

## **Klimawandel und Futterbau**

F. Taube

**INSTITUT FÜR PFLANZENBAU UND PFLANZENZÜCHTUNG  
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT KIEL**

### **1. Einleitung und Problemstellung**

Auf dem G8-Gipfel Anfang Juli 2009 in Italien verständigten sich die beteiligten Nationen, den Ausstoß von Treibhausgasen (THG) in den Industrienationen bis zum Jahr 2050 um 80% gegenüber dem Basisjahr 1990 zu senken. Wenn dieses Ziel ernst genommen wird, dann bedeutet dies auch erhebliche Konsequenzen für die Landwirtschaft, die in Deutschland unter Einbeziehung des vorgelagerten Bereichs (z.B. Düngemittelherstellung) mit etwa 10% zu den Gesamt THG Emissionen beiträgt. Vor diesem Hintergrund umfasst der folgende Beitrag drei Teile. Im ersten Teil werden allgemein die Ursachenbereiche der THG Emissionen aus der Landwirtschaft in Deutschland aufgezeigt und Optimierungsstrategien im Sinne einer gesamtgesellschaftlichen Verantwortung formuliert. Im zweiten und dritten Teil wird der Komplex Grünlandwirtschaft und Ackerfutterbau in zweifacher Hinsicht thematisiert: Zum einen im zweiten Teil als aktiver „Verursacher“ der Emission Klima relevanter Gase am Beginn der Prozesskette zur Erzeugung tierischer Lebensmittel wie Milch und Fleisch, zum anderen im dritten Teil als passiver „Betroffener“ des laufenden und zukünftigen Klimawandels.

### **2. Beitrag der Landwirtschaft bzw. der Konsumenten landwirtschaftlicher Produkte zu THG Emissionen in Deutschland**

Wie oben ausgeführt, beträgt der Anteil der Landwirtschaft an den THG Emissionen ca. 10 Prozent. Bei genauerer Betrachtung der Ursachenbereiche ist zu konstatieren, dass mehr als 70% dieser Emissionen durch die Tierhaltung inklusive des damit verbundenen Anbaus von Futterpflanzen verursacht werden. Dies sind für alle Industrienationen vergleichbare Größenordnungen, die deutlich machen, dass die Ernährungsgewohnheiten in den Industrienationen die ausschlaggebende „driving force“ für die Emission von THG darstellen. Daraus ist zu schließen, dass eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten die zentrale Stellschraube darstellt, um THG Emissionen in den Größenordnungen zu reduzieren, wie sie seitens der Politik als Ziel formuliert worden sind. In einer Studie von Woitowitz (2007) wurden für Deutschland die Auswirkungen einer ausgewogenen Ernährung nach den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) der Status quo Situation gegenüber gestellt (Abb. 1) und die Auswirkungen auf die Flächennutzung berechnet mit dem Ergebnis, dass insbesondere aufgrund des um 2/3 reduzierten Fleischkonsums und des damit verbundenen reduzierten Futterflächenbedarfs eine Flächenfreisetzung von ca. 4 Mio. ha (~22 % der LN

in D) verbunden wäre, eine Fläche, die anderweitigen Nutzungen mit geringen THG Emissionen zugeführt werden könnte.

Wenn diese übergeordnete Betrachtungsweise in einer Fachthemen zentrierten Gruppe wie der AGGF auch etwas ungewöhnlich erscheinen mag, so halte ich sie doch für essentiell, erstens, um den Beitrag der „Landwirtschaft“ zu den THG Emissionen de facto als einen Beitrag der „Konsumenten“ zu identifizieren und zweitens, um auf Basis eines solchen Ansatzes einen ganz anderen Blick auf das Dauergrünland, insbesondere das „absolute Dauergrünland“ zu eröffnen. Das „absolute Dauergrünland“ zeichnet sich dadurch aus, dass keine Flächenkonkurrenz zur Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel gegeben ist und dass eine Nutzung dieser Flächen den landeskulturellen Wert des Grünlands ausmacht inklusive weiterer Ökosystemleistungen (Biodiversität, Kohlenstoffsенке etc.), mithin sind THG Emissionen von solchen Flächen einer anderen Bewertung zu unterziehen als Ackerfutterbausysteme, die in Konkurrenz zur Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel stehen. Es ist meines Erachtens eine der vornehmsten Aufgaben der AGGF, diese Zusammenhänge vor dem Hintergrund der Klimawandeldiskussion im gesellschaftlichen Diskurs zu platzieren.

### **3. Grünland und Futterbau als Verursacher von THG Emissionen**

Weltweit stellt die Erfassung des „carbon footprint“ (des ökologischen Rucksacks an THG Emissionen je Produkteinheit, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Produkteinheit) eine neuere systemorientierte Forschungsrichtung verschiedener agrarwissenschaftlicher Arbeitsgruppen dar. In der Regel wird dieser carbon footprint je Einheit tierischen Produkts (kg Milch/Fleisch) ausgedrückt, so dass sowohl die Emissionen aus der Futterproduktion als auch aus der Tierhaltung in die Gesamtbewertung einfließen. Um einen vollständigen carbon footprint abzubilden, ist mithin die Summe der relevanten THG (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) im Produktionsprozess zu messen, mit den Klimaschädlichkeitsfaktoren zu multiplizieren und als CO<sub>2</sub>-Äquivalent zu dokumentieren. Dies setzt zum einen einen erheblichen messtechnischen Aufwand voraus und zum anderen den Einsatz von Modellen, um Extrapolationen von punktuellen Messungen zu erlauben. Ein Beispiel für einen derartigen Ansatz mit entsprechenden dezidierten Messreihen stellt die Arbeit von Basset-Mens et al. (2008) dar, die unter neuseeländischen Verhältnissen die Effekte unterschiedlicher Futterproduktionssysteme auf den „carbon footprint“ je kg Milch abbildet (Abb. 2), ein anders Beispiel auf Basis von Modellierungsarbeiten dokumentiert die Bedeutung des Grünlandalters und des damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Speicherungspotentials im Boden auf die Ausprägung des carbon footprint Milch unter nordamerikanischen Verhältnissen. Sedorovich et al. (2008) können in dieser Studie zeigen, dass die Berücksichtigung der C-Sequestrierung im Boden unter Grünlandbewirtschaftung eine derart dominante Rolle einnimmt, dass davon die relative Vorzüglichkeit von Futterbausystem maßgeblich zugunsten der Weide

und des Dauergrünlands im Vergleich zu Stallhaltungs- und Ackerfutterbausystemen beeinflusst wird.

Während die Methanemissionen im Produktionsprozess der Milch weitestgehend dem Bereich der Tierhaltung zuzuordnen sind, spielen die CO<sub>2</sub>- und Lachgasemissionen die zentrale Rolle im Futterbau. Für beide Gase, insbesondere jedoch die CO<sub>2</sub>-Emissionen spielt die Landnutzung bzw. die Landnutzungsänderung eine zentrale Rolle. In diesem Zusammenhang stellt die Umwandlung von Dauergrünland in eine ackerbauliche Nutzung weltweit die stärksten Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus dem Boden dar (Conant et al., 2005). Diese Arbeitsgruppe identifizierte bei der Auswertung von weltweit über 100 Studien zum Thema eine durchschnittliche Reduktion der Bodenkohlestoffgehalte durch Umwandlung von Grünland in Acker in der Größenordnung von knapp 60 Prozent fest. Umgekehrt führt insbesondere in den ersten 30 – 40 Jahren eine Neuanlage von Grünland auf Mineralböden zur höchsten CO<sub>2</sub>- Bindung. Vor diesem Hintergrund ist die Erhaltung alten Dauergrünlands eine der wirkungsvollsten Maßnahmen im Sinne einer CO<sub>2</sub>-Senkenfunktion. Sousanna et al. (2007) konnten an 9 europäischen Grünlandstandorten unter Beweidung zeigen, dass auch bei etablierten Grünlandbeständen auf Mineralböden mit einer durchschnittlichen C-Bindung im Boden von ca. 1000 kg/ha/Jahr auszugehen ist, Daten die durch andere Untersuchungen (Christensen et al., 2009) für die Neuanlage von Grasland unter dänischen Verhältnissen bestätigt werden. Diese positiven Effekte der Graslandnutzung für die Kohlenstoffbindung werden teilweise durch die Emissionen insbesondere von N<sub>2</sub>O reduziert. Sousanna et al. (2007) können unter Beweidung mit Rindern zeigen, dass die Klimabilanzen von Weidesystemen unter Berücksichtigung der N<sub>2</sub>O Emissionen und der CH<sub>4</sub>-Emissionen durch den Wiederkäuer mehr oder weniger ausgeglichen sind, das heißt, die CO<sub>2</sub>-Bindung im Boden kann die N<sub>2</sub>O- und Methanemissionen kompensieren. Allard et al. (2007) zeigen darüber hinaus, dass mäßig intensiv gedüngte Weidesysteme eine höhere C-Bindung im Boden verursachen als extensive Systeme, was wiederum die Emissionen aus der Herstellung von N-Düngern kompensiert. Aus der Gesamtbetrachtung der relevanten Literatur ist abzuleiten, dass die Nutzungsform Weide auf dem Dauergrünland eine sehr günstige Konstellation für die Vermeidung von THG Emissionen darstellt. Dies wird auch durch eigene Studien aus dem N-Projekt Karkendamm untermauert. Unter Vernachlässigung der C-Bindung im Boden zeigen Kelm et al. (2004), dass low-input Weidenutzungssysteme mit Weißklee die geringsten spezifischen CO<sub>2</sub>- Emissionen verursacht, während intensiv gedüngte Schnittnutzungssysteme die höchsten spezifischen Emissionen (CO<sub>2</sub>-Emissionen/ MJ NEL) verursachen. Um die Bedeutung der Leguminosen im Vergleich zu gedüngten Grasbeständen unter Schnittnutzung zu dokumentieren, verglichen wir weiterhin über 3 Jahre einen mit 360 kg N/ha gedüngten Grasbestand mit einem ungedüngten Luzerne-Grasbestand, erfassten die spezifischen CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen und drückten diese als CO<sub>2</sub>-Äquivalente/GJ NEL aus, wobei wir zusätzlich praxisübliche Überfahrungen der Versuchsflächen vornahmen, um den Effekt von Bodenverdichtungen abzubilden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 zusammengefasst und zeigen für die spezifischen THG Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente/GJ NEL) bei nahezu gleichen Erträgen und Energiedichten (~ 5,9

MJ NEL/kg TM) der Prüfvarianten eine eindeutige Überlegenheit des Leguminosen-Gras-Systems im Vergleich zu dem gedüngten Grassystem.

Nachdem die Bedeutung des Dauergrünlands für die C-Speicherung im Boden eindeutig dokumentiert worden ist, soll auf Basis einer Studie von Vertes et al. (2007) der Effekt der Landnutzungsänderung ausgehend vom Dauergrünland bis hin zu Maismonokulturen dokumentiert werden. Die Abbildung 4 zeigt die Veränderung der SOM (soil organic matter) – Werte über einen Zeitraum von mehr als 25 Jahren. Obwohl in diesem Experiment organische Dünger in Form von Rindergülle (50 m<sup>3</sup>/ha/Jahr) zugeführt wurden, sanken die SOM-Werte unter Silomais-Monokultur über den Untersuchungszeitraum nahezu linear um ca. 30% ab, während sie auf dem alten Dauergrünland stabil bleiben („steady state“ Situation). Vor diesem Hintergrund sind die zunehmenden Maismonokulturen im Rahmen der Ausweitung der Biogaserzeugung mehr als kritisch zu würdigen.

Bezüglich der CO<sub>2</sub>-Speicherung im Boden ist damit hinlänglich die Überlegenheit von Dauergrünland im Vergleich zu Ackerfutterbausystemen dokumentiert. Leider ist die Datenbasis für das Ausmaß der CO<sub>2</sub>-Speicherung in Abhängigkeit vom Grünlandalter, Bodenart und Bodenwasserhaushalt in Deutschland unzureichend dokumentiert. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf, um verlässliche Datengrundlagen sicher zu stellen und auf dieser Basis aussagefähige carbon footprints für unterschiedliche Futterproduktionssysteme zu dokumentieren.

Ein besondere Aufmerksamkeit haben in den letzten Jahren die N<sub>2</sub>O Emissionen von Futterproduktionssystemen erfahren, weil die Klimawirksamkeit dieses Gases im Vergleich zum CO<sub>2</sub> den Faktor 310 einnimmt und damit relativ geringe Unterschiede in den N<sub>2</sub>O Emissionen erhebliche Effekte auf die CO<sub>2</sub>-Äquivalente induzieren. Wir konnten im Karkendamm-Projekt unter Mähweidenutzung mit einem N-Versorgungsgradienten zwischen 90 und 230 kg N/ha keine signifikanten Unterschiede in den N<sub>2</sub>O-Jahresemissionen dokumentieren (Lampe et al., 2006). Die Werte variierten zwischen 2 und 5 kg N<sub>2</sub>O-N/ha/Jahr und wurden maßgeblich durch die nicht Dünger- bzw. Exkrementbürtigen N-Quellen des Bodens maskiert. Weiterhin konnten wir in dieser Studie dokumentieren, dass auf diesem humos-sandigen Standort das N<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>O-Verhältnis Größenordnungen zwischen 10 und 20 : 1 annahm, das heißt mit jedem kg N<sub>2</sub>O-N emittierten zusätzlich zwischen 10 und 20 kg N<sub>2</sub>/ha, also in diesem Fall bis zu insgesamt ca. 90 kg N<sub>2</sub>/ha, eine mehr als relevante Größe in der N-Bilanzierung, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass mit zunehmendem Anteil Wasser gefüllter Poren im Boden die N<sub>2</sub>-Emissionen den bedeutendsten Emissionspfad einnehmen.

Während die N<sub>2</sub>O-Emissionen unter Grünland für verschiedene Standorte und Bewirtschaftungsintensitäten recht gut belegt sind, gibt es bisher kaum vergleichende Studien zwischen Grasland und Mais. Der Vergleich der N<sub>2</sub>O Emissionen zwischen Grünlandneuansaat und Mais steht daher aktuell im Fokus eines Teilprojektes des BIOGAS-EXPERT Projektes an der Universität Kiel. An zwei Standorten (hS; sL) wurden die N<sub>2</sub>O Emissionen über einen weiten N-Düngungsgradienten erfasst mit dem Ergebnis, dass die Werte unter Mais um den Faktor 2 (geringes N-Düngungsniveau) -4 (hohes N-Düngungsniveau) je ha erhöht waren. Auch wenn als funktionelle Einheit nicht die Fläche (ha), sondern die Produkteinheit (dt TM bzw. GJ NEL) herangezogen

wird, bleibt der Mais trotz der höheren Erträge ungünstiger zu beurteilen als Grünland (Senbayram et al., 2009).

Abschließend kann somit festgehalten werden, dass der carbon footprint von Futterproduktionssystemen in Zukunft unter Berücksichtigung der verschiedenen Standortverhältnisse und Intensitätsstufen der Futtererzeugung intensiv erforscht werden muss, um belastbare Eingangsgrößen für die Ableitung des carbon footprint tierischer Produkte wie Milch und Fleisch bereit zu stellen (vgl. Beitrag Flachowsky in diesem Band).

#### **4 Auswirkungen des Klimawandels auf Ertrag und Qualität von Futterpflanzen/ Anpassungsstrategien**

Eine aussagekräftige Behandlung dieses Teilaspekts hängt zunächst von zwei Voraussetzungen ab: Zum Ersten von der Verfügbarkeit valider, räumlich hoch auflösender Klimamodelle, die die wahrscheinlichen Witterungskonstellationen der Zukunft hinreichend genau abbilden können; und zum Zweiten von der Verfügbarkeit experimenteller Daten, die die vielfach relevanten Wechselwirkungen der Umweltfaktoren CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre, Niederschlagsmenge und -verteilung sowie Temperatureffekte in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsintensität (Stickstoffversorgung) hinlänglich genau beschreiben und über einen ausreichend langen Zeitraum erhoben worden sind.

Für beide Bereiche ist derzeit noch eine erhebliche Unsicherheit zu konstatieren. So prognostiziert das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für Deutschland eine vergleichsweise gut abgesicherte Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, ebenso wie erhöhte Temperaturen (insbesondere im Winterhalbjahr) und reduzierte Wasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode. Die lokalen Ausprägungen der Niederschlagsereignisse und Temperatursteigerungen sind jedoch gegenwärtig nicht sicher zu prognostizieren.

Ebenso verhält es sich mit der Verfügbarkeit experimenteller Langzeitstudien. Zwar liegen auf Basis der weltweit durchgeführten FACE-Experimente (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment) mehrjährige Datenreihen zu den Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre vor, multifaktorielle Experimente werden jedoch erst in jüngster Zeit umfassend angegangen (vgl. MIKKELSEN et al. 2008). Das bedeutet, dass sich eine Behandlung des Themas bislang überwiegend auf die absehbaren groben Trends der Klimaänderungen beschränken muss und Daten bezüglich der Folgen nur begrenzt verfügbar sind. Im folgenden Abschnitt (4.1) werden die erwarteten Effekte des Klimawandels auf Grünlandökosysteme behandelt, im Abschnitt 4.2 die erwarteten Auswirkungen auf Ackerfutterbaukulturen und im Abschnitt 4.3 werden schließlich daraus Optimierungsstrategien abgeleitet.

##### **4.1 Auswirkungen des Klimawandels auf das Grünland**

In Europa ist es das Schweizer FACE-Experiment, welches über einen längeren Zeitraum Auswirkungen einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre auf produktives Grünland untersucht hat (HEBEISEN et al. 1997).

International liegen weitere Erkenntnisse bezüglich semi-arider Grünlandökosysteme vor (MORGAN et al. 2004).

Eine Verdopplung der heutigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen führt dabei durchweg zu Ertragsteigerungen in einer Größenordnung von ca. 15 %. Diese Ertragsteigerungen sind ganz wesentlich auf eine Umschichtung der Bestände zugunsten höherer Leguminosenanteile und damit einhergehend erhöhter Stickstofffixierungsraten zurückzuführen (LÜSCHER et al. 2000). Neben den Leguminosen profitieren unter N-limitierten Bedingungen auch die krautartigen Pflanzen (LÜSCHER et al. 1998). Nicht nur die Produktivität der oberirdischen Biomasse wird jedoch gesteigert, sondern auch die Wurzelmasse, wobei Wechselwirkungen mit der Stickstoffversorgung dahingehend zu belegen sind, dass dieser Effekt nahezu ausschließlich unter N-limitierten Bedingungen (geringe mineralische N-Düngung) zu belegen ist, wie sie beispielsweise im ökologischen Landbau relevant sind (HEBEISEN et al. 1997).

Von der Erhöhung der Wurzelmasse profitieren jedoch nahezu ausschließlich die Gräser, der entsprechende Effekt bei den Leguminosen (Weißklee) ist marginal. Bei hoher Stickstoffdüngung und Gräserreinbeständen sind im Schweizer FACE-Experiment positive CO<sub>2</sub>-Effekte auf den Ertrag in einer Größenordnung von durchschnittlich ca. 25 % dokumentiert, wobei die Ertragssteigerungen mit zunehmender Dauer des Experiments bis zum 10. Versuchsjahr anstiegen (7-32 % Ertragssteigerung). Low input Systeme wie der ökologische Landbau dürften somit hinsichtlich der Produktivität und Artenzusammensetzung des Grünlands primär über steigende Leguminosenanteile von einer CO<sub>2</sub>-Konzentrationssteigerung profitieren.

CASELLA und SOUSSANA (1997) können weiter zeigen, dass diese positiven Effekte insbesondere in Trockenjahren wirken. Dies unterstützt die These von MORGAN et al. (2004), die postulieren, dass der Wasser sparende Effekt einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration möglicherweise bedeutender ist als der direkte CO<sub>2</sub>-Effekt auf die Ertragsbildung.

Zusammenfassend lässt sich aus den aktuellen Arbeiten ableiten, dass (a) der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt sowohl unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus über die Steigerung der N<sub>2</sub>-Fixierungsleistung von Leguminosen als auch über entsprechend positive Effekte bei hoch gedüngten Grasbeständen (Daepf et al., 2001) steigenden Wasserstress im Sommer zum Teil kompensieren kann, dass (b) durch eine Temperaturerhöhung im Frühjahr/Herbst positive Effekte infolge der Verlängerung der Vegetationsperiode zu erwarten sind, und dass (c) durch die Steigerung der Leguminosenanteile neben einer Erhöhung der Produktivität indirekt positive Effekte auf die Futterqualität zu erwarten sind. Die Verdaulichkeit der organischen Masse (VOM) ist beim Weißklee deutlich günstiger zu beurteilen als bei den meisten Futtergräsern. Direkte Effekte auf die Verdaulichkeit von Futtergräsern sind in Abhängigkeit variierender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht nachgewiesen (HEBEISEN et al. 1997).

## 4.2 Auswirkungen des Klimawandels auf den Ackerfutterbau

### 4.2.1 Mais

Mais ist die Kulturpflanze, die uneingeschränkt zu den „Klimawandelgewinnern“ zu zählen ist. Modellrechnungen von EWERT et al. (2005) weisen für Mais auf der Basis linearer Ertragstrends in den vergangenen 40 Jahren mit durchschnittlich 3,8 % je Jahr die höchsten Ertragsteigerungen in Europa aus. Ertragsmodellierungen von HERRMANN et al. (2004) zeigen weiterhin, dass diese Ertragszuwächse insbesondere in Norddeutschland zum großen Teil den bereits laufenden klimatischen Veränderungen (Temperaturerhöhung) zuzuschreiben sind, und nur in geringerem Maße dem Zuchtfortschritt bzw. einer verbesserten Produktionstechnik.

Im Gegensatz zu C<sub>3</sub>-Gräsern wirkt der positive Klimawandeleffekt beim Mais vor allem über den Faktor Temperaturerhöhung in Verbindung mit hoher Wassernutzungs- und Stickstoffeffizienz, während die CO<sub>2</sub>- „Düngungseffekte“ deutlich geringer als bei C<sub>3</sub>-Gräsern ausfallen, dies zeigen Studien von Manderscheid et al. (2009) sowie Ottmann et al. (2001). Andererseits untermauern Modellstudien von Wienfort et al. (2009), dass das Ertragspotential von Silomais bereits unter heutigen Umweltverhältnissen auf vielen Standorten in Deutschland Wasser limitiert ist und somit die positiven potentiellen Ertragseffekte aufgrund zunehmende Temperaturen durch zunehmende Wasserdefizite insbesondere in den neuen Bundesländern eingeschränkt werden dürften. Für den nordwestdeutschen Klimaraum ist hingegen mit dem Anbau leistungsstarker Sorten mit hoher Silo- bzw. Kornreifezahl zu rechnen und die relative Vorzüglichkeit des Maisanbaus gegenüber anderen Ackerfutterpflanzen wird sich dadurch weiter erhöhen.

Inwieweit diese potentiell positiven Effekte durch phytosanitäre Probleme (z.B. Maiszünsler, Maiswurzelbohrer, Fusarien) konterkariert werden, bleibt abzuwarten.

### 4.2.2 Leguminosen-Gras Systeme

Kleegras- beziehungsweise Luzerne-Gras Gemenge stellen die Basis eines erfolgreichen Pflanzenbaus und einer ausreichenden Stickstoffversorgung der Fruchtfolge bisher vor allem in semi-intensiven Futterbausystemen dar; insofern sind die Effekte des Klimawandels auf diese Kulturen von besonderer Bedeutung. Wie schon in Abschnitt 2 gezeigt, werden Leguminosen von einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre aufgrund erhöhter Stickstofffixierungspotentiale profitieren. LÜSCHER et al. (2000) konnten für Luzerne Steigerungsraten der Stickstofffixierungsleistung von kurzfristig bis zu 47 % bei Verdopplung der aktuellen CO<sub>2</sub>-Konzentration unter kontrollierten Bedingungen zeigen.

Von besonderem Interesse ist daneben, wie sich eine reduzierte Wasserverfügbarkeit auf die relative Vorzüglichkeit der auszuwählenden Leguminosenpartner im Gemenge mit Gräsern auswirkt und welche Effekte auf die Futterqualität zu erwarten sind. In der internationalen Literatur liegen dazu einige aussagekräftige Arbeiten vor. So untersuchten PETERSON et al. (1992) in

Wisconsin, USA, den Einfluss zunehmenden Wasserstress im Freiland auf Leguminosenreinsaaten von Rotklee, Luzerne, Hornklee und Kicher-Tragant (einer an extreme Trockenheit im kontinentalen Klima Nordamerikas angepasste Art). Die zentralen Ergebnisse dieser Studie sind in Tabelle 1 ausgewiesen.

In zwei Hauptnutzungsjahren (HNJ) wurde die Wasserversorgung zum einen im Optimalbereich gehalten und zum anderen bis auf Größenordnungen von 25-40 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) reduziert. Die Ergebnisse zeigen, dass allein die Luzerne aufgrund ihres tief reichenden Wurzelsystems in der Lage ist, unter Trockenstressbedingungen akzeptable Erträge zu realisieren, während der in Deutschland flächenmäßig bedeutendere Rotklee die stärksten Ertragseinbußen im Vergleich zur Kontrolle aufweist. Auch der in den letzten Jahren aufgrund hoher Gehalte an sekundären Inhaltsstoffen (Tannine) diskutierte Hornklee versagt bei zunehmendem Trockenstress. Interessanterweise sind die Effekte auf die Futterqualität (VOM) gegensätzlich ausgeprägt, was auf ein erhöhtes Blattgewichtsverhältnis der Bestände bei Wassermangel zurück zu führen ist.

**Tab. 1:** Trockenmasseerträge [t/ha] verschiedener Futterleguminosen unter Trockenstress mit 25-40 % nFK (DRT) im Vergleich zu optimaler Wasserversorgung mit 70-90 % nFK (CTL); dargestellt ist jeweils der 2. Aufwuchs

Art	Variante	1. HNJ		2. HNJ		DRT <sup>1,2</sup> (2 HNJ) %
		t/ha	%	t/ha	%	
Luzerne	DRT <sup>1</sup>	1,6	46	1,1	28	37
	CTL	3,5	100	4,0	100	
Hornklee	DRT <sup>1</sup>	0,7	24	0,5	20	22
	CTL	2,9	100	2,5	100	
Kicher-Tragant	DRT <sup>1</sup>	0,6	29	0,4	17	23
	CTL	2,1	100	3,2	100	
Rotklee	DRT <sup>1</sup>	0,6	16	0,2	6	11
	CTL	3,7	100	3,0	100	
LSD (0,05) Art × Wasser		0,8		0,6		

<sup>1</sup> DRT: Bei Trockenstress trat ein höheres Blatt-Stängel-Verhältnis auf, infolgedessen höhere Futterqualität (VOM).

<sup>2</sup>DRT (2 HNJ) = Relativer Ertragsabfall der Arten unter Trockenstress im Mittel beider HNJ gegenüber der Kontrolle (CTL). PETERSON et al. 1992

Die vorliegende Versuchsanordnung von PETERSON et al. (1992) stellt sicherlich ein Extrem in Bezug auf die Trockenstressvariante dar, die während der gesamten Vegetationsperiode auf ein Niveau von 25-40 % nFK eingestellt wurde; ein Szenario, welches für Mitteleuropa nur wenig wahrscheinlich ist.

Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass die Luzerne insbesondere bei steigenden Temperaturen im Sommer eine Kulturart darstellt, der im Futterbau zukünftig wieder mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

Kleegrassysteme sind bezüglich der Sensibilität gegenüber Klimawandel immer auch in Wechselwirkung mit der Nutzungshäufigkeit und Nutzungsart zu bewerten. In der Regel erfolgt die Klee-grasnutzung z. B. im ökologischen Landbau in einem 3-Schnittsystem. Wie sich die Ertragsrelationen in Abhängigkeit der Nutzungshäufigkeit (3 versus 5 Schnitte) bzw. der Nutzungsart (Schnitt versus Weide) verändern zeigen eigene zweijährige Untersuchungen auf dem Versuchsgut Lindhof der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (KLEEN 2008).

In den Jahren 2004 und 2005 wurden diese Varianten für die Leguminosenarten Rotklee, Weißklee, Luzerne und Hornklee in binären Gemengen mit Deutschem Weidelgras untersucht. Die Durchschnittstemperaturen in der Vegetationsperiode waren mit 13,8 und 14,1 °C höher als im langjährigen Mittel (13,6°C), die Niederschlagssummen lagen in der Vegetationsperiode 2004 im Bereich des langjährigen Mittels, im Jahr 2005 mit 321 mm um 70 mm unterhalb des langjährigen Mittels.

Der Durchschnitt dieser beiden Jahre reflektiert somit näherungsweise den Trend der erwarteten Klimaänderungen bezüglich Temperatur und Niederschlag. Die Ergebnisse (Tabelle 2) zeigen die Bedeutung der Wechselwirkung Nutzungsart/-häufigkeit × Leguminosenart in der Weise auf, dass trotz Trockenstress im Jahr 2005 unter Weidenutzung bezüglich der Produktivität keine Alternative zum Weißklee formuliert werden kann, während Rotklee und Luzerne unter beiden Schnittnutzungsvarianten dem Weißklee und Hornklee überlegen sind. Dabei ist keine deutliche Überlegenheit der Luzerne gegenüber dem Rotklee zu konstatieren.

Dies bedeutet unter Berücksichtigung der Ergebnisse von PETERSON et al. (1992), dass bei Schnittnutzung und moderatem Trockenstress (wahrscheinliches Szenario für Norddeutschland) Rotklee weiterhin eine zentrale Bedeutung haben wird, während unter stärkeren Trockenstresssituationen (wahrscheinliches Szenario für Ostdeutschland) die relative Vorzüglichkeit der Luzerne zunehmen wird.

**Tab. 2:** Trockenmasse- [g TM/m<sup>2</sup> · a] und Stickstofferträge [g N/m<sup>2</sup> · a] verschiedener Leguminosen-Gras-Gemenge in Abhängigkeit von der Nutzungsart und -häufigkeit; Lindhof, 2004-2005

	3 Schnitte		5 Schnitte		Weide	
	TM Ertrag	N Ertrag	TM Ertrag	N Ertrag	TM Ertrag	N Ertrag
Weißklee	805,5 <sup>b</sup>	18,6 <sup>b</sup>	718,2 <sup>b</sup>	21,9 <sup>b</sup>	1059,2 <sup>a</sup>	26,0 <sup>a</sup>
Rotklee	895,5 <sup>a</sup>	22,0 <sup>a</sup>	678,5 <sup>b</sup>	21,1 <sup>a</sup>	842,9 <sup>*a</sup>	24,8 <sup>a</sup>
Luzerne	877,6 <sup>a</sup>	23,8 <sup>a</sup>	712,6 <sup>b</sup>	25,0 <sup>a</sup>	882,1 <sup>*a</sup>	26,9 <sup>a</sup>
Hornklee	736,1 <sup>a</sup>	17,2 <sup>a</sup>	528,4 <sup>*b</sup>	14,1 <sup>*a</sup>	854,5 <sup>*a</sup>	15,7 <sup>*a</sup>

\*signifikant unterschiedlich ( $P < 0,05$ ) zu Weißklee innerhalb der Nutzungssysteme.

<sup>a, b</sup> signifikante Unterschiede ( $P < 0,05$ ) zwischen den Nutzungssystemen innerhalb der Gemenge.

TM: SE=44,4, N: SE=1,25 ; (SE = Standardschätzfehler);  
WK = Weißklee, RK = Rotklee, LA = Luzerne, HO = Hornklee  
KLEEN (2008)

Wie in Abschnitt 4.2.1 dokumentiert, sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die klassischen Futterqualitätsparameter Verdaulichkeit der organischen Masse, Rohfasergehalt und Rohproteingehalt (VOM, ADF, RP) nicht eindeutig in der Literatur beschrieben. Während eine gesteigerte Kohlendioxidkonzentration – wie ausgeführt - in einigen Untersuchungen ohne Auswirkungen blieb, zeigen andere Autoren einen positiven Effekt auf die Gehalte an Nichtstrukturkohlenhydraten und abnehmende Rohproteingehalte im Erntegut (LILLEY et al. 2001; Allard et al., 2003). Extremer Trockenstress erhöht die VOM, moderater Trockenstress dagegen nicht (SKINNER et al. 2004).

Somit sind die Effekte des prognostizierten Klimawandels auf die klassischen Futterqualitätsparameter vergleichsweise unsicher abzuschätzen. Neuere Arbeiten aus unserem Hause zeigen jedoch, dass die Kombination aus Trockenstress und steigenden Temperaturen die Gehalte an sekundären Inhaltsstoffen maßgeblich erhöht, so wie dies für phenolische Substanzen u.a. von Niklaus (2007) postuliert wird.

In Untersuchungen an Rotklee konnte EICKLER (2008) zeigen, dass die Polyphenoloxidase (PPO)-Aktivität durch die beschriebene Kombination aus Trockenstress und hohen Temperaturen um den Faktor 5-6 gesteigert wird (Abb. 5). Die PPO-Aktivität ist von Relevanz für den Proteinabbau von Rotklee-Proteinen. Erhöhte PPO-Aktivitäten führen zu einer Hemmung des Proteinabbaus im Silo (LEE et al. 2004) sowie im Pansen (JONES et al. 1994) und erhöhen somit die verfügbare Proteinmenge am Duodenum (Zwölffingerdarm), was zu einer potentiell erhöhten Stickstoffnutzungseffizienz des Tieres führt (Verringerung von Milch- und Blutharnstoffgehalten, siehe BRODERICK et al. 2007). In diesem Bereich steht die Forschung noch vergleichsweise am Anfang, aber die züchterische Beeinflussung dieser sekundären Inhaltsstoffe ist eine viel versprechende Strategie, um die Proteinqualität von Futterleguminosen unter Berücksichtigung des Klimawandels zu steigern.

#### **4.2.3 Getreide-Ganzpflanzen**

Gemenge aus Körnerleguminosen- und Getreideganzpflanzen bzw. reine Getreideganzpflanzensilagen (GPS) stellen in Milchvieh-Futterbaubetrieben eine dritte Säule der Grobfutterproduktion dar. In der Literatur sind Effekte einer CO<sub>2</sub>-Konzentrationssteigerung auf Ertrag und Qualität von Getreideganzpflanzen dahin gehend dokumentiert, dass neben einer Ertragssteigerung insbesondere die Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten in Halm und Blättern deutlich ansteigen (WALL et al. 2006), was einen direkten Einfluss auf die Silierbarkeit und die Energiedichte zur Teigreife (optimaler Nutzungstermin) induziert.

Hierzu ist jedoch anzumerken, dass bei Verwendung von Sommergetreide diese potentiell positiven Effekte durch Frühsommertrockenheit in Verbindung mit noch schwach ausgeprägten Wurzelsystemen konterkariert werden können.

## 4.3 Optimierungsstrategien

### 4.3.1. Grünland

Die in Abschnitt 4.1 dargestellten Effekte der erwarteten Klimaänderung machen deutlich, dass die relative Konkurrenzfähigkeit von Leguminosen und krautartigen Pflanzen mit zunehmender Kohlendioxidkonzentration in der Luft ansteigt. Das bedeutet, dass diesen funktionellen Pflanzengruppen bei der Grünlandbewirtschaftung in semi-intensiven Futterproduktionssystemen eine zunehmende Bedeutung zukommt, die durch produktionstechnische Maßnahmen zu optimieren ist.

SKINNER et al. (2004) haben zu diesem Zweck unter den klimatischen Bedingungen der Nordoststaaten der USA die Hypothese überprüft, ob artenreiche Mischungen unter Einbeziehung der funktionellen Gruppen Gräser, Kräuter und Leguminosen binären Gemengen von Gras- und Leguminosenpartnern überlegen sind, wobei als zusätzliche Variante Trockenstress geprüft wurde.

Insbesondere die Einbeziehung des tief wurzelnden Chicorees reduzierte die Sensitivität gegenüber Trockenstress und erhöhte die Futterqualität. Da die klimatischen Bedingungen am Versuchstandort denen in Nordwesteuropa ähnlich sind, sind Ansätze, die Ertragssicherheit unter Bedingungen zunehmenden Trockenstresses über eine größere Artendiversität in der Ansaatmischung verfolgen, viel versprechend. Dies gilt besonders in nährstofflimitierten Systemen ist aber auch für Intensivsysteme dokumentiert (Kirwan et al., 2007).

Auch über gezielte Maßnahmen der Nachsaat ist in diesem Zusammenhang zu diskutieren. Da in den Nordoststaaten der USA aufgrund des kontinentaleren Klimas im Sommer das Knaulgras die bestandsdominierende Grasart darstellt, sind diese Ergebnisse für die zu erwartenden Bedingungen in Ostdeutschland relevant. Hingegen sollte in Nordwestdeutschland selbst bei moderat reduzierter Wasserverfügbarkeit das Deutsche Weidelgras aufgrund der besseren Futterqualität im Vergleich zum Knaulgras die Grünlandbestände dominieren.

Untersuchungen unserer Gruppe (WULFES und TAUBE 2001) haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit binärer Gemenge aus Deutschem Weidelgras und Weißklee maßgeblich durch die Wahl des Sortentyps (beim Deutschen Weidelgras) gesteuert werden kann (Abb. 6). Während in konventionellen Grünlandsystemen derzeit den spät abreifenden tetraploiden Sortentypen eine besondere Aufmerksamkeit zuteil wird, ist unter semi-intensiven Produktionssystemen, wie dem ökologischen Landbau, den früh abreifenden Sortentypen der Vorzug zu geben. Diese können (a) die Winterfeuchtigkeit für die Ertragsbildung im ersten Aufwuchs besser nutzen, und (b) lässt die Konkurrenzfähigkeit dieser Sortentypen im Hochsommer gegenüber dem Weißklee nach, was mithin höhere Weißkleeanteile und Stickstofffixierungsleistungen zulässt. Da die Ertragssicherheit im ersten Aufwuchs eine besondere wirtschaftliche Bedeutung hat, ist diesen Zusammenhängen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Schließlich kommen der Grundnährstoffversorgung und dem pH-Wert gerade unter zunehmenden Trockenstressbedingungen im Futterbau besondere Bedeutung im Hinblick auf

die Wassernutzungseffizienz zu. Arbeiten aus unserem Hause zeigen, dass in dieser Hinsicht aktuell erhebliche Defizite in der Grünlandwirtschaft zu konstatieren sind (TREYSE et al. 2008).

Eine offene Frage ist die nach der Zukunft der Weidenutzung in Deutschland: Während in den neuen Bundesländern mit Niederschlagssumme unter 600 mm/Jahr und einer prognostizierten weiteren Abnahme der Niederschlagssummen die Weidehaltung zunehmend problematisch werden dürfte, kann für den nordwestdeutschen Klimaraum ähnlich wie dies für England prognostiziert wird (DEFRA, 2000) mit einer erhöhten Konkurrenzfähigkeit der Weidenutzung gerechnet werden, da die Ausdehnung der Vegetationsperiode dieser Nutzungsform besonders entgegen kommt. Inwieweit sich unter diesen Voraussetzungen in der intensiven Weidewirtschaft die Beregnung in Trockenperioden im Sommer ökonomisch rentiert, ist eine Frage, die bisher unter den hiesigen Umweltverhältnissen nicht beantwortet ist. Arbeiten aus den Niederlanden und der Schweiz (Hack-Ten Broeke, 2001; Jeangros und Bertola, 2001) zeigen jedoch eine hohe Effizienz der Beregnung von Weiden im Hinblick auf Ertrag und Futterqualität. Bezüglich des Wasserhaushalts wäre eine solche Maßnahme nicht grundsätzlich in Frage zu stellen in Regionen, die durch Grundwasserneubildungsraten von mehr als 200 mm/Jahr geprägt sind.

### **4.3.2 Mais und Leguminosen-Gras-Systeme**

Wie in Abschnitt 4.2.1 ausgeführt, wird Mais zu den „Gewinnern“ des Klimawandels gehören und dementsprechend wird seine Anbaubedeutung weiter steigen. Die zentrale Voraussetzung für einen erfolgreichen und umweltverträglichen Anbau des Silomaises ist jedoch in der Einhaltung von Fruchtfolgen zu sehen, um die oben skizzierten Reduktionen der Bodenfruchtbarkeit und des Abbaus organischer Substanz im Boden zu kompensieren. Damit gewinnen weitere Kulturarten des Ackerfutterbaus an Bedeutung, insbesondere Futterleguminosen-Gras-Gemenge aufgrund der besseren Ausnutzung der Bodenwasservorräte im Vergleich zu reinen Gräserbeständen. Diesbezüglich sind experimentelle Arbeiten zur Optimierung von leistungsfähigen Futterbaufruchtfolgen für die verschiedenen Klimaräume notwendig, um regionsspezifische Anbaustrategien zu entwickeln.

## **5. Forschungsbedarf**

Die Ausführungen haben gezeigt, dass die Datengrundlage zur Abschätzung von Klimawandelwirkungen auf die Futterproduktion nach wie vor vergleichsweise unsicher ist. Es fehlen langjährige Versuchsserien, die die mittelfristigen Effekte des Klimawandels mit Hilfe von Simulationsmodellen besser prognostizierbar gestalten. So sind insbesondere die Effekte auf die Akkumulation bzw. Umsetzung der organischen Substanz im Boden und die daraus resultierende veränderte Stickstoffdynamik in semi-intensiven stickstofflimitierten Produktionssystemen wie in intensiven Futterbausystemen bisher nicht ausreichend quantifiziert. Ein großer Forschungsbedarf wird darüber hinaus bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Futterqualität gesehen, da dieser Bereich bisher in vielen Studien

vernachlässigt wurde. Es wird postuliert, dass die gezeigten Wechselwirkungen von Trockenstress und hohen Temperaturen auf die Ausprägung der Gehalte an Futterwert bestimmenden sekundären Inhaltsstoffen bei Futterleguminosen ein Ansatzpunkt sind, um die Proteinqualität zu steigern und damit die Versorgung mit „home grown proteins“ unter den Bedingungen des Klimawandels zu steigern.

## 6. Literatur

- Allard, V., Newton, P.C.D., Lieffering, M., Clark, H., Matthew, C., Soussana, J.-F., Gray, Y.S. (2003): Nitrogen cycling in grazed pastures at elevated CO<sub>2</sub>, N returns by ruminants. *Glob. Change Biol.* 9, 1731-1742.
- Aiking, H., Boer, J. de, Vereijken, J.M. (Hrsg.) (2006): Towards sustainable protein production and consumption, pigs or peas? Dordrecht, Springer Verlag.
- Allen Jr., L.H., Baker, J.T., Boote, K.J. (1996): The CO<sub>2</sub> fertilization effect, higher carbohydrate production and retention as biomass and seed yield. In: Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant processes. FAO, Rome, Italy.
- Basset-Mens C., Ledgard S., Boyes M. (2008) Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Journal of Ecological Economics* 68: 1615-1625.
- Broderik, G.A., Brito, A.F, Olmos-Colmenero, J.J (2007): Effects of feeding formate-treated alfalfa silage or red clover silage on the production of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 90: 1378-1391.
- Casella, E., Soussana, J.F. (1997): Long term effects of CO<sub>2</sub>, enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grass sward. *Journal of Experimental Botany* 48: 1309-1321.
- Daepf, M., Nösberger, J., Lüscher, A. (2001): Nitrogen fertilization and developmental stage alter the response of *Lolium perenne* to elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytol.* 150, 347-358.
- DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs) (2000): Climate Change and Agriculture in the United Kingdom. 71 S. Zugriff. 12/2005 unter: <http://www.defra.gov.uk/farm/environment/climate-change/impact/climate.pdf>.
- Eickler, B. (2008): Nutritive value of forage legumes with special reference to polyphenol oxidase activity in red clover. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Band 59. Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Ewert, F., Rousevell, M.D.R., Reginster, I., Metzger, M.J., Leemans, R. (2005): Future scenarios of European agriculture land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107: 101-116.
- Fuhrer, J. (2003): Agroecosystem responses to combinations of elevated CO<sub>2</sub>, ozone and global climate change. *Agr. Ecosyst. Environ.* 97, 1-20.
- Hack-Ten Broeke, M.J.D. (2001): Irrigation management for optimizing crop production and nitrate leaching on grassland. *Agricultural Water Management*, 49: 97-114
- Hebeisen, T., Lüscher, A., Zanetti, S., Fischer, B.U., Hartwig, U.A., Frehner, M., Hendrey, G.R., Blum, H., Nösberger, J. (1997): Growth response of *Trifolium*

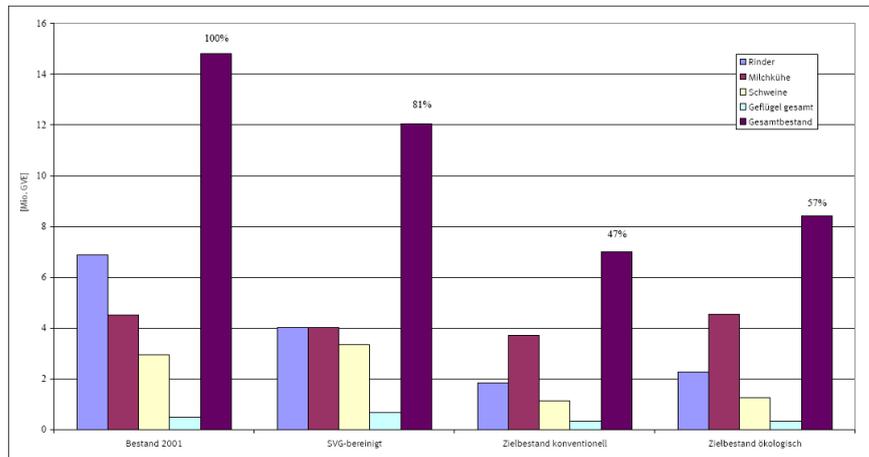
- repens* L. and *Lolium perenne* L. as monocultures and bi-species mixture to free air CO<sub>2</sub> enrichment and management. *Global Change Biology* 3: 149-160.
- Herrmann, A., Kornher, A., Taube, F. (2004): Ertragsentwicklung von Silomais und Deutschem Weidelgras – Zuchtfortschritt oder Klimawandel? *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 16: 99-100.
- Jeangros, B., Bertola, C. (2001): Effects of irrigation of permanent grassland in a mountain region of Switzerland. *Journal of Swiss Agricultural Research*, 8: 174-179
- Jones G.A., McAllister, T.A., Muir, A.D., Cheng, K.-J. (1994): Effects of sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) condensed tannins on growth and proteolysis by four strains of ruminal bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 60 (4): 1374-1378.
- Kelm M, Wachendorf M, Trott H, Volkens K, Taube F (2004) Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. III. Energy efficiency in forage production from grassland and maize for silage. *Grass and Forage Science* 59, 69-79.
- Kleen, J. (2008): Ertragsleistung und Futterqualität verschiedener Leguminosen in binären Gemengen mit Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.). Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Band 56. Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Lampe, C., Dittert, K., Sattelmacher, B., Wachendorf, M., Loges, R., and Taube, F. (2006). Sources and rates of nitrous oxide emissions from grazed grassland after application of <sup>15</sup>N-labelled mineral fertilizer and slurry. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 2602-2613.
- Lee, M.R.F., Winters, A.L., Scollan, N.D., Dewhurst, R.J., Theodorou, M.K., Minchin, F.R. (2004): Plant-mediated lipolysis and proteolysis in red clover with different polyphenol oxidase activities. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84: 1639-1645.  
<http://www3.interscience.wiley.com/journal/109581774/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0> (30.9.08)
- Lilley, J.M., Bolger, T.P., Peoples, M.B., Gifford, R.M. (2001): Nutritive value and the nitrogen dynamics of *Trifolium subterraneum* and *Phalaris aquatica* under warmer, high CO<sub>2</sub> conditions. *New Phytologist* 150 (2): 385-395.
- Lüscher, A., Hendrey, G.R., Nösberger, J. (1998): Long-term responsiveness to free air CO<sub>2</sub> enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland. *Oecologia* 113: 37-45.
- Lüscher, A., Hartwig, U.A., Suter, D., Nösberger, J. (2000): Direct evidence that symbiotic N<sub>2</sub> fixation in fertile grassland is an important trait for a strong response of plants to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 6: 655-662.
- Manderscheid, R., Nozinski, E., Weigel, H.-J. (2009): Freilanduntersuchungen zu Rückkopplungseffekten zwischen zukünftigen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Wasserhaushaltsgrößen in Maisbeständen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwissenschaften*, 2009
- Mikkelsen, T.N., Beier, C., Jonasson, S., Holmstrup, M., Schmidt, I., Ambus, P., Pilegaard, K., Larsen, K.S., Carter, M.S., Ibrom, A., Martinussen, T., Miglietta,

## Vorträge

- F., Sverdrup, H. (2008): Experimental design of multifactorial climate change experiments with elevated CO<sub>2</sub>, warming and drought: the CLIMAITE project. *Functional Ecology* 22: 185-195.
- Morgan, J.A., Pataki, D.E., Korner, C., Clark, H., Del Grosso, S.J., Grunzweig, J.M., Knapp, A.K., Moision, A.R., Newton, P.C.D., Niklaus, P.A., Nippert, J.B., Nowak, R.S., Parton, W.J., Polley, H.W., Shaw, M.R. (2004): Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Oecologia* 140: 11-25.
- Niklaus, P.S. (2007): Climate Change Effects on Biogeochemical Cycles, Nutrients, and Water Supply. In: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus P.A. (Hrsg.) *Agroecosystems in a Changing Climate*. CRC Press, Florida, S. 11-52.
- Ottman, M.J., Kimball, B.A., Pinter, P.J., Wall, G.W., Vanderlip, R.L., Leavitt, S.W., Lamporte, R.L., Matthias, A.D., Brooks, T.J. (2001): Elevated CO<sub>2</sub> increases sorghum biomass under drought conditions. *New Phytol.* 150 (2) 261-273,
- Peterson, P.R., Sheaffer, C.C., Hall, M.H. (1992): Drought Effects on Perennial Forage Legume Yield and Quality. *Agronomy Journal* 84: 774-779.
- Sedorovich DM, Rotz CA, Richard TL (2007) Greenhouse gas emissions from dairy farms. *ASAE Annual Meeting* 074096.
- Senbayram, R.C., Mühling, K.H., Dittert, K. (2009): Contributions of nitrification and denitrification to nitrous oxide emissions from soils after application of biogas waste and other fertilizers. *Rapid Communications in Mass Spectroscopy* 23: 2489-2498
- Skinner, R.H., Gustine, D.L., Sanderson, M.A. (2004): Growth, water relations, and nutritive value of pasture species mixtures under moisture stress. *Crop Science* 44: 1361-1369.
- Treyse, K., Kelm, M., Mehrtens, H., Taube, F. (2008): Ein Indikatoransatz zur Bewertung der Nachhaltigkeit von intensiv genutzten Grünlandbeständen. *Berichte über Landwirtschaft* 86 (1): 79-103.
- Vertès F, Hatch D, Velthof G, Taube F, Laurent F, Loiseau P, Recous S (2007). Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. *Grassland Science in Europe* 12: 227-246.
- Wall, G.W., Garcia, R.L., Kimball, B.A., Hunsacker, D.J., Pinter, P.J., Long, S.P., Osborne, C.P., Hendrix, D.L., Wechsung, F., Leavitt, S.W., LaMorte, R.L., Idso, S.B. (2006): Interactive effects of elevated carbon dioxide and drought on wheat. *Agronomy Journal* 98: 354-381.
- Wienforth B (2008) Standortgerechte Wahl von Energiepflanzen für die Biogasproduktion: Modellgestützte Analyse des Trockenstresseinflusses auf das Ertragspotenzial von Silomais. In: Kage et al. (Eds.) *Modellierung des Systems Nutzpflanze-Boden – Herausforderungen des 21. Jahrhunderts*, 26.-27.2.2009, Kiel (in Druck).
- Wulfes, R., Taube, F. (2001): Einfluss des Sortentypes von Deutschem Weidelgras auf Leistungsfähigkeit und Weißkleekompatibilität. S. 3-10. In: DLG (Hrg.): *Fachtagung des DLG-Ausschusses „Gräser, Klee und Zwischenfrüchte“*, Fulda, 4.-5-Dez. 2001. *Arbeitsunterlagen* 43. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, Frankfurt a.M.

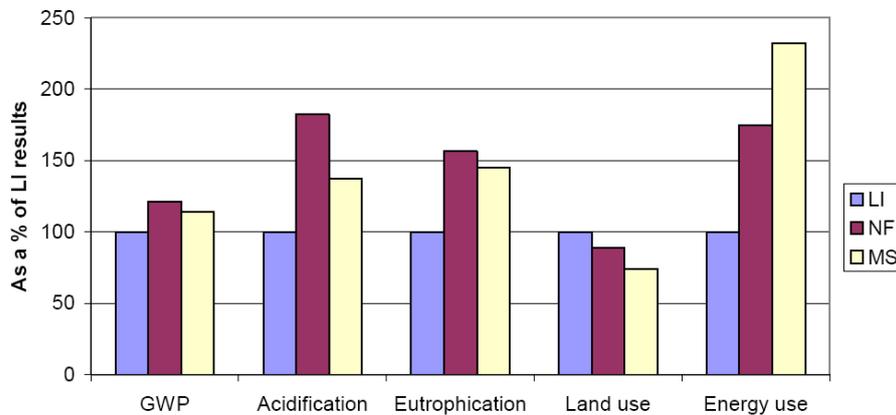
Woitowitz, A. (2007): Auswirkungen einer Einschränkung des Verzehrs von Lebensmitteln tierischer Herkunft auf ausgewählte Nachhaltigkeitsindikatoren-dargestellt am Beispiel konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise. Diss. oec.-troph., TUM München, Weihenstephan

Abbildung 2: Vergleich der für die Proteinversorgung der deutschen Bevölkerung erforderlichen Tierbestände in Großvieheinheiten (GVE) und bezogen auf den realen Tierbestand von 2001



Quelle: BMVEL 2001; DBV 2002 („SVG-bereinigt“ bedeutet der Tierbestand, der für die derzeitige Versorgung der Bevölkerung notwendig wäre, wenn in allen Sparten eine komplette Selbstversorgung vorherrschen würde).

Abb. 1: Vergleich der für die Proteinversorgung der deutschen Bevölkerung erforderlichen Tierbestände in Großvieheinheiten und bezogen auf den realen Tierbestand 2001 (Woitowitz, 2007)



LI= Low input system (0 Nfert, 2.3 cows/ha);  
 NF= N fertiliser system (170 kg N/ha, 3 cows/ha);  
 MS= Moderate supplement system (170 kg N/ha, 13 tDM maize silage/ha, 5.3 cows/ha)

Abb. 2: „Ökoeffizienz“ und „carbon footprint“ verschiedener Milchproduktionssysteme in Neuseeland (Basset-Mens et al., 2008)

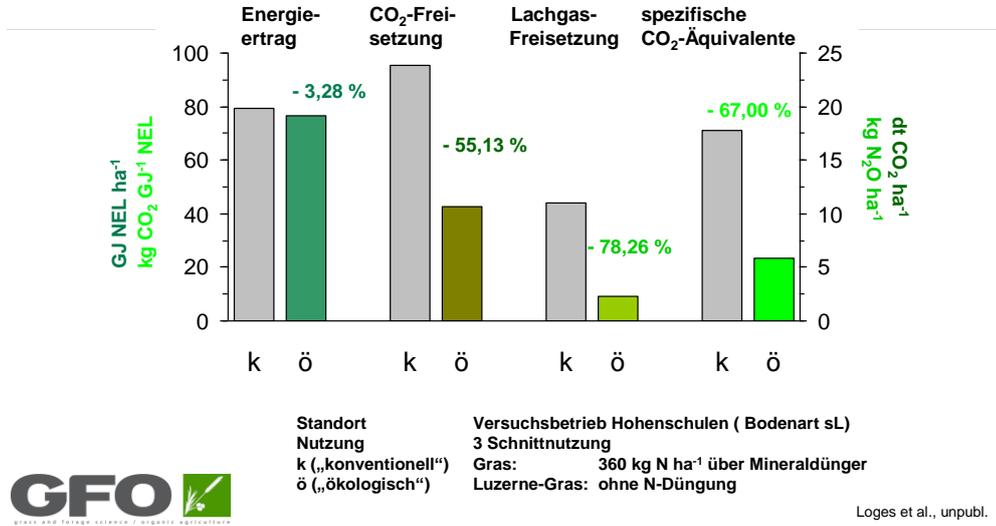


Abb. 3: „Carbon footprint“ eines gedüngten Gras- und eines ungedüngten Luzerne-Grasbestandes

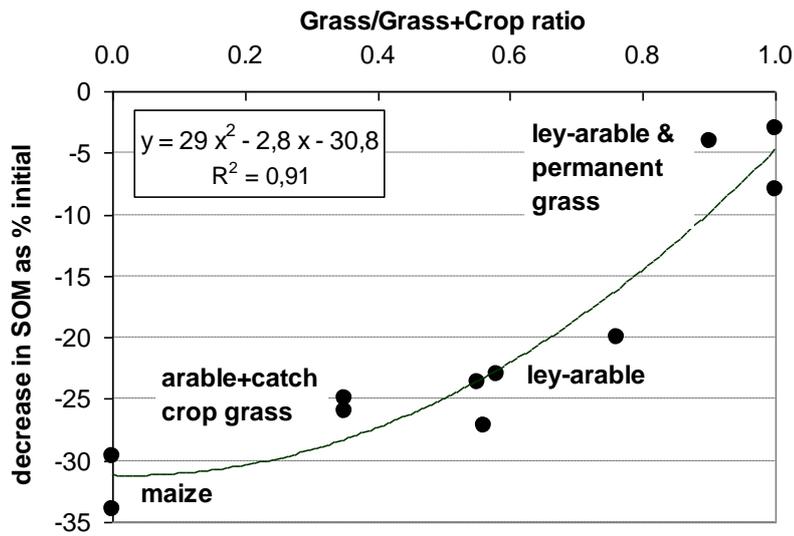


Abb. 4: Beziehung zwischen organischer Masse des Bodens (SOM) und dem Anteil Gras in Ackergrasfruchtfolgen nach 28 Jahren unterschiedlicher Bewirtschaftung (Vertès et al., 2005).

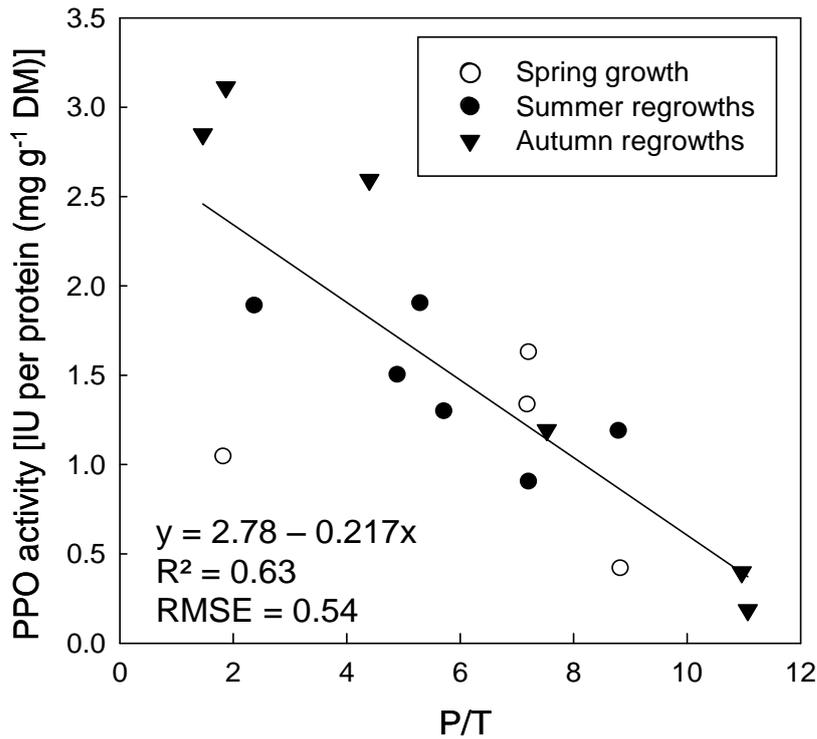


Abb. 5: Einfluss des Quotienten aus Niederschlag (P) und Temperatur (T) auf die Polyphenoloxidase-Aktivität von Rotklee (Spring growth = Primäraufwuchs Frühjahr; Summer regrowths = 2. bzw. 3. Aufwuchs im Sommer; Autumn regrowths = 4. Aufwuchs Herbst) (EICKLER 2008)

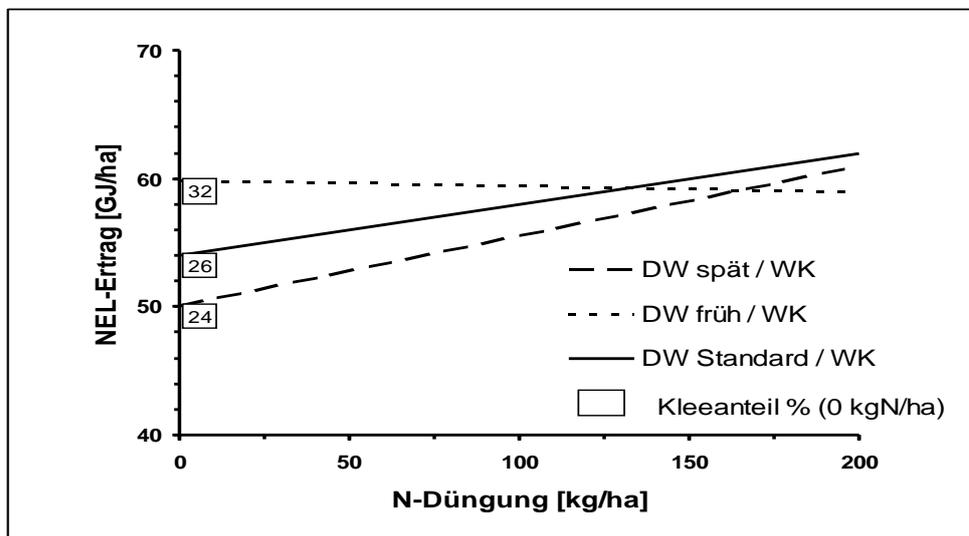


Abb. 6: Einfluss des Deutsch' Weidelgras (DW) - Sortentyps in binären Gemengen mit Weißklee auf den Energieertrag (Mischung DW früh = 45 % Gremie + 45 % Bastion + 10 % Milkanova; Mischung DW spät: 45 % Condesa + 45 % Vigor + 10 % Milkanova; Mischung DW Standard: je 22,5 % Bastion, Gremie, Condesa, Vigor + 10 % Milkanova; Signifikanz F-Wert Wechselwirkung Sortentyp x Stickstoffdüngung: \*\*\*) (WULFES und TAUBE, 2001)