Studium des Langzeiteinflusses des globalen Klimawandels von Ökosystemen sowie zur Analyse von Interaktionen und Reaktionen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre verwendet. Dabei werden Bodenmonolithe aus höher liegenden Standorten in tiefer liegende Standorte versetzt, um so den natürlichen Temperatur-/Niederschlagsgradienten zur Simulation der zu erwartenden Klimaänderung auszunutzen.

Unter Berücksichtigung der zahlreichen Methoden zur Simulation von Faktoren des Klimawandels bzw. zur Messung deren Auswirkungen sowie der Voraussetzungen, diese Technik im Grünland einsetzen zu können, wurde ein technisches Versuchskonzept entwickelt, das im Folgenden beschrieben und erklärt wird. Mit Hilfe dieses Konzeptes soll es möglich sein, Fragen zu Anpassungsstrategien an die Erderwärmung im Grünland unter möglichst realen Bedingungen im Feldversuch zu beantworten.

Material und Methoden

Versuchskonzept zur Simulation von Faktoren der Erderwärmung im Grünland

Im Jahr 2010 wurde am Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein, Irdning ein technisches Versuchskonzept zur Simulation von Faktoren der Erderwärmung im Grünland erarbeitet (HERNDL et al. 2010, HERNDL et al. 2011). Im Versuchskonzept Lysi-T-FACE werden drei technische Konzepte kombiniert um eine umfassende Bewertung des Einflusses der Faktoren der Erderwärmung auf Grünland unter Freilandbedingungen zu bekommen: (i) Infrarot-Heizungssystem zur Simulation von Erwärmung, (ii) mini-FACE-System zur Simulation des Anstiegs der CO₂-Konzentration der Luft und (iii) eine Lysimeter-Systemlösung, um Wasser- und Nährstoffkreisläufe unter den simulierten Bedingungen messtechnisch beschreiben zu können (Abb. 1).

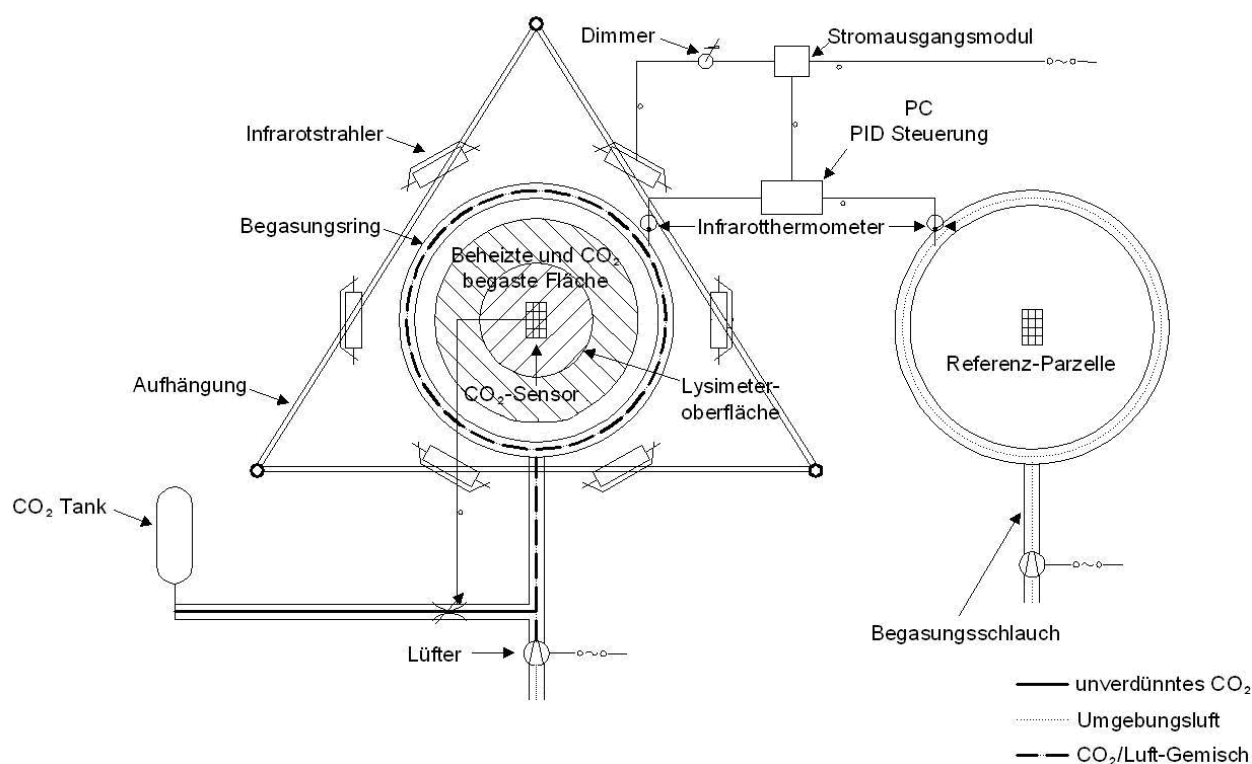


Abbildung 1. Schematische Darstellung des technischen Versuchskonzeptes Lysi-T-FACE (aus HERNDL et al. 2010).

Infrarot-Heizungssystem

Um einen Temperaturanstieg in einem Pflanzenbestand simulieren zu können, gibt es einige Ansätze. Die Erwärmung des Pflanzenbestandes mit Infrarotstrahlern, die über dem Bestand montiert sind, hat dabei einige Vorteile wie z.B. dass der Heizeffekt mittels Infrarotstrahlung annähernd gleich der solaren Strahlung verläuft oder auch die in Feldversuchen nachgewiesene Energieeffizienz (KIMBALL et al. 2008). Die hexagonale Anordnung der Infrarotstrahler in einem definierten Winkel über und seitlich des zu erwärmenden Pflanzenbestandes hat sich dabei als effizient herausgestellt. Die Befestigung auf einem höhenverstellbaren Gestell gewährleistet zusätzlich, dass die zu erwärmende Fläche wuchshöhenabhängig gleichmäßig bestrahlt werden kann (Abb. 2). Im Versuchskonzept Lysi-T-FACE soll neben der Auswirkung der Erwärmung auf den Pflanzenbestand auch der Einfluss der Erwärmung auf die Verlängerung der Vegetationsdauer ermittelt werden. Dazu muss das Infrarot-Heizungssystem das ganze Jahr in Betrieb sein und daher die Strahler auch dementsprechend witterungsunempfindlich ausgeführt sein.

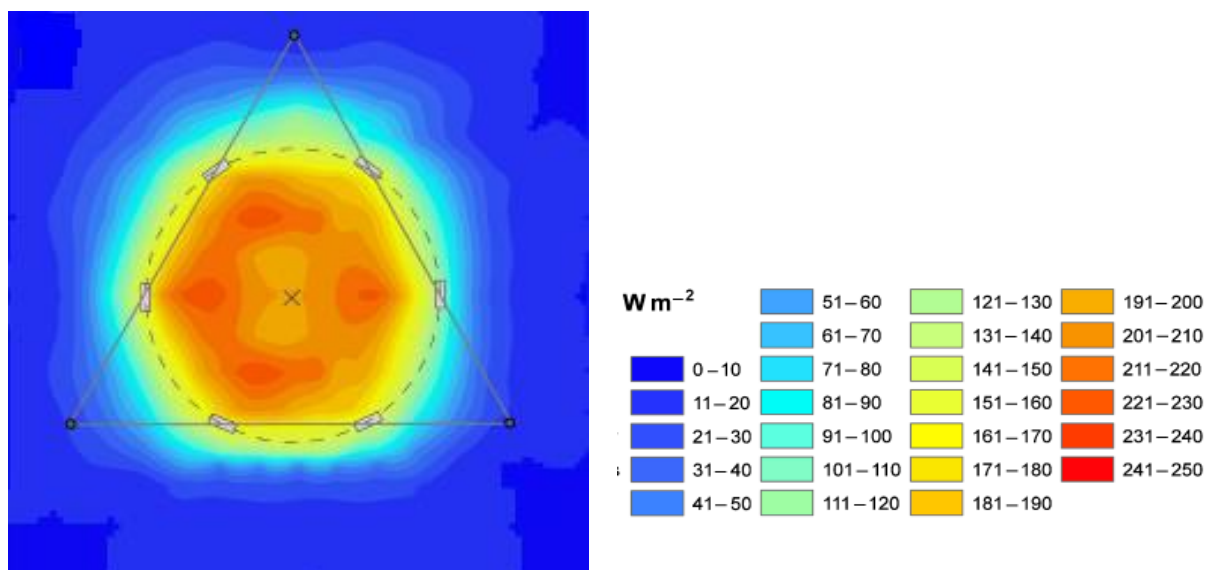


Abbildung 2. Gemessene Verteilung der thermischen Strahlung über dem Pflanzenbestand der Infrarotstrahleranordnung (aus KIMBALL et. al. 2008).

Mini-FACE-System

Um Pflanzen mit gesteigerter CO₂-Konzentration der Luft unter Freilandbedingungen zu begasen, haben sich in den letzten 20 Jahren FACE-Anlagen bewährt. Um den CO₂-Verbrauch bzw. den Flächenbedarf relativ gering zu halten, wird auf so genannte Mini-FACE-Systeme, die relativ geringe Flächen (von wenigen Quadratmetern) begasen, zurückgegriffen. Das mini-FACE-System, das im technischen Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ verwendet wird, ähnelt dem seit 1998 im Helmholtzzentrum München auf Grünland erfolgreich betriebenen Konzept (WINKLER und HERBST 2003). Dieses besitzt Belüftungsringe, die jeweils eine Fläche von 2 m² umfassen und aus einem perforierten Kunststoffrohr bestehen. In den unbegasten Varianten wird durch einen Ring nur Umgebungsluft geblasen, in der begasten Variante wird die betreffende Fläche einer erhöhten CO₂-Konzentration ausgesetzt, indem die Luft unmittelbar vor dem Einströmen in den Ring mit CO₂ angereichert wird. Die Regelung der CO₂-Zudosierung erfolgt auf Basis von Sensormessungen im Zentrum des Ringes und wird über Proportionalventile von der Steuerungssoftware LabView (National Instruments) gesteuert (Abb. 3).



Abbildung 3. Begasungsringe der Mini-Face-Anlage des Helmholtzzentrums München.

Lysimeter-System

Um Wasser- und Stoffflüsse im System Atmosphäre-Pflanze-Boden untersuchen zu können, gelten Lysimeter bzw. Lysimeter-Systemlösungen mit dementsprechender Sensorausstattung als vielfach erprobtes und gängiges technisches Hilfsmittel. Neuerungen wie aufgehängte Wägezellen, Gehäusung zur feldidentischen Temperaturdynamik sowie die Verwendung eines Saugkerzenrechnens (VON UNOLD 2008), tragen zu immer genaueren Messwerten sowie zum Einsatz für immer vernetztere wissenschaftliche Fragestellungen bei. Das Lysimeter-System, das im technischen Versuchskonzept Lysi-T-FACE etabliert ist, besteht aus sechs Bodenmonolithen (Hexagon) mit je 1 m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe und wird auch im TERENO-SOILCan-Netzwerk (www.tereno.net) verwendet. Die Sensorausstattung in einem TERENO-SoilCan-Lysimeter umfasst TDR-Trime Sonden zur Bodenfeuchtebestimmung, kombinierte Tensiometer T8-30 zur Bestimmung des Matrixpotentials, Saugkerzen sowie einen Wärmefluss- bzw. CO₂-Gassensor (PÜTZ et al. 2011). Die Sickerwassererfassung erfolgt über eine Waage. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie eines Saugkerzenrechnens an der Unterseite des Lysimeters und eines Tensiometers im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen die automatische Nachführung der unteren Randbedingung bei feldidentischen Bedingungen (VON UNOLD 2008, STEINS 2008; Abb. 4).

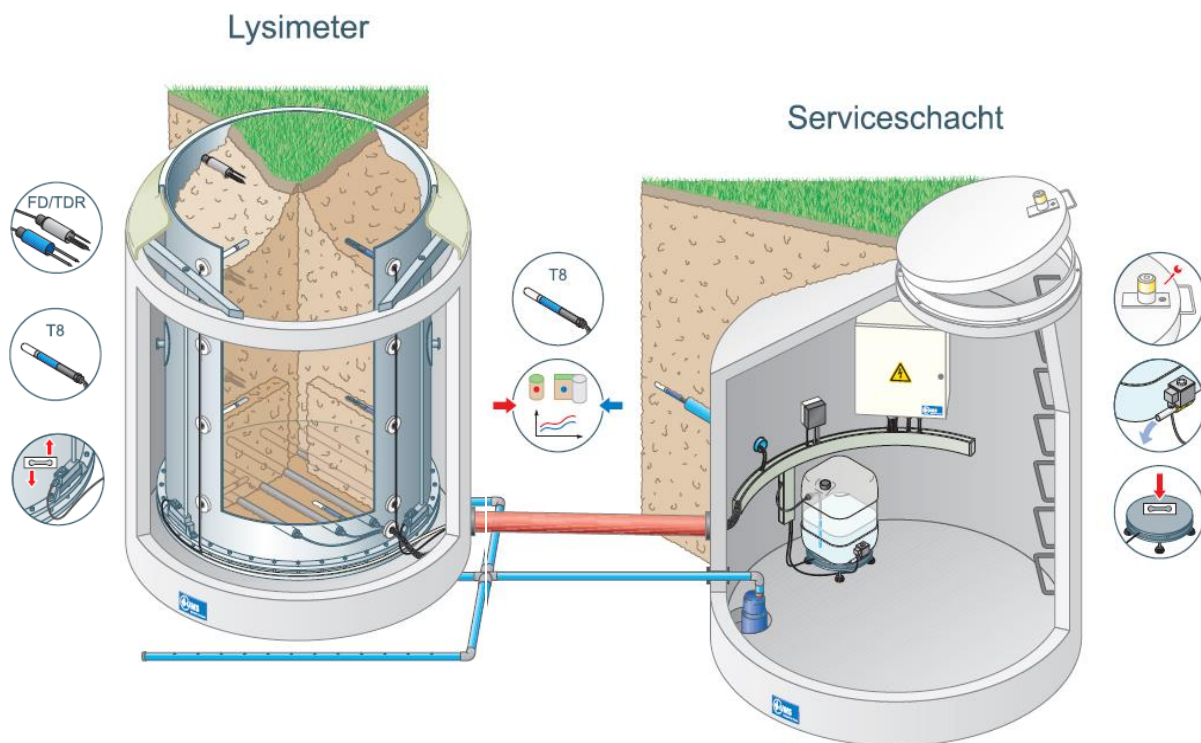


Abbildung 4. Sensorausstattung bzw. Schnitt durch den Lysimeter und den Serviceschacht im TERENO-Netzwerk.

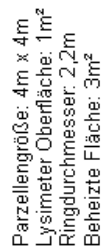
Feldversuch

Versuchsdesign

Im Feldversuch wird ein Wirtschaftsgrünlandpflanzenbestand (Dauerwiese B; Tab. 1) einer Faktorkombination von zwei erhöhten Temperaturstufen und zwei gesteigerten CO₂-Konzentrationen ausgesetzt. Im Versuchsfeld werden dabei die Hauptfaktoren in einem 3x3 Faktordesign auf 24 Grünlandparzellen aufgeteilt, wobei eine Faktorkombination auf dem Lysimeter-Hexagon vertreten ist (Abb. 5).

Tabelle 1. Arten und Sorten und dessen Anteil in der Dauerwiesenmischung B.

Art	Sorte	Anteil in der Mischung [%]
<i>Alopecurus pratensis</i>	Gufi	5,3
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Arone	18,5
<i>Dactylis glomerata</i>	Tandem	5
<i>Festuca rubra</i>	Condor	5,3
<i>Festuca pratensis</i>	Cosmolit	16
<i>Lolium perenne</i>	Guru	4,5
<i>Phleum pratense</i>	Tiller	7,1
<i>Poa pratensis</i>	Balin/Limagie	10,7/10,7
<i>Trisetum flavescens</i>	Gunther	3,6
<i>Trifolium repens</i>	SW Hebe	5,8
<i>Lotus corniculatus</i>	Oberhaunstädter	7,5



Nummer	Behandlung	Wiederholung	Beschreibung
1	erhöhter CO ₂ - Gehalt (680 µL L ⁻¹ CO ₂) x Umgebungstemperatur	a	Lysimeter
2	Umgebungsluft x Umgebungstemperatur	b	Lysimeter
3	3°C Temperaturerhöhung x Umgebungsluft	c	Feldparzelle
4	erhöhter CO ₂ - Gehalt (680 µL L ⁻¹ CO ₂) x 3°C Temperaturerhöhung	d	Feldparzelle
5	erhöhter CO ₂ - Gehalt (530 µL L ⁻¹ CO ₂) x Umgebungstemperatur	e	Feldparzelle
6	1,5°C Temperaturerhöhung x Umgebungsluft	f	Feldparzelle
7	erhöhter CO ₂ - Gehalt (530 µL L ⁻¹ CO ₂) x 1,5°C Temperaturerhöhung	g	Feldparzelle
		h	Feldparzelle
		i	Feldparzelle

Abbildung 5. Feldversuchsplan mit den unterschiedlichen Varianten des technischen Versuchskonzeptes Lysi-T-FACE.

Ergebnisse

Umsetzung des Versuchskonzeptes im Feldversuch

Das technische Versuchskonzept Lysi-T-FACE wurde im Jahr 2010 am Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein entwickelt. Im Jahr 2010 wurden erste Vorarbeiten und Installationen auf der Feldversuchsfläche durchgeführt. In der zweiten Phase (2011-2012) wurde das Versuchskonzept fertiggestellt und erste Testläufe hinsichtlich Funktionalität und Qualität durchgeführt, über die in weiterer Folge berichtet wird.

Infrarot-Heizungssystem

Weiterentwicklung

Basierend auf der technischen Beschreibung in KIMBALL et al. 2008 und einigen telefonischen Konsultationen mit Bruce Kimball wurde das Infrarotheizungssystem für Lysi-T-Face konzipiert und adaptiert. Die beheizte Fläche wurde mit ca. 3m² fixiert und das System danach ausgerichtet (Abb. 6).

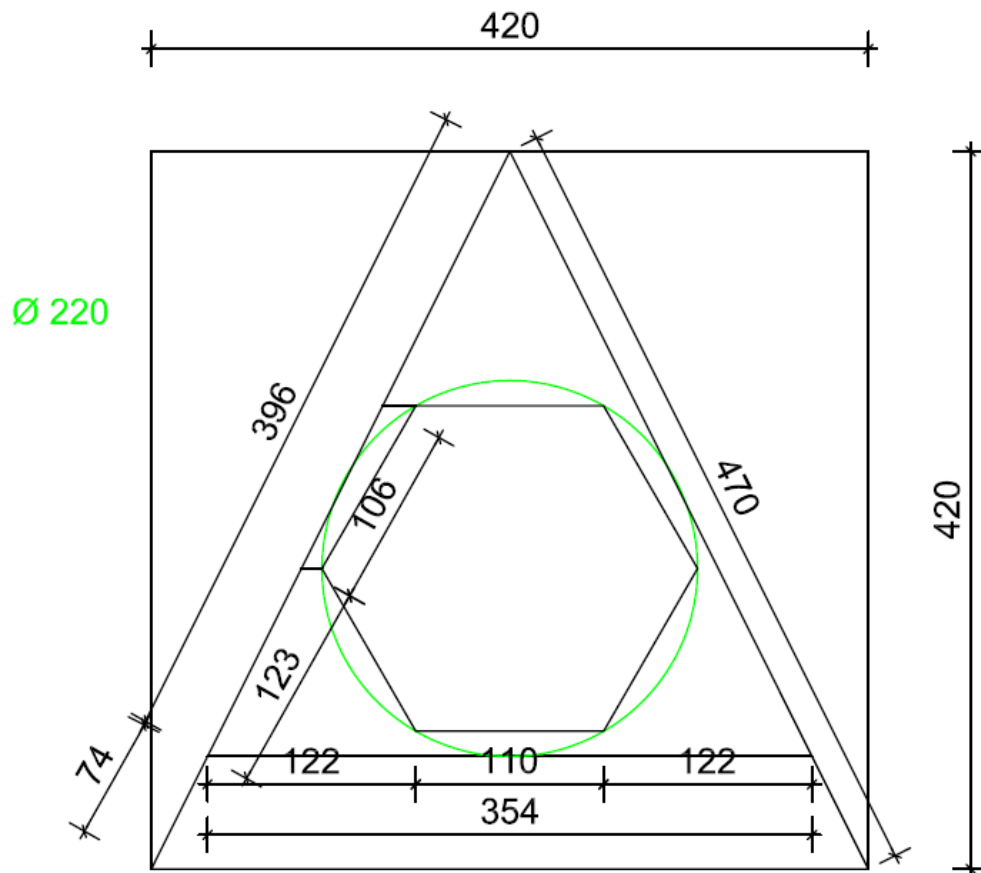


Abbildung 6. Ausrichtung des Infrarot-Heizungssystems in der Versuchsparzelle.

Für die Praktikabilität in der Versuchsanstellung musste das System hinsichtlich einiger Punkte verändert und weiterentwickelt werden:

- a) Die höhenverstellbare Aufhängung muss stabil sein, um Wind und Schnee Stand zu halten.
- b) Die erforderliche Anbindung an die Elektrik muss wind-, regen- und schneefest sein.
- c) Die gesamte Aufhängung muss aus der Versuchsparzelle ausschwenkbar sein, um eine sorgfältige Ernte zu ermöglichen.

Die Anforderung in Punkt a) wurde dadurch erreicht, dass ein stabiles Grundgestell aus Alurohren mit einem Durchmesser von 40 bzw. 48 mm geschweißt wurde. Die relative Witterungsunempfindlichkeit wurde durch eine so genannte „Dockingstation“ geschaffen, in der die gesamte Elektrik in einem wasserdichten Gehäuse untergebracht ist. Die Ausschwenkbarkeit der Gestelle wurde mit der Verwendung von Bodenankern erzielt, in denen die Vertikalrohre eingeschoben werden. Die Bodenanker ermöglichen zugleich auch das Ausschwenken der Aufhängung aus den Ernteparzellen (Abb. 7).

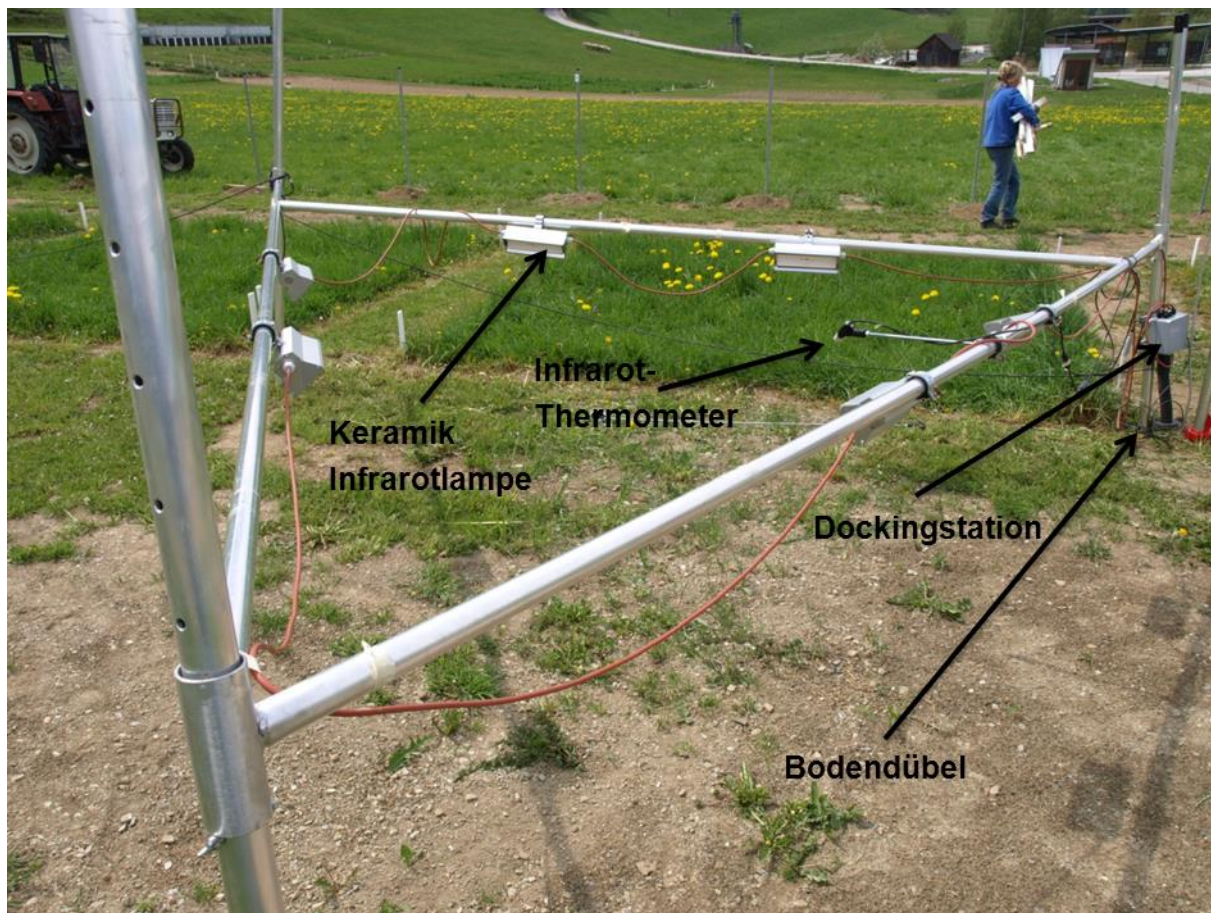


Abbildung 7. Höhenverstellbare Aufhängung des Infrarot-Heizungssystems.

Das Temperatursteuerungskonzept in KIMBALL et al. 2008 ist ein PID-Algorithmus, dessen Ausgangssignal von einem Datalogger ausgegeben wird. Um dieses Konzept weiterzuentwickeln und benutzerfreundlich zu gestalten, wurde das Grundkonzept im Programm LabView (National Instruments) nachprogrammiert und eine Vielzahl von Adaptionen und Anpassungen gemacht. Um dem Benutzer die aktuellen Messwerte bzw. den Betriebszustand der Anlage einfach und funktionell darzustellen, wurde eine grafische Oberfläche geschaffen (Abb. 8).



Abbildung 8. Screenshot der LabView-Steuerungsoberfläche.

Weiters wurde der PID-Algorithmus in vielen Anpassungsschritten hinsichtlich Bestandeszusammensetzung (Grünland), Wuchshöhe und Störgrößen wie Sonneneinstrahlung, Wind etc. optimiert.

Testläufe

Um die Funktionalität und die Qualität des Infrarot-Heizungssystems zu testen, wurden im Rahmen einer Diplommaturaarbeit im Juli/August 2012 zahlreiche Testreihen durchgeführt. Die Detailbeschreibung der Messungen, Auswertungen und Interpretationen sind in TAUCHHAMMER 2012 nachzulesen. Nachfolgend wird ein Auszug aus der Arbeit dargestellt. Um die Qualität der Beheizung prüfen zu können, wurden Infrarotbilder mittels ThermaCam P60 Infrarotkamera (Flir Systems) in den unterschiedlichen Erwärmungsstufen (Umgebungstemperatur, 1,5°C Erhöhung, 3°C Erhöhung) gemacht. Anschließend wurden die Bilder mit der Auswertungssoftware ThermaCam Reporter 2002 (Flir Systems) hinsichtlich Temperaturänderungen entlang einer Linie (zur Beurteilung der Temperaturverteilung über die Parzelle) und Temperaturänderung pro Pixel (zur Beurteilung der Erwärmung) ausgewertet. Betrachtet man das Infrarotbild der unbeheizten Parzelle bzw. die Messdaten der Oberflächentemperaturverteilung entlang der Linien, zeigt sich eine relativ inhomogene Wärmeverteilung. Die Temperaturen innerhalb der Parzelle reichen von 17,9 bis 26,1°C. Im Mittel über die Parzelle wird eine Temperatur von 21°C erreicht (Abb. 9).

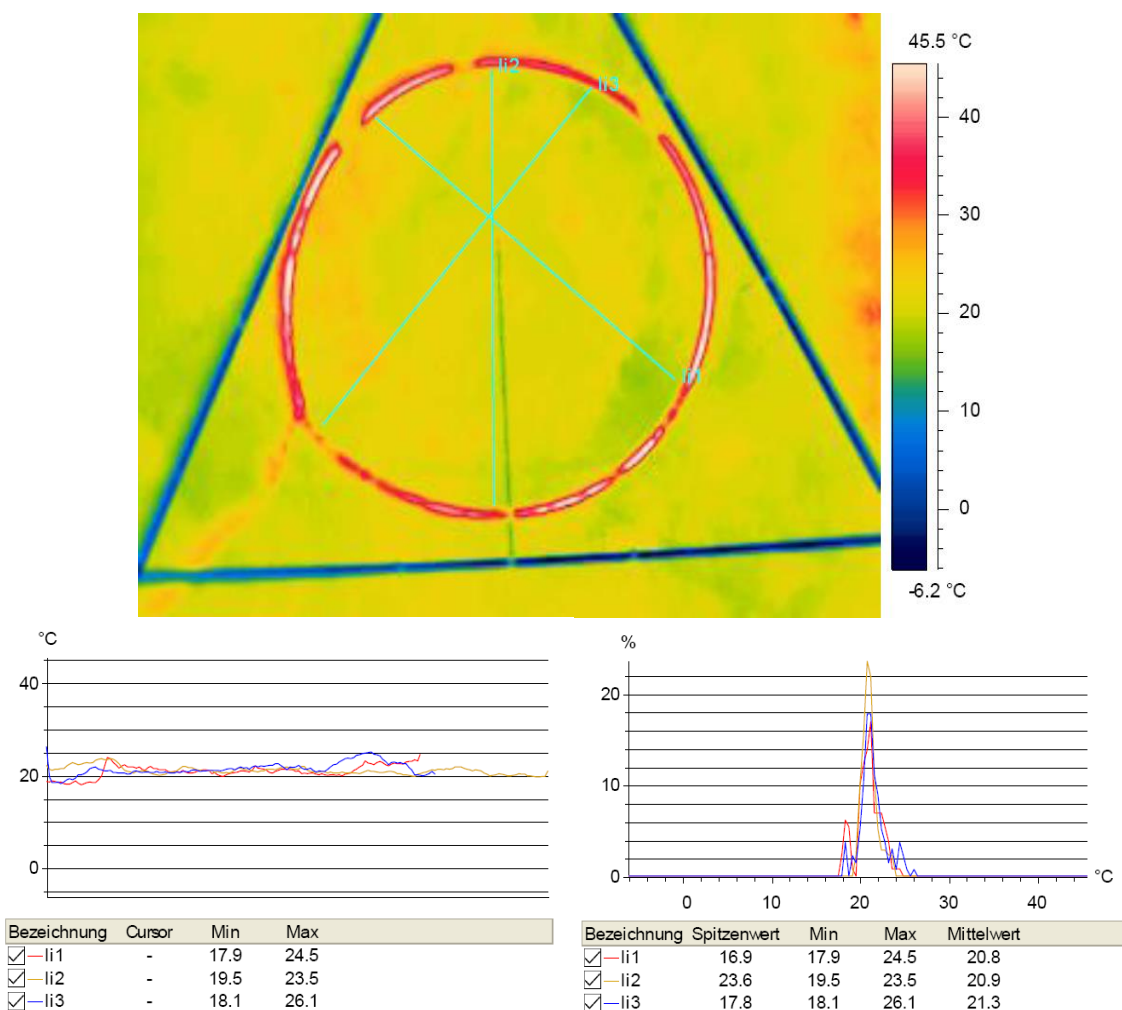


Abbildung 9. Infrarotbild und Temperaturverteilung der unbeheizten Parzelle.

Beim Infrarotbild der Parzelle mit 1,5°C Temperaturerhöhung in Abbildung 10 liegt eine homogenere Wärmeverteilung vor. Der Mittelwert über alle Messwerte ist 22,4°C wodurch die angestrebte Temperaturerhöhung von 1,5°C im Vergleich zur Referenzparzelle gut erreicht wird.

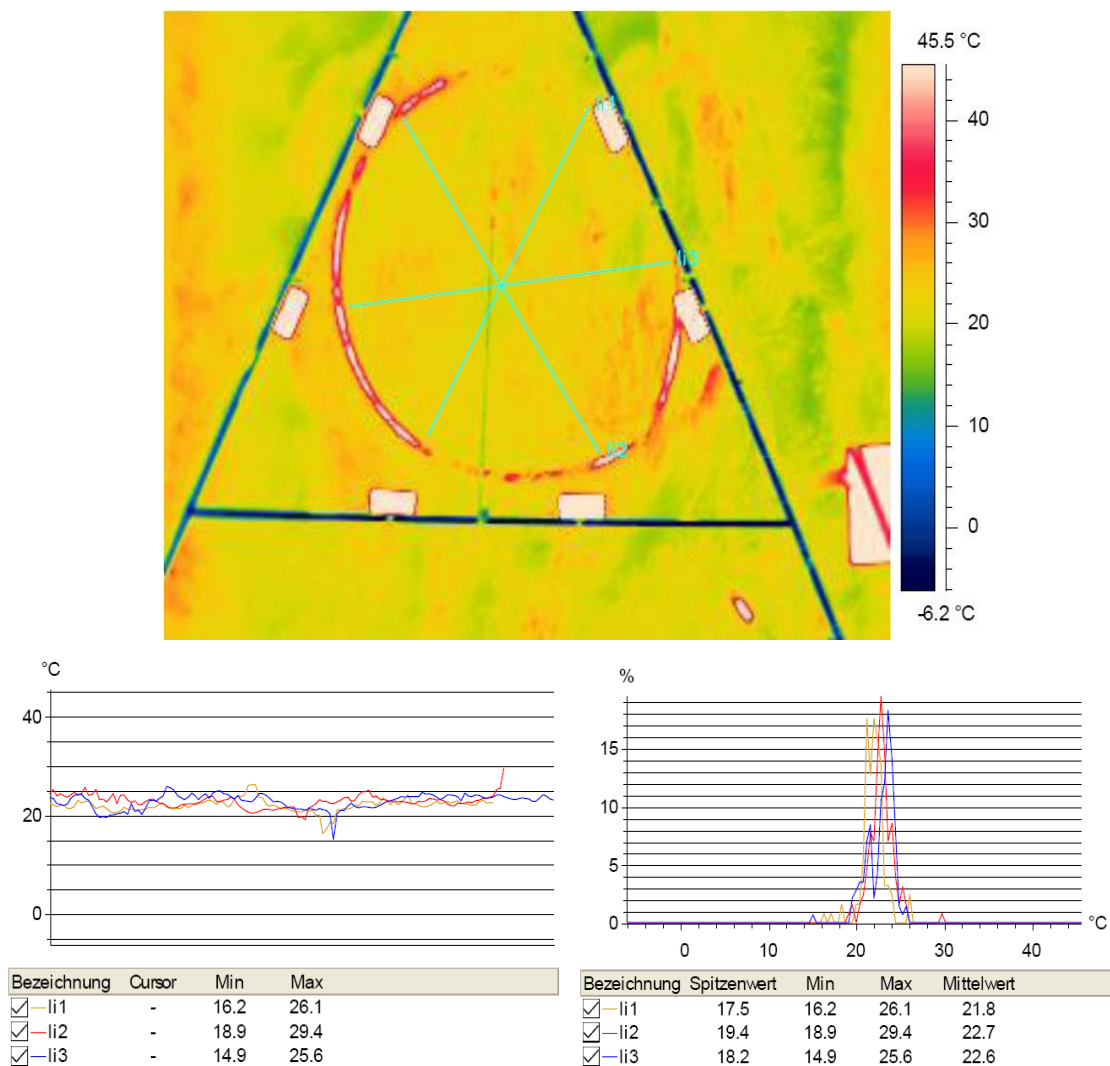


Abbildung 10. Infrarotbild und Temperaturverteilung der Parzelle mit 1,5°C Erhöhung.

Bei der Betrachtung des Infrarotbildes der Parzelle mit 3°C Temperaturerhöhung in Abbildung 11 zeigt sich, dass die Wärmeverteilung noch homogener ist als bei der Parzelle mit 1,5°C Erhöhung. Das Temperaturminimum beträgt 20,9°C, das Temperaturmaximum 27,2°C, was ein Mittel über alle gemessenen Werte von 23,6°C ergibt. Das ist eine Temperaturerhöhung von 2,6°C und liegt im Vergleich mit der unbeheizten Parzelle nur um 0,4°C unter dem angestrebten Wert von 3°C.

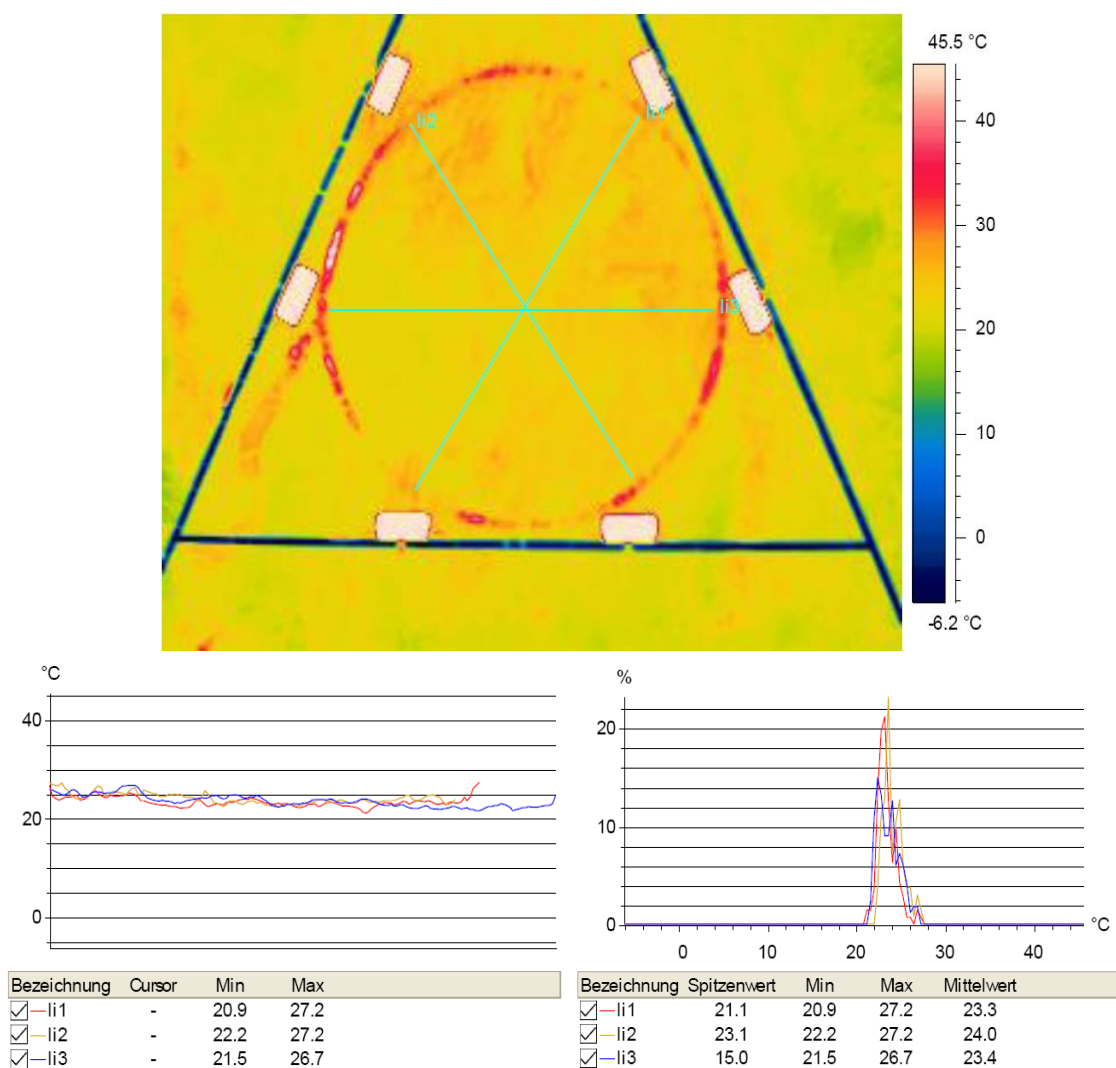


Abbildung 11. Infrarotbild und Temperaturverteilung der Parzelle mit 3°C Erhöhung.

Temperatursteuerung

Die Temperatursteuerung wurde mit einem PID-Algorithmus im Programm LabView erstellt. Um die Funktionalität und Qualität der Steuerung zu belegen, wurden Temperaturdaten des Infrarotthermometers in 10s Zeitintervallen über drei Tage hinweg gesammelt und in Differenz zur Referenzparzelle grafisch dargestellt (Abb. 12). Bei Betrachtung der Messwerte zeigt sich, dass am Tag die Temperaturen stärker vom Sollwert abweichen als in der Nacht. Weiters zeigt sich, dass am ersten Tag mehr Ausreißer auftreten, als am zweiten Tag. Die Ausreißer begründen sich hauptsächlich durch kurzfristige Temperaturunterschiede, die durch einen Sonnen-Wolken-Wechsel zustande kommen. Die Steuerung kann derart kurzfristige Unterschiede nicht rasch genug ausgleichen. Die Temperatursteuerung in der Nacht verläuft relativ konstant mit einer deutlich kleineren Abweichung von $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

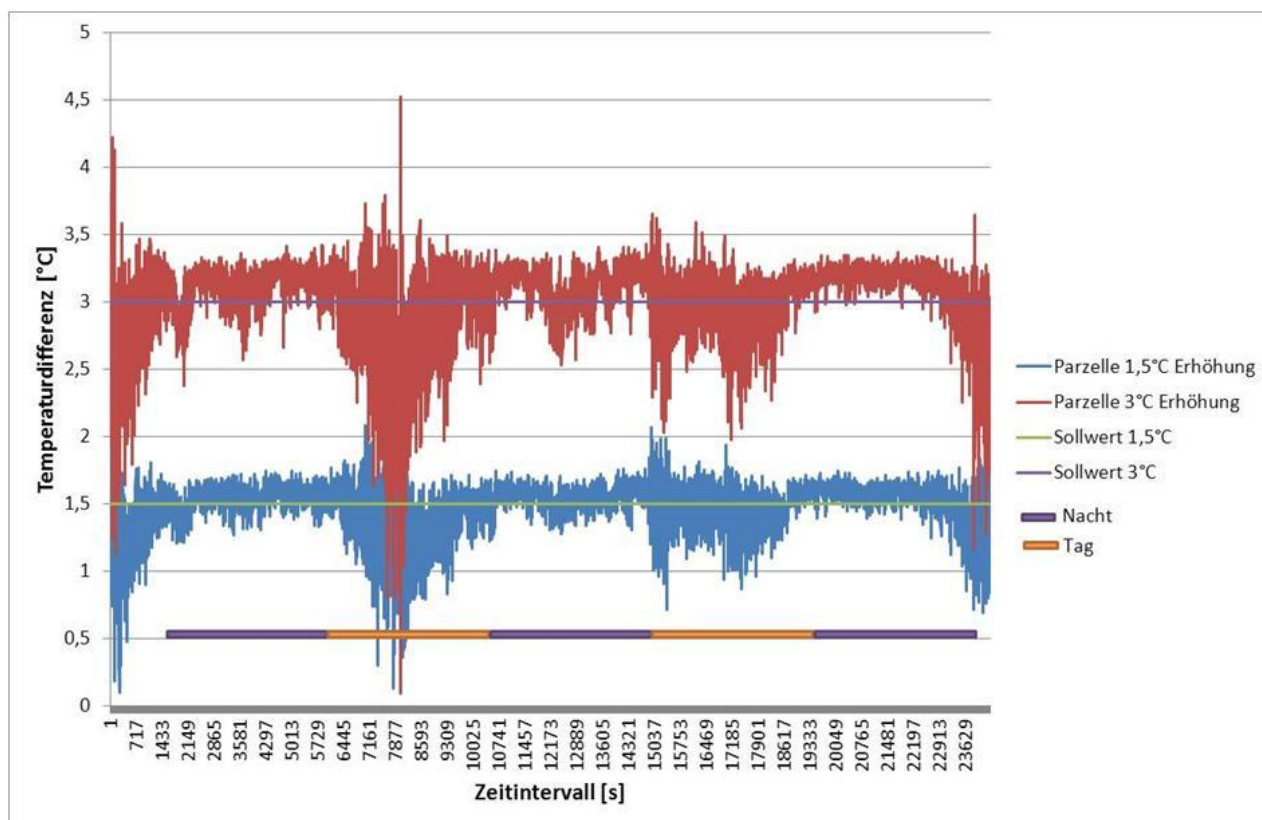


Abbildung 12. Variabilität der Temperatursteuerung über zwei Tage hinweg.

Mini-FACE-System

Weiterentwicklung

Ausgehend von dem Mini-FACE-System am Helmholtzzentrum München wurde in einem ersten Schritt der Begasungsring auf die Bedingungen und Ansprüche eines Wirtschaftsgrünlandbestandes adaptiert. Dazu wurde ein Ring mit einem Durchmesser von 2,2 m aus einem PE-Abwasserschlauch in drei innen liegenden Ebenen mit Bohrlöchern versehen, um eine gleichmäßige Begasung des gesamten Bestandes zu gewährleisten. Die Gleichmäßigkeit der Verteilung wurde mit einem Sensorsystem überprüft (Abb. 13).



Abbildung 13. Konzeption und Test des Mini-FACE-Systems.

Wie auch beim Infrarot-Heizungssystem, musste für die Praktikabilität in der Versuchsanstellung das System hinsichtlich einiger Punkte verändert und weiterentwickelt werden:

- a) Der Ring muss auf der höhenverstellbaren Aufhängung stabil befestigt sein, um eine funktionierende Kombination mit dem Infrarot-Heizungssystem zu ermöglichen.
- b) Die Anbindung an den Lüfter und an die Elektrik muss wind-, regen- und schneefest sein.

Die Anforderung hinsichtlich stabiler Aufhängung und Kombination mit dem Infrarot-Heizungssystem wurde dadurch erreicht, dass der Begasungsring in einem definierten Abstand auf das gleiche Aufhängungsgestell montiert wurde (Abb. 14). Die Zusammenführung der beiden Systeme wird als T-FACE bezeichnet (KIMBALL et al. 2008).



Abbildung 14. T-FACE-System am Versuchsfeld.

Die Anbindung an Lüfter und Elektrik wurde durch dieselbe „Dockingstation“ wie beim Infrarotheizungs-System geschaffen, in der die gesamte Elektrik in einem wasserdichten Gehäuse untergebracht ist.

Testläufe

Die Testläufe zur Prüfung der Funktionalität und Qualität des Mini-FACE-Systems wurden in der Vegetationsperiode 2012 mehrmals durchgeführt. Um die Qualität der Begasung prüfen zu können, wurde ein CO₂-Sensorsystem über der begasten Parzelle montiert, das im 10 Sekundentakt CO₂-Messwerte über einen Datalogger erfasste (Abb. 15).



Abbildung 15. CO₂-Sensorsystem zum Test der CO₂-Verteilung in der Parzelle.

Die Ergebnisse der CO₂-Verteilungstests zeigen, dass die Gasverteilung im Ring (1.Viertel, Mitte, 2. Viertel) sehr homogen ist und sich die Werteabweichung im Bereich von ± 50 ppm bewegen (Abb. 16). Die hohen Werte am Ringrand außen und innen zeigen, dass sich eine begaste Fläche von 3m² mit einer Pufferzone von mindestens 10 cm gegenüber dem Ringrand als gut gewählt erweist. Die CO₂-Werte 1m außerhalb des Rings sowie in der Mitte des Zwischenweges bewegten sich über den gesamten Zeitraum entweder nahe an der Umgebungsluftkonzentration (rund um 400 $\mu\text{L l}^{-1}$) bzw. auf einem deutlich geringeren Niveau als in der gesteuerten Parzelle, wenn starker Wind die Steuerung beeinflusste. Diese Tatsache zeigt, dass die Regelung in Bezug auf Verteilung sehr gut funktioniert bzw. die Drift von CO₂ bei stärkerem Wind sich entweder nahe Null bewegt.

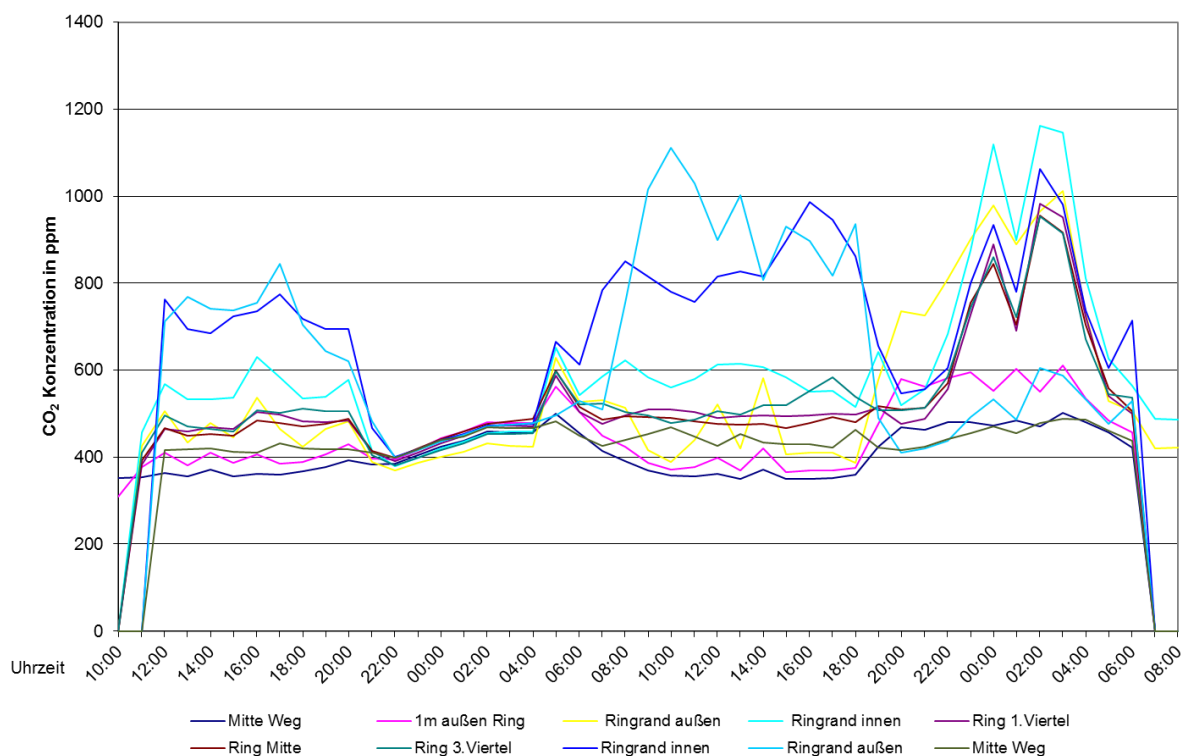


Abbildung 16. CO₂-Verteilungstest auf einer Parzelle.

CO₂-Steuerung

Wie die Temperatursteuerung wurde auch die CO₂-Steuerung in LabView programmiert. Es handelt sich ebenso um einen PID-Algorithmus, der durch Windausgleich und Globalstrahlung (ein und ausschalten) modifiziert wird. Um die Qualität der Steuerung zeigen zu können, wurden Daten des in der Mitte der Parzelle liegenden CO₂-Sensors in 10s Zeitintervallen über einen Tag hinweg gesammelt und in Differenz zur Referenzparzelle grafisch dargestellt (Abb. 17, 18). Die Werte streuen sowohl bei der Regelung +150 $\mu\text{L l}^{-1}$ als auch bei +300 $\mu\text{L l}^{-1}$ in einem Bereich von rund ± 50 ppm, was allerdings bei dieser hohen zeitlichen Auflösung (10 s) als sehr gut beurteilt werden kann. Wenn man das Kriterium ± 10 % Abweichung (Stundenmittelwert) vom Sollwert als internationales Qualitätskriterium für FACE-Begasungen anlegt, zeigt sich für diesen Test, dass dieses Kriterium mit kleinen Ausnahmen zumindest größtenteils erfüllt werden kann (Abb. 19).

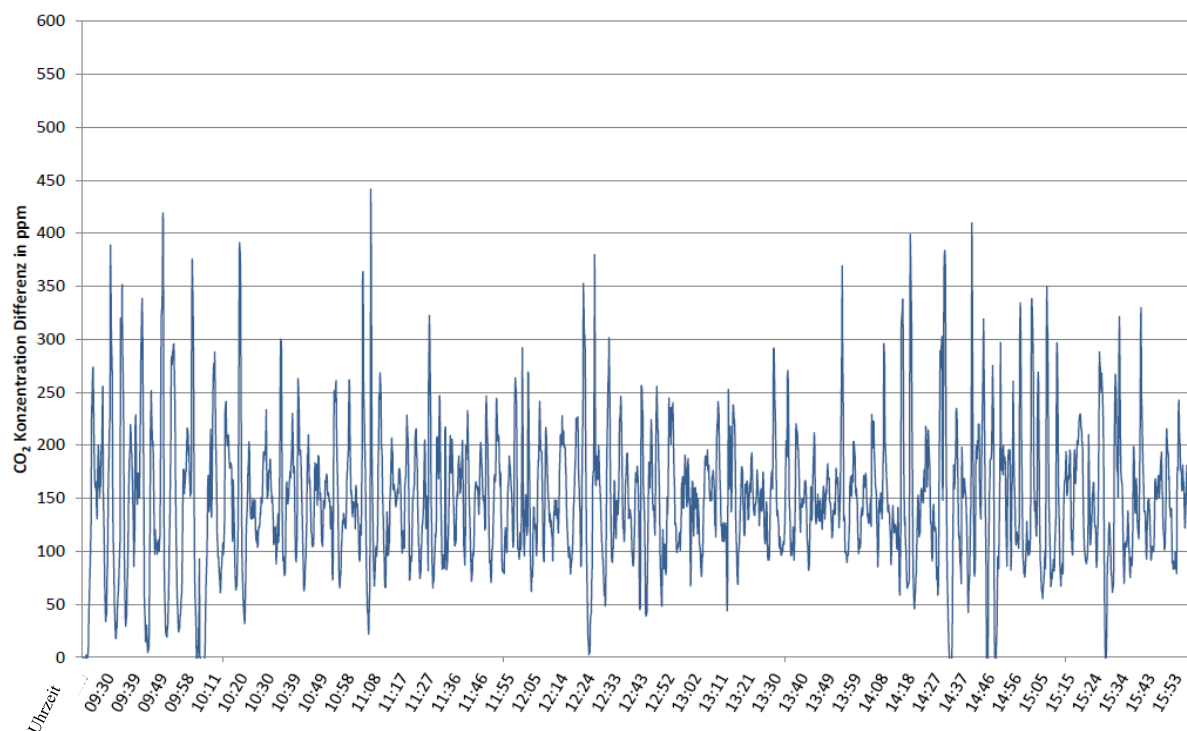


Abbildung 17. Variabilität der CO₂-Steuerung (+150µL l⁻¹) über einen Tag hinweg.

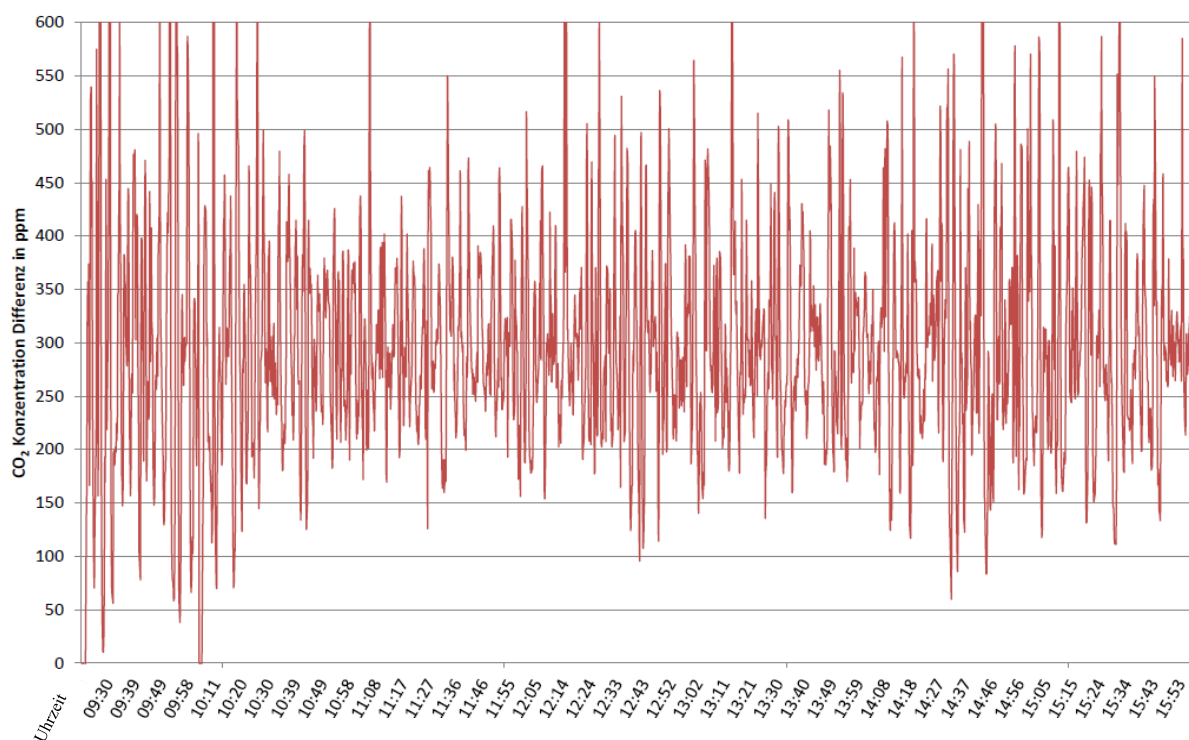


Abbildung 18. Variabilität der CO₂-Steuerung (+300µL l⁻¹) über einen Tag hinweg.

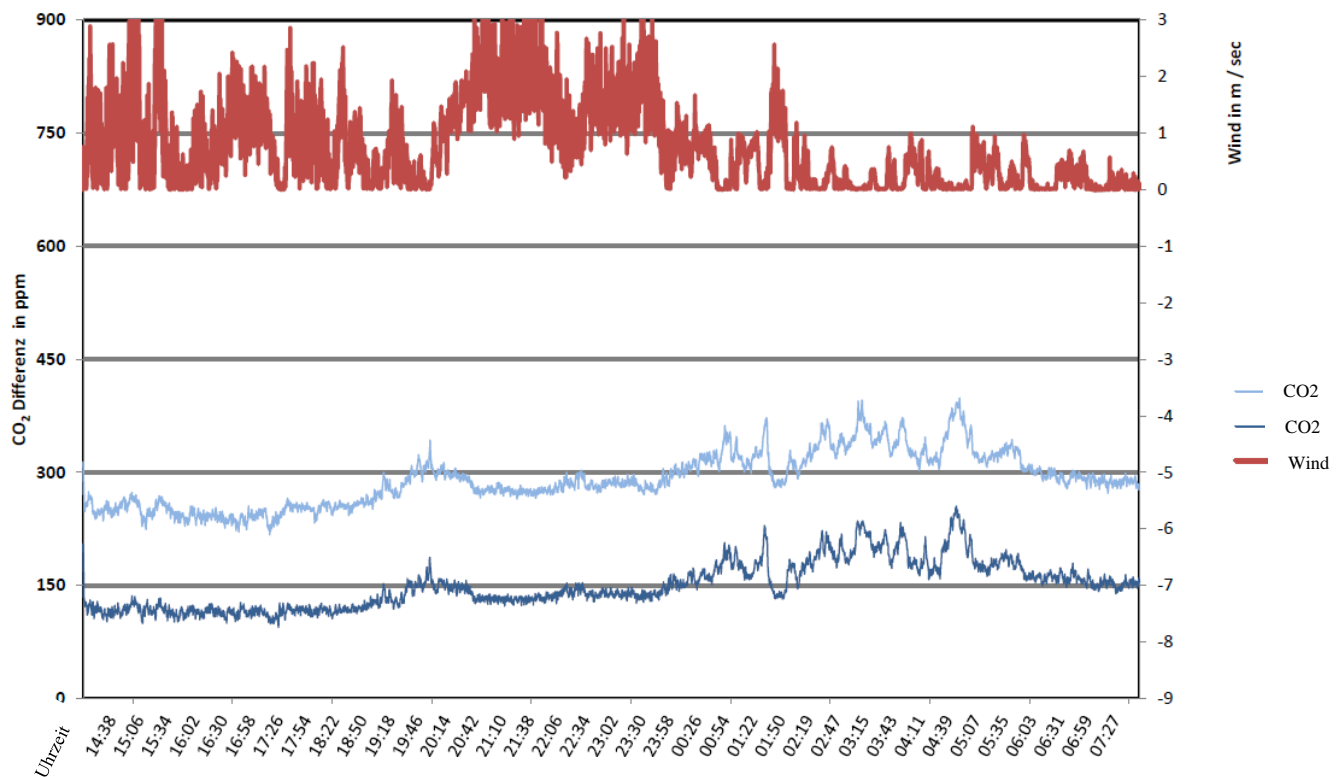


Abbildung 19. Variabilität der CO₂-Steuerung (Stundenmittelwerte) über einen Tag hinweg.

Lysimeter-System

Weiterentwicklung

Um das Lysimeter-Hexagon, das im TERENO-SOILCan-Netzwerk verwendet wird, in das Lysi-T-FACE Versuchsdesign integrieren zu können, musste in einem ersten Schritt die ursprünglich sternförmige Anordnung der Lysimeter um den Serviceschacht geändert werden. Dazu wurden die Lysimeter in zwei Reihen zu je drei Lysimeter gruppiert und der Serviceschacht zentral in den Zwischenweg verschoben (Abb. 5).

Die Sensorausstattung der wägbaren Lysimeter im Versuchskonzept Lysi-T-FACE ist zum Unterschied zu den TERENO-SOILCan-Lysimetern auf die Tiefen 10, 30 und 50 cm konzentriert und umfasst TDR-Trime Sonden pico32 (IMKO GmbH) zur Bodenfeuchtebestimmung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer T8-30 (UMS GmbH) zur Bestimmung des Matrixpotentials. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank und eine Waage, die grammgenau den Sickerwasseraustrag erfassen kann. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie eines Saugkerzenrechs an der Unterseite des Lysimeters und eines Tensiometers im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen (gleich wie bei den TERENO-SOILCan-Lysimetern) die automatische Nachführung der unteren Randbedingung bei feldidentischen Bedingungen (VON UNOLD 2008, STEINS 2008).

Testläufe

Da in sechs Lysimetern rund 60 Sensoren sowohl auf Funktionalität als auch auf Plausibilität ständig überprüft werden müssen, wurde von der Fa. UMS eine Visualisierungsmaske basierend auf dem Programm DIADEM (National Instruments) geschaffen. Im Zuge der Auswertung können für jeden Lysimeter in frei wählbarer Auflösung alle Sensorwerte bzw. für einige ausgewählte Daten auch Aggregationen angezeigt werden. Beispiele für Sensorwerte in einem Lysimeter sind in Abbildung 20 dargestellt.

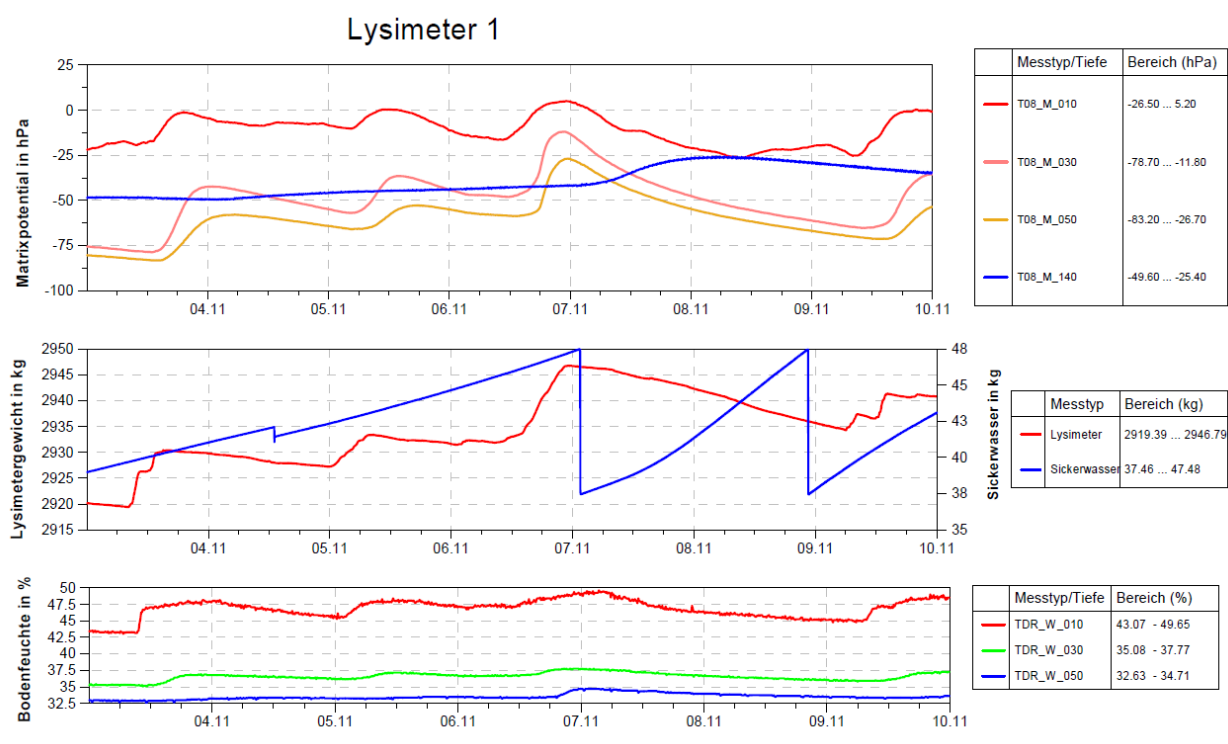


Abbildung 20. Automatische Visualisierung der Lysimeter-Sensorwerte mit dem Programm DIADEM.

Um die automatische Nachführung der unteren Randbedingung feldidentisch bei verschiedenen Verhältnissen gewährleisten zu können, bedurfte es einiger Testläufe mit unterschiedlichsten Anpassungsschritten. Exemplarisch für eine Vielzahl an derartigen Anpassungen musste für die Zeit während der Trockenheit die Steuerung der unteren Randbedingung entsprechend adaptiert werden. Dazu wurden Parameter im Pumpcontrollerprogramm verändert, um damit die Pumpzeiten der bidirektionalen Pumpe zu erhöhen (Abb. 21).

Untere Randbedingung Lysimeter 2

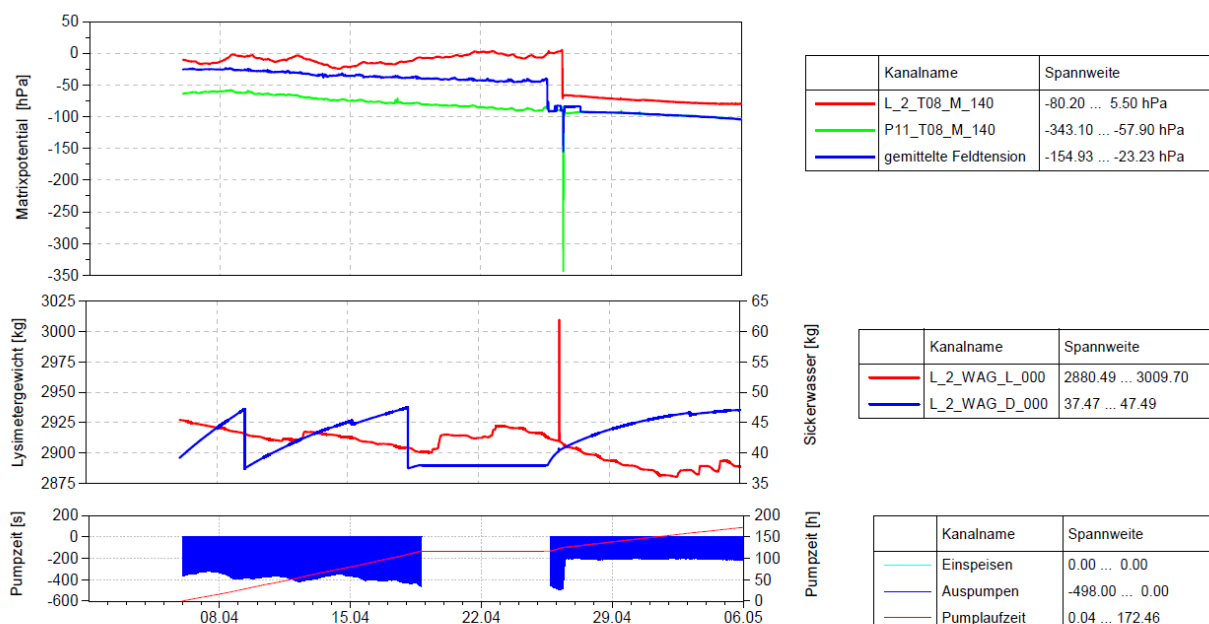


Abbildung 21. Anpassung der Steuerung der unteren Randbedingung bei Trockenheit.

Erweiterung des Versuchskonzeptes im Jahr 2013

Im Zuge der Projekterstellung für das Versuchskonzept Lysi-T-FACE, stellte sich in zahlreichen Diskussionen mit potentiellen Partnern heraus, dass der Faktor Trockenheit ein weiterer wesentlicher Folgefaktor der Erderwärmung im Grünland sein könnte. Trockenphasen in einem Feldversuch erfolgreich zu simulieren, stellt sowohl an die Planung der Regenüberdachungen, als auch an die Neuausrichtung des Feldversuches eine hohe Anforderung. Die Erweiterung des Versuchskonzeptes Lysi-T-FACE um den Faktor Trockenheit wurde zusammen mit der Uni Innsbruck (M. Bahn) und Uni Hohenheim (H.P. Piepho) geplant und nach einer Sicherstellung der Finanzierung für die erforderlichen Ressourcen im Jahr 2013 umgesetzt.

Regenüberdachungen

Für die Planung eines Regenüberdachungskonzeptes gibt es einige Voraussetzungen und Überlegungen die unter www.plantstress.com dargelegt und zusammengefasst sind. Basierend auf diesen Erläuterungen wurde mit der Fa. Götsch und Fälschle eine regensensor- und windgesteuerte Regenüberdachung konzipiert, die mittels eines Elektromotors auf- bzw. zugefahren wird (Abb. 22).

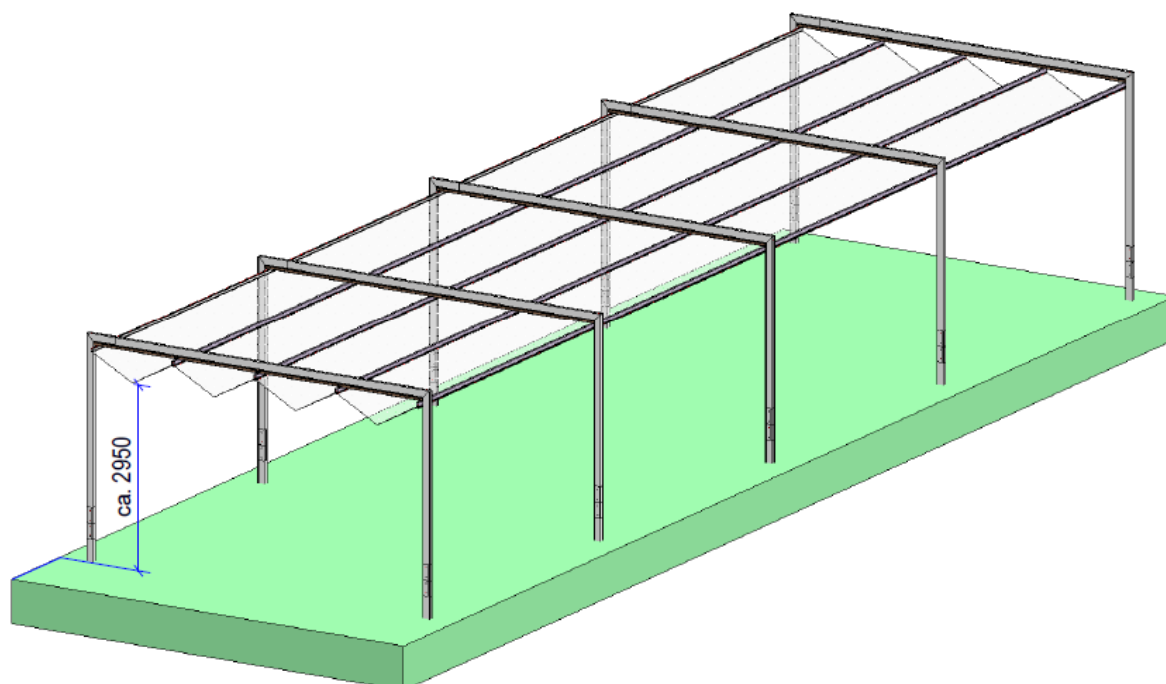


Abbildung 22. Konzept der sensorgesteuerten Regenüberdachung für 4 Parzellen.

Die Überdachung wird für je 4 Versuchspartzellen Trockenheit über einen begrenzten Zeitraum simulieren können und im Feldversuch insgesamt dreifach ausgeführt sein. Die automatische Steuerung erfolgt ebenso wie die Temperatur- und CO₂-Steuerung mit dem Programm LabView.

Adaption Feldversuch

Versuchsdesign

Bei der Erweiterung des Versuchsdesigns wurde darauf geachtet, möglichst viele Optionen für weitere Fragestellungen offen zu lassen. Basierend auf der Einreichung eines SFB-Antrages (durch die Uni Innsbruck) bei dem in der Konzeption noch die Faktoren Stickstoff und ¹³C-Begasung eine Rolle spielen, wurde der Versuchsplan und die Ausrichtung des gesamten Feldversuches weiter entwickelt und angepasst. Um mit dem Versuchsdesign des Lysi-T-FACE-Konzeptes kompatibel zu sein, wurde jene Faktorkombination ausgewählt, die auch auf den Lysimetern vorhanden ist (+3°C Erhöhung und +300μL l⁻¹ CO₂-Erhöhung). Zusätzlich wurden Reserveparzellen für „Mesokosmen“ bzw. für die Begasung mit ¹³C angelegt. Im Falle einer Projektfinanzierung werden diese Parzellen zusätzlich zum Regenüberdachungs-Versuch bestückt und aktiviert (Abb. 23). Die Bezeichnung der gesamten Versuchsanlage lautet nun Clim-Grass als Synonym für Grassland Biogeochemistry in a Changing Climate.



Schlussfolgerungen

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte und umgesetzte Versuchskonzept wurde auf zum Teil bereits bestehenden Konzepten und technischen Systemen aufgebaut. Der überwiegende Teil sowohl im technischen Bereich als auch in der Umsetzung im Feldversuch wurde jedoch vom LFZ Raumberg-Gumpenstein und der Fa. UMS GmbH neu entwickelt und adaptiert. Zusammen mit der Erweiterung um den Faktor Trockenheit und den Möglichkeiten auch zusätzliche Faktoren wie Stickstoff und ^{13}C variieren zu können, ergibt sich ein weltweit einzigartiges, multifaktorielles Klimamanipulationsexperiment. Diese Einzigartigkeit soll es erlauben, in Zukunft Projekte sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch in der angewandten Forschung zu akquirieren und durchzuführen.

Literatur

- BEIER, C., B. EMMETT, P. GUNDERSEN, A. TIETEMA, J. PEÑUELAS, M. ESTIARTE, C. GORDON, A. GORISSEN, L. LLORENS, F. RODA und D. WILLIAMS, 2004: Novel approaches to study climate change effects on terrestrial ecosystems in the field: Drought and passive nighttime warming. *Ecosystems*, 7, 583-597.
- HERNDL, M., E.M. PÖTSCH, J.W. WHITE, B. KIMBALL, H.P. PIEPHO, M. KANDOLF, A. BOHNER, A. SCHAUMBERGER, R. RESCH, W. GRAISS, B. KRAUTZER und K. BUCHGRABER, 2010: "Lysi-T-FACE" - ein technisches Versuchskonzept zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Band 22, 73-74.
- HERNDL, M., E.M. PÖTSCH, A. BOHNER und M. KANDOLF, 2011: Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 119-126.
- INESON, P., K. TAYLOR, A.F. HARRISON, J. POSKITT, D.G. BENHAM, E. TIPPING, und C. WOOF, 1998: Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 2. A warming study. *Global Change Biology*, 4, 153-161.
- KIMBALL, B.A., J. PINTER, G.W. WALL, R.L. GARCIA, R.L. LAMORTE, P.M.C. JAK, K.F.A. FRUMAU und H.F. VUGTS, 1997: Comparisons of responses of vegetation to elevated carbon dioxide in free-air and open-top chamber facilities. p. 113-130. In Allen, L.H. Jr., M.B. Kirkham, et al. (eds.): *Advances in carbon dioxide effects research*. ASA Spec. Publ. 61. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- KIMBALL, B.A., M.M. CONLEY, S. WANG, X. LIN, C. LUO, J. MORGAN und D. SMITH, 2008: Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology*, 14, 309-320.
- PARTON, W.J.; J.A. MORGAN, W. GUIMING und S.J. DEL GROSSO, 2007: Projected Ecosystem Impact of the Prairie Heating and CO₂ Enrichment Experiment. *New Phytologist*, 174, 823-834.
- PÜTZ, T., R. KIESE, S. ZACHARIAS, H. BOGENA, F. PRIESACK, U. WOLLSCHLÄGER, SCHWANK, H. PAPEN, G. UNOLD und H. VEREECKEN 2011: TERENO-SOILCan - Ein Lysimeter Netzwerk in Deutschland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 5-10.

- STEINS, A., 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern / 2. Anforderungen an die Messtechnik zur Umsetzung moderner Datengewinnungskonzepte.– In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.–Beiträge z. Hydrogeologie, 56, Graz.
- TAUCHHAMMER, D., 2012: Methodik zur Simulation von globaler Erwärmung im Grünland. Diplommaturaarbeit am LFZ Raumberg-Gumpenstein, 32 S.
- VON UNOLD, G., 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern / 1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie für differenzierte Anwendungsbereiche und deren Einordnung in die Skalenproblematik.– In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge z. Hydrogeologie, 56, Graz.
- WINKLER, J.B. und M. HERBST, 2004: Do plants of a semi-natural grassland community benefit from long-term CO₂ enrichment? Basic and Applied Ecology, 5 (2), 131-143.