Department für Nutzpflanzenwissenschaften,
Abteilungen Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung,
der Georg-August-Universität Göttingen

Evaluierung von Winterackerbohnen als Zwischenfrucht für eine ökologische Biogasproduktion

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Franziska Roth

geboren in Heidelberg

Göttingen, im Juli 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010
Zugl.: Göttingen, Univ. Diss., 2010

978-3-86955-438-9

D7

Referent: Professor Dr. Rolf Rauber

Korreferent: Professor Dr. Wolfgang Link

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Juli 2010

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2010
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-438-9

Meiner Mutter

Inhaltsverzeichnis

1 Prolog 1

2 Anbau von Winterackerbohnen als Zwischenfrucht für die Biogasproduktion 7

3 Selektion auf Frosttoleranz von Winterackerbohnen 59

4 Epilog 76

5 Zusammenfassung 83

6 Literaturverzeichnis 86

1 Prolog

Die weltweiten Rohstoffvorräte sind begrenzt und die Prognosen hinsichtlich des Klimawandels beunruhigend. Ein effizienter und umweltverträglicher Einsatz und bewusster Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen ist für eine nachhaltige Entwicklung wichtiger denn je (FUCHS 2009). Deshalb hat sich die deutsche Bundesregierung zwei wichtige Ziele gesetzt: Die Energieproduktivität soll pro Jahr um 3% gesteigert werden und die Treibhausgasemissionen sollen bis 2020 gegenüber 1990 um 40% gesenkt werden (BUNDESREGIERUNG 2008). Nicht nur in Deutschland sondern weltweit ist es wichtig, dass fossile Energie zukünftig durch anderweitig gewonnene Energie ersetzt wird (BÖHME ET AL. 2009). Aus diesem Grund werden in zunehmendem Maße Sonnen- und Windenergie genutzt und gefördert, Heizungen mit Holzpellets oder Getreide betrieben, und hybridangetriebene Autos weiterentwickelt. Auch die Erzeugung von Biogas aus landwirtschaftlichen Rohstoffen trägt, wenn sie richtig angewendet wird, in besonderer Weise zu einer nachhaltigen Energienutzung bei. Durch gesetzliche und finanzielle Anreize der Politik hat die Biogaserzeugung aus Rohstoffen der Landwirtschaft in den letzten Jahren in Europa stark an Bedeutung gewonnen (AMMON ET AL. 2003B).

Die Entstehung von Biogas ist kein neuer technischer Prozess, sondern ein natürlicher durch Bakterien verursachter Faulprozess (Gärung), der unter Luftabschluss durchaus auch ohne menschlichen Einfluss, z.B. in Seen und Tümpeln, vorkommen kann. Hierbei wird organische Substanz in eine brennbare Gasmischung aus Methan, Kohlenstoffdioxid und zu geringen Anteilen Stickstoff, Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Wasserstoff und Ammoniak umgewandelt. Dieses ebenso beim gesteuerten Biogasprozess in Fermentern entstehende brennbare Gas ist das sogenannte Biogas und treibt entweder Stromgeneratoren an oder wird aufbereitet ins Erdgasnetz eingespeist. Die bei der Verbrennung des Methans frei werdende Energie stammt ausschließlich aus der verwendeten Biomasse, ist also durch Pflanzen gespeicherte Sonnenenergie. Unter anderem deshalb gilt die so gewonnene Energie als ideale „Öko-Energie“, um den Klimaschutz zu verbessern und auch um die Abhängigkeit von Energieimporten zu senken.

Um langfristige und auch nachhaltige Erfolge zu gewährleisten, darf sich nicht nur auf die Betrachtung des Biogasprozesses beschränkt werden. Vielmehr muss der Energiepflanzenanbau für die Biogasproduktion auch nach den Grundsätzen einer nachhaltigen Fruchtfolge und Bodenfruchtbarkeit gestaltet werden (HRBEK ET AL. 2007).

Als Substrat für die Biogasproduktion können viele verschiedene Pflanzen eingesetzt werden. Häufig verwendete Energiepflanzen sind derzeit Mais, Sonnenblumen, Roggen und Sudangras. Nach wie vor ist Mais für die Biogaserzeugung als Rohstoff die bedeutendste Frucht, da mit ihm sehr hohe Erträge und Energiekonzentrationen erreicht werden können (AMMON ET AL. 2006). So betrug die Maisanbaufläche in Deutschland im Jahr 2008 insgesamt 2,19 Mio. ha. Nur ca. 13 000 ha davon wurden ökologisch bewirtschaftet (SCHMIDT & BURGER 2010). Mais weist als C_4-Pflanze, im

Vergleich zu den meisten bei uns einheimischen Kulturarten nicht nur ein deutlich höheres Ertragspotential auf, sondern ist zusätzlich gut silierbar. Ausreichend gute Silierfähigkeit ist die Voraussetzung für die Lagerfähigkeit und kontinuierliche Beschickung von Biogasanlagen. Desweiteren ist beim Mais die Züchtung schon im Sinne der Biogasproduktion aktiv, und es liegen pflanzenbauliche Erfahrungen mit dem Maisanbau zur Produktion von Biomasse für Biogas vor: Anbausystem, Ernte- und Konservierungstechnik sind entwickelt, bekannt und auch weitgehend ausgereift. Da standortübergreifend mit Mais sehr hohe Methanhektarerträge erzielt werden können, hat sich Mais als wichtigste rohstofflieferende Pflanze für die Biogasproduktion etabliert (GÖDEKE ET AL. 2007).

Mais als alleinige Hauptfrucht ist vor allem in konventionell bewirtschafteten Landwirtschaftsbetrieben die häufigste Anbauform. Nicht immer werden hierbei die Grundzüge der Pflanzenproduktion genügend beachtet und es kann zu Anbauproblemen wie z.B. unzureichende Stickstoffversorgung, Schwierigkeiten bei der Unkrautregulierung und Umweltgefährdungen wie z.B. Bodenerosion oder Nährstoffaustrag kommen (STEMANN & LÜTKE ENTRUP 1990, BECKMANN & KOLBE 2000, GRASS 2003, GRASS & SCHEFFER 2003). Aus diesen Gründen wird der Maisanbau oft als umweltschädlich dargestellt und ist im ökologischen Landbau nicht sehr beliebt (BECKMANN & KOLBE 2000). Dieses Image resultiert auch aus den hohen Nährstoff- und Vorfruchtansprüchen des Maises.

Der ökologische Landbau gehört zu den Pionieren der Biogasnutzung und auch hier gewinnt die Erzeugung von Energie aus ökologisch unbedenklichen, nachwachsenden Quellen zunehmend an Bedeutung (ANSPACH & MÖLLER 2008, ANSPACH & MÖLLER 2009). So gehören ca. 5% aller Biogasanlagen in Deutschland zu ökologisch wirtschaftenden Landwirtschaftsbetrieben. Der Gedanke des geschlossenen Betriebskreislaufs, der im ökologischen Landbau eine wichtige Rolle spielt, wird durch die Vergärung von pflanzlicher Biomasse gestärkt, da Gärreste wieder zur Düngung verwendet werden können und so vor allem Stickstoff als wichtiger Nährstoff nicht nur im System gehalten wird, sondern auch umverteilt werden kann (MÖLLER 2003).

Wie konventionell wirtschaftende Betriebe streben auch ökologisch wirtschaftende den Anbau von Pflanzen an, die möglichst hohe Biomasse- und Methanerträge in standortangepassten, gesunden und nachhaltigen Fruchtfolgesystemen liefern können. Gleichzeitig darf dabei der Gedanke des geschlossenen Nährstoffkreislaufes nicht vernachlässigt werden, einseitige Fruchtfolgen sollen vermieden werden und ein möglichst breites Spektrum an Pflanzenarten gegeben sein. Auch für ökologisch wirtschaftende Betriebe stellt sich die Anforderung wirtschaftlich lohnende Anbauverfahren zur Produktion nachwachsender Rohstoffe zu verwenden. Deshalb stellt auch im ökologischen Landbau Mais ein wichtiges Substrat für die Vergärung in Biogasanlagen dar (ANSPACH & MÖLLER 2007).

Um den Maisanbau sinnvoll zu ergänzen und umweltgerecht zu gestalten, müssen vor allem für ökologisch wirtschaftende Betriebe verbesserte Anbausysteme und Produkti-

onsverfahren gefunden und weiter optimiert werden (STETMANN & LÜTKE ENTRUP 1990).

Der Anbau von abfrierenden Zwischenfrüchten vor Mais ermöglicht Bodenbedeckung vor und über den Winter und führt zu kurzfristiger Stickstoffkonservierung. Nach dem Abfrieren der Pflanzen kann es jedoch vor allem bei Temperaturen über 4°C zu Mineralisation und erneut zu Stickstoffauswaschungen kommen. Es können aber auch winterharte Zwischenfrüchte vor Mais angebaut werden. Sie dienen wie abfrierende Zwischenfrüchte der Bodenbedeckung und dem Schutz vor Nährstoffauswaschung (NEUBAUER & KOHLS 1994).

Winterzwischenfrüchte können in Kombination mit Zweitfrüchten wie Mais das sogenannte Zweikulturnutzungssystem ergeben (VETTER 2007). Vielfältige Zwischen- und Zweitfrüchte können mit diesem System für die Biogasproduktion angebaut werden. Als Winterzwischenfrüchte eignen sich neben Roggen auch Raps, Rübsen oder andere Getreidearten. Als Zweitfrucht wird meistens Mais verwendet. Sonnenblumen, Hirsen oder Hanf sind weniger oft zu finden (SCHEFFER & KARPENSTEIN-MACHAN 2000). Der Grundgedanke von Zweikulturnutzungssystemen beruht nicht nur auf der Minimierung der Umweltgefährdungen des Maisanbaus, sondern auch auf einer Verlängerung der genutzten Vegetationszeit durch den Anbau von zwei Kulturen innerhalb eines Jahres (SCHEFFER 2000).

Das im konventionellen Landbau bereits etablierte Zweikulturnutzungssystem mit Winterroggen als winterharte Zwischenfrucht vor Mais bietet im Gegensatz zu abfrierenden Vorfrüchten vor Mais Vorteile: Da Winterroggen winterhart ist, kann der in der Pflanzenmasse enthaltene Stickstoff nicht wie bei abfrierenden Zwischenfrüchten wieder mineralisiert werden (LÜTKE ENTRUP & ZERHUSEN 1992). Es findet also keine Stickstofffreisetzung, sondern Stickstoffkonservierung und -aufnahme statt, wodurch die Stickstoffauswaschungsgefahr verringert werden kann. Zusätzlich kann der Biomasseaufwuchs der Winterzwischenfrüchte zur Methanproduktion in Biogasanlagen genutzt werden.

Die Ziele einer ackerbaulichen Biomasseproduktion wie hohe Biomasse- und Biogaserträge pro Fläche einerseits und ökologische Anbauverfahren ohne Pestizide, Bodenerosion und grundwasserbelastende Nährstoffausträge andererseits, können mit Zweikulturnutzungssystemen erreicht werden (SCHEFFER & KARPENSTEIN-MACHAN 2001). Desweiteren zeichnen sich diese Anbausysteme auch dadurch aus, dass sie die Fruchtfolge auflockern und die Biodiversität erhöhen. Da die Erstkultur (Winterzwischenfrucht) wie auch die Zweitkultur in Form von Biomasse genutzt wird, ist eine Ausreife der Winterzwischenfrucht nicht nötig. Hierdurch bleibt genügend Vegetationszeit zum Anbau einer Zweitkultur. Durch Ausnutzung der gesamten Vegetationsperiode können bis zu 19% höhere TM-Erträge als alleinigem Hauptfruchtanbau erzielt werden (STÜLPNAGEL 2007, TOEWS ET AL. 2008).

Da im ökologischen Landbau auf mineralische Stickstoffdüngemittel verzichtet wird, ist der Stickstoffbedarf der oben aufgezählten Winterzwischenfrüchte problematisch. Es muss also weiter nach Anbausystemen gesucht werden, die sowohl die Umweltgefährdungen des Maisanbaus minimieren, hohe Flächenerträge ermöglichen und gleichzeitig nicht zu stickstoffintensiv sind, um für den ökologischen Landbau geeignet zu sein.

Das von GRASS & SCHEFFER (2005) entwickelte Zweikulturnutzungssystem verwendet die Leguminose Wintererbse als Winterzwischenfrucht vor Mais. Die Fähigkeit der Leguminose Luftstickstoff zu binden und mit diesem auch die Folgefrüchte zu versorgen, ist für den ökologischen Landbau essentiell. Allerdings ist die Anbauwürdigkeit von Wintererbsen als Winterzwischenfrucht für die Biogasproduktion vor Mais umstritten, da mit ihr nicht immer ausreichende Erträge erzielt werden können und auch die technische Erntbarkeit nicht immer gegeben ist (KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000, ROTH & RAUBER, UNVERÖFF.). Es stellt sich deshalb die Frage, welche zusätzliche Winterleguminose in einem Zweikulturnutzungssystem für den ökologischen Landbau anbauwürdig sein könnte.

Die Arbeitsgruppe „Züchtungsforschung Ackerbohne“ der Abteilung Pflanzenzüchtung der Georg-August-Universität Göttingen arbeitet seit 1989 mit Winterackerbohnen. Diese Arbeiten führten zu einem weltweit einzigartigen genetischen Material. Die Ackerbohne ist eine „Low-Input-Frucht“, die wie auch andere Körnerleguminosen durch ihre Vorteile für die Fruchtfolge gut zum ökologischen Landbau passt. Durch ihre Stickstofffixierleistung kann der Stickstoffdüngemittelbedarf und so der Verbrauch fossiler Energie, die für dessen Herstellungsprozess aufgewendet werden muss, gesenkt werden (GHAOUTI 2007). Im hier vorgestellten Projekt wurde deshalb ein Zweikulturnutzungssystem mit der Winterackerbohne anstelle von Wintererbse als Zwischenfrucht für die Biogasproduktion bearbeitet. Es sollte herausgefunden werden, ob sich diese in Deutschland im praktischen Anbau kaum noch bekannte Leguminose mit nachfolgendem Maisanbau für den ökologischen Landbau eignet und hohe Flächen- und Methanerträge mit möglichst geringer Umweltbelastung verbinden kann.

Ackerbohnen werden in Sommer- und Winterackerbohnen unterteilt. Insbesondere in Großbritannien wird etwa die Hälfte der Ackerbohnenanbaufläche in Herbstaussaat mit Winterackerbohnen bestellt. In Europa lassen sich verschiedene Winterackerbohnentypen unterscheiden: der mediterrane Typ, der nur relativ milden winterlichen Temperaturen ausgesetzt ist und die Typen, die in Nord- und Zentraleuropa und Regionen mit ähnlichen Klimaten angebaut werden und dort raue Winter überleben müssen (BOND ET AL., 1994). In großen Teilen Japans hingegen wird ein Typ der Winterackerbohne angebaut, der nur mit geringen Frosttemperaturen auskommen muss, jedoch lange Schneebedeckungen tolerieren kann (FUKUTA ET AL. 2001). Winterackerbohnensorten, die in Großbritannien angebaut werden, sind für die in deutschen Wintern möglichen niedrigen Temperaturen jedoch oft nicht ausreichend winterhart, um eine Ertragssicherheit zu gewährleisten.

Durch diese nicht immer ausreichende Winterhärte werden in kontinentaleren Regionen Europas wie Deutschland, Österreich oder Polen fast keine Winterackerbohnen angebaut (LINK & ARBAOUI 2005), sondern, wenn *Vicia faba* L. angebaut wird, wird zu Sommerackerbohnen gegriffen. Einschlägige Sommersorten wären u.a. Fuego oder Espresso, Wintersorten wären u.a. Husky oder Diva.

Neben den herkömmlichen Zuchtzielen wie z.B. der Erhöhung und Stabilisierung der Kornerträge, Standfestigkeit und Krankheitsresistenzen spielt bei der Winterackerbohnenzüchtung die Winterhärte eine entscheidende Rolle. Um den Winterackerbohnenanbau auch in Klimaten mit strengen Wintern zu ermöglichen, gibt es u.a. an der Universität Göttingen in Zusammenarbeit mit der NPZ Lembke KG Züchtungs- und Forschungsansätze.

Winterackerbohnen der Göttinger Winterackerbohnenpopulation können bisher Frosttemperaturen von -15°C oder tiefer überleben. Bei schützender Schneedecke können noch niedrigere Temperaturen überlebt werden, was sich in den beiden vergangenen Wintern 2008/09 und 2009/10 in Göttingen bestätigte, in denen es jeweils mehrere Nächte Temperaturen unter -20°C gab. Nur wenige Winter ermöglichen eine optimale Selektion der Winterackerbohnen hinsichtlich ihrer Frosttoleranz, da in manchen Wintern die Temperaturen nicht niedrig genug sind, oder die Schneedecke den Bohnen zu viel Schutz bietet, um ausreichende Auswinterung hervorzurufen. Es gibt nur selten Winter in Deutschland, in denen Winterackerbohnen völlig auswintern wie z.B. 2002/2003. Vor allem Frostnächte unter -15°C und sonnige Tage ohne Schneedecke sind für Winterackerbohnen kaum zu überleben. In keinem der geschilderten Fälle kann eine erfolgreiche und sinnvolle Selektion auf Frosttoleranz der Winterackerbohnen erfolgen und es kann, wenn überhaupt, nur ein geringer Zuchtfortschritt erzielt werden. Die wenigen Jahre mit Wintern, nach denen eine gute Selektion der Winterackerbohnen möglich ist, reichen alleine nicht aus, um die Frosttoleranz und Überwinterung von Winterackerbohnen erfolgreich zu steigern. Aus diesem Grund werden in Göttingen seit mehreren Jahren ergänzend zu den Feldversuchen Frostkammerversuche mit einer von ARBAOUI ET AL. (2008) erfolgreich etablierten Methode durchgeführt. Damit u.a. eine noch höherer Anzahl Genotypen pro Saison in der Frostkammer zukünftig untersucht werden kann, sollte im Rahmen dieser Arbeit die Methode optimiert werden, indem z.B. neue Merkmale der Frosttoleranz entwickelt wurden.

Es wird oft bedauert, dass die Anbaufläche der in Europa einheimischen Körnerleguminosen und ihre Bedeutung in der Landwirtschaft seit Jahren rückläufig ist (SPECHT 2009). Im Gegensatz zu Leguminosen des Ackerfutterbaus wie Klee oder Luzerne, die in den vergangenen zehn Jahren über 25-30% der ökologisch bewirtschafteten Ackerfläche ausmachten, sind bei den Körnerleguminosen deutlich geringere Flächenanteile festzustellen. Auch bundesweit ist eine erhebliche Abnahme des Körnerleguminosenanbaus zu verzeichnen: So sank die Anbaufläche von 211 705 ha im Jahr 1999 auf 84 400 ha im Jahr 2008 (BÖHM 2009A).Trotz des anspruchsvolleren Anbaumanagements und der geringen Ertragsstabilität im Vergleich zu Getreide haben Leguminosen wichtige und für den ökologischen Landbau unverzichtbare Eigenschaf-

ten: Die Stickstoffversorgung der Pflanzen wird im ökologischen Landbau großenteils mit Hilfe der symbiotischen Stickstofffixierung der Leguminosen sichergestellt. Stickstoffhinterlassenschaften im Boden können durch Ackerbohnen mehr als 125 kg/ha (METAYER 2004) betragen. Unter anderem durch ihre Fähigkeit Mineralstoffe - insbesondere Phosphat - aufzuschließen und diese durch ihre hervorragende Durchwurzelung in obere Bodenschichten zu befördern, sowie ihr humusmehrender Charakter ist der ökologische Landbau ohne Körnerleguminosen nicht vorstellbar (BÖHM 2009A). Körnerleguminosen wie die Ackerbohne lockern außerdem getreidelastige Fruchtfolgen auf und tragen so zur gewünschten Biodiversität in der Landwirtschaft bei (SASS 2009B).

Das Anliegen der vorliegenden Arbeit ist es, die Erzeugung von Energie aus ökologisch unbedenklichen nachwachsenden Rohstoffen mit einem neu entwickelten Fruchtfolgeausschnitt mit Winterackerbohnen als Winterzwischenfrucht für Biogasfruchtfolgen zu unterstützen und zu fördern. Es sollte herausgefunden werden, ob Winterackerbohnen verfügbar sind, die genügend Winterhärte und frühzeitige Produktivität aufweisen, um in einem Zweikulturnutzungssystem in Deutschland sinnvoll angebaut werden zu können. Die Höhe des Biomasse- und Methanertrags von Winterackerbohnen in Reinsaat oder Gemengen sollte bestimmt und dabei herausgefunden werden, ob mit dem Zweikulturnutzungssystem ein mindestens genauso hoher Gesamtflächenertrag erzielt werden kann wie in herkömmlichen Anbausystemen. Eine Minimierung der Umweltgefährdungen, wie sie z.B. aus Stickstoffauswaschungen ins Grundwasser resultiert, Verbesserung von Klima- und Ressourcenschutz und Erhöhung der Biodiversität auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sollten als Zielstellungen bei der Entwicklung dieses neuen Anbausystems für die Biogasproduktion berücksichtigt werden.

2 Anbau von Winterackerbohnen als Zwischenfrucht für die Biogasproduktion

Einleitung

Die Erzeugung von Biogas und damit die Anzahl der Biogasanlagen ist in Deutschland in den letzten Jahren nicht nur im konventionellen, sondern auch im ökologischen Landbau stark angestiegen (ANSPACH & MÖLLER 2009). Etwa 5% aller Biogasanlagen befinden sich auf ökologisch bewirtschafteten Betrieben (ANSPACH & MÖLLER 2008). Da Silomais hohe Flächenerträge ermöglicht und standortübergreifend die Fruchtart mit dem höchsten Methanhektarertrag ist, hat er sich als wichtigste rohstoffliefernde Pflanze für die Biogasproduktion etabliert (GÖDEKE ET AL.2007). Die Maisanbaufläche in Deutschland betrug 2008 insgesamt 2,19 Mio. ha. Nur ca. 13 000 ha davon wurden ökologisch bewirtschaftet (SCHMIDT & BURGER 2010). Durch Anbauprobleme wie z.B. unzureichende Stickstoffversorgung oder Schwierigkeiten bei der Unkrautregulierung und Umweltgefährdungen wie z.B. Bodenerosion oder Nährstoffaustrag ist der Maisanbau im ökologischen Landbau nicht sehr weit verbreitet, stellt aber auch dort ein wichtiges Substrat für die Vergärung in Biogasanlagen dar (ANSPACH & MÖLLER 2007). Abfrierende Zwischenfrüchte vor Mais ermöglichen eine Bodenbedeckung über Winter und können den Stickstoffaustrag reduzieren (NEUBAUER & KOHLS 1994). Nach dem Abfrieren kann der in der Pflanzenmasse enthaltene Stickstoff wieder mineralisiert werden und unterliegt damit erneut der Auswaschungsgefahr (LÜTKE ENTRUP & ZERHUSEN 1992). Diese Freisetzung ist bei winterharten Zwischenfrüchten nicht gegeben. Setzt die Mineralisation des Stickstoffs im Boden ein, was im Winter schon ab 1°C der Fall ist, nehmen die Winterzwischenfrüchte diesen auf und verhindern so eine Auswaschung (AUFHAMMER ET AL. 1996). Winterzwischenfrüchte ergeben in Kombination mit Zweitfrüchten wie Mais das sogenannte Zweikulturnutzungssystem (VETTER 2007). Dieses Anbausystem beruht auf der Ernte von zwei Kulturen pro Jahr, die nur möglich ist, da die Winterzwischenfrucht als Erstkultur vor der Reife geerntet wird und somit der Zweitkultur noch genügen Zeit zur Entwicklung bleibt (SCHEFFER 2000). Durch Bodenbedeckung über den gesamten Winter verhindert dieses Anbausystem nicht nur die Stickstoffauswaschung sondern ermöglicht durch Ausnutzung der gesamten Vegetationsperiode bis zu 19% höhere TM-Erträge als alleiniger Hauptfruchtanbau (STÜLPNAGEL 2007, TOEWS EL AL. 2008).

Im ökologischen Landbau spielt die Optimierung der Nährstoffversorgung der Pflanzen mit Stickstoff eine zentrale Rolle, da die Düngemittelzuführ von außen limitiert ist (MÖLLER 2003). Der Nitratstickstoffgehalt im Boden wird hier vor allem durch die Fruchtfolge stark beeinflusst (GRUBER ET AL. 2003). Mais stellt mit einem Stickstoffbedarf von über 100 kg N/ha für 300-600 t Frischmasse hohe Anforderungen an die Fruchtfolge, da bei unzureichender Stickstoffversorgung nicht in ausreichender Mengen Biomasse produziert werden kann (GRASS 2003). Bei der Verfolgung des primären Ziels, mit dem Zweikulturnutzungssystem möglichst hohe Flächenerträge zu erzielen,

muss im ökologischen Landbau deshalb darauf geachtet werden, dass keine zu starke Konkurrenz zwischen Winterzwischenfrucht und Mais um den knappen Faktor Stickstoff entsteht. BECKMANN (2000) empfiehlt deshalb den Anbau von Leguminosen vor Mais. Durch ihr Stickstoffbindungsvermögen stellen winterharte Leguminosen als Zwischenfrüchte vor spät gesäten Zweitfrüchten wie Mais eine Produktionsreserve für die Stickstoffzufuhr im ökologischen Landbau dar (HAAS 2003). Auch KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) bestätigten die positiven Stickstoff- und Fruchtfolgeeffekte des Leguminosenanbaus vor Mais. Neben der Nährstoffbereitstellung durch die Fruchtfolgegestaltung für den Mais sollte jedoch die Problematik der Nährstoffverluste vor und über Winter nicht in den Hintergrund geraten. Der Absenkung der N_{min}-Gehalte im Boden im Herbst und Winter sollte besondere Bedeutung zugemessen werden (BECKMANN & KOLBE 2000), um Nährstoffausträge ins Grundwasser zu verhindern (KOLBE ET AL. 2004). Winterzwischenfrüchte vor Mais im ökologischen Landbau sollen somit neben möglichst hohen Flächenerträgen zwei weiteren Anforderungen gerecht werden: Zum einen sollen sie Stickstoff für die Nachfrucht bereitstellen, zum anderen ein hohes Stickstoffaufnahmevermögen vor Winter besitzen, damit die Belastung des Grundwassers weitgehend vermieden werden kann (SCHMIDTKE 1997). Anhand der Feldversuche in Göttingen in den Jahren 2007/08 und 2008/09 sollte herausgefunden werden, ob diese Ziele mit Leguminosenreinsaaten als Winterzwischenfrüchte in einem Zweikulturnutzungssystem erreicht werden können, oder ob ein Anbau mit dem Gemengepartner Roggen vorteilhaft ist.

Das Anliegen der vorliegenden Arbeit ist es, die Erzeugung von Energie aus ökologisch unbedenklich nachwachsenden Rohstoffen mit einem neu entwickelten Fruchtfolgeausschnitt für Biogasfruchtfolgen zu unterstützen und zu fördern. Bei der Entwicklung dieses neuen Fruchtfolgeausschnittes werden mehrere Ziele verfolgt:

1. Die durch Maisanbau oft nicht auszuschließende Umweltgefährdung soll minimiert werden. Ganzjährige Bodenbedeckung durch Winterzwischenfrüchte vor Energiemais soll für Boden- und Erosionsschutz sorgen und den Nährstoffaustrag durch Absenkung des mineralischen Stickstoffgehalts im Boden zu auswaschungsgefährdeten Zeiten verringern.

2. Das landwirtschaftliche Einkommen und der Gewinn sollen gewährleistet bleiben, indem der Methanhektarertrag mindestens so hoch wie bei herkömmlichen Anbausystemen ist.

3. Die Nährstoffversorgung für die Zweitfrucht Mais soll ohne mineralische Stickstoffdüngemittel optimiert werden, indem Stickstoff durch die symbiotische Fixierung bereitgestellt werden. Hierdurch soll ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz geleistet werden.

4. Die Biodiversität soll durch Auflockerung der Fruchtfolge erhöht werden, indem Winterackerbohnen als bisher kaum verbreitete Leguminose in das Zweikulturnutzungssystem zur Biogasnutzung etabliert wird.

Um diese Ziele so gut wie möglich zu erreichen, wurde ein Zweikulturnutzugssystem mit Winterackerbohnen als legume Komponente in Reinsaat oder Gemenge entwickelt. In mehrjährigen Feldversuchen am Standort Göttingen wurde das System hinsichtlich der optimalen Kombination aus Saat- und Ernteterminen der Winterzwischenfrüchte, deren Bestandesdichte und Vorfruchteffekte auf den nachfolgenden Mais, Trockenmasse- und Methanerträge und mineralisiertem Stickstoff im Boden untersucht.

Material und Methoden

Standorteigenschaften und Witterung

Die zweijährigen Feldversuche wurden in den Versuchsjahren 2007/08 und 2008/09 am Versuchsstandort Göttingen auf dem Klostergut Reinshof (51°32´N, 9°56´E) durchgeführt. Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur in Göttingen beträgt 8,7°C, der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 650 mm. Die Versuche wurden auf den Schlägen „Garte Nord“ (2007/08) und „Kamp“ (2008/09) angelegt, die 160 m ü. NN. im Leinetalgraben lagen. Der Bodentyp war ein Gley-Kolluvium im nördlichen und ein Parabraunerde-Kolluvium im südlichen Bereich der „Garte Nord“ (STOCKFISCH 1997), sowie ein Auenlehm auf dem „Kamp“. Die Bodenarten konnten als toniger Schluff (Ut3) auf „Garte Nord“ und schwerer Lehm (LT1Al) auf „Kamp“ angesprochen werden. Der Boden-pH wurde jeweils zu Beginn der Versuche erfasst und betrug 6,8 (Garte Nord) und 7,3 (Kamp). Bei Voruntersuchungen wurden auch die Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte und der Humusgehalt analysiert (Tab. 1). Vorfrucht aller Versuche war in beiden Jahren Winterweizen. Die Saatbettbereitung vor der Winterzwischenfruchtsaat erfolgte mit einer Kreiselegge, vor der Maissaat mit der Fräse. Um die Zwischenfruchtauswirkungen nicht zu maskieren, wurde in allen Versuchen auf Stickstoffdüngung verzichtet. Damit wurde ein wesentlicher Aspekt des ökologischen Landbaus abgebildet.

Tab. 1: Bodenchemische Kennwerte der Versuchsfelder „Garte Nord“ 2007/08 und „Kamp“ 2008/09.

	Garte Nord 2007/08	Kamp 2008/09
ph	6,8	7,3
Phosphor [mg P_2O_5/100g TS]	9,0	14,3
Kalium [mg K_20/100g TS]	15,8	12,0
Magnesium [mg/100g TS)	9,0	16,0
Humus [%]	2,2	3,0

Versuchsdesign

Hauptversuch

Im sogenannten „Hauptversuch“ wurden zwei Genotypen der Göttinger Winterackerbohne (B) in Gemenge und Reinsaaten mit verschiedenen Winterzwischenfrüchten (F) untersucht. Die Winterzwischenfrüchte wurden in beiden Jahren (J) an zwei Saatterminen (S) gesät und an drei Ernteterminen (E) geerntet. Jeweils im Anschluss an die Winterzwischenfruchternte wurden die Parzellen gefräst und die Zweittfrucht Mais mit 12,8 Korn/m² gesät.

In beiden Versuchsjahren wurde das Zweikulturnutzungssystem in einer vierstufigen Spaltanlage mit Großteilstückfaktor Winterzwischenfruchternten (E), Mittelteilstückfaktor I Saattermine der Winterzwischenfrüchte (S), Mittelteilstückfaktor II Winter-

zwischenfrüchte (F), Kleinteilstückfaktor Winterackerbohnengenotypen (B) (Tab. 2) und mit n = 2 Wiederholungen angelegt.

Tab. 2: Hauptfaktoren, Faktorstufen, Beschreibungen und Abkürzungen der Spaltanlage des Hauptversuchs

Faktor, Faktorstufen	Beschreibung (Abkürzung)
Jahre J = 2	2007/08 (J1), 2008/09 (J2)
Winterackerbohnen-genotypen B = 2	WAB98-21, WAB98-98, WAB98-267 (B1), W:Beob, Gö Karl, Dhsn (B2)
Winterzwischenfrüchte F = 5	Winterackerbohne, doppelte Saatstärke* (Bd), Winterackerbohne, einfache Saatstärke* (Be), Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge* (BE), Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte Saatstärke Winterackerbohne* (BRd), Winterroggengemenge, einfache Saatstärke Winterackerbohne* (BRe)
Saattermine Winter-zwischenfrüchte S = 2	09.10.2007, 10.10.2008 (S1), 22.10.2007, 20.10.2008 (S2)
Erntetermine Winter-zwischenfrüchte / Saattermine Mais E = 3	28.04./02.05.2008, 21.04./04.05.2009 (E1), 13.05./19.05.2008, 05.05./26.05.2009 (E2), 26.05./29.05.2008, 19.05./26.05.2009 (E3)

*siehe Tab. 3

Tab. 3: Abkürzungen und Informationen über die Winterzwischenfrüchte (F) des Hauptversuchs

Abkürzung	Winterzwischenfrucht	Saatstärke
Bd	Winterackerbohne	70 Korn/m²
Be	Winterackerbohne	35 Korn/m²
BE	Winterackerbohne + Wintererbse	26 Korn/m² 53 Korn/m²
BRd	Winterackerbohne + Winterroggen	53 Korn/m² 225 Korn/m²
BRe	Winterackerbohne + Winterroggen	26 Korn/m² 225 Korn/m²

Bei allen Varianten der Spaltanlange wurden Trockenmasseerträge (TM) der Zwischen- und der Zweitfrüchte und mineralisierter Bodenstickstoff (N_{min}) zu verschiedenen Zeitpunkten erhoben.

Biogasversuch

Biogas-, Methan-, Schwefel- und Stickstoffanalysen der beiden Versuchsjahre 2007/08 und 2009/09 konnten nicht an allen, sondern nur an ausgewählten Varianten des Hauptversuchs durchgeführt werden (Tab. 4). Für diese Analysen wurden die im Hauptversuch nicht auftretende Versuchsvariante der Winterroggenreinsaat (R), sowie die jeweils dritte Wiederholung ausgewählter Varianten aus einem auf dem gleichen Schlag liegenden Versuch verwendet. Die Versuchsanlage entsprach einer Blockanlange mit n = 3 Wiederholungen.

Tab. 4: Abkürzungen und Informationen ausgewählter Varianten (V) des Hauptversuchs

Variante/ Abkürzung	Winterzwischenfrucht (F)	Saattermin (S)	Erntetermin (E)	Saatstärke Winteracker-bohne
Standard	Winterackerbohne	S1*	E2*	35 Korn/m²
BE	Winterackerbohne + Wintererbse	S1*	E2*	26 Korn/m² 53 Korn/m²
BRd	Winterackerbohne + Winterroggen	S1*	E2*	53 Korn/m² 225 Korn/m²
BRe	Winterackerbohne + Winterroggen	S1*	E2*	26 Korn/m² 225 Korn/m²
d	Winterackerbohne	S1*	E2*	70 Korn/m²
E1	Winterackerbohne	S1*	E2*	35 Korn/m²
E3	Winterackerbohne	S1*	E3*	35 Korn/m²
R	Winterroggen	S1*	E2*	300 Korn/m²
s	Winterackerbohne	S2*	E2*	35 Korn/m²

*genaue Daten der beiden Versuchsjahre können Tab. 2 entnommen werden.

Zusatzversuch I: Ertrag und Inhaltstoffe von Winterackerbohnen in Abhängigkeit vom Erntetermin

Ergänzend zum Hauptversuch wurde ein zweijähriger (2007/08 und 2008/09) Versuch einer Winterackerbohnenreinsaat angelegt. Ziel des Blockversuchs mit n = 2 Wiederholungen war es, ergänzende Daten zur Standardvariante Winterackerbohnenreinsaat (Standard, Tab. 4) des Hauptversuches zu ermitteln. Winterackerbohnen wurden analog zum zweiten Saattermin (S2) mit 35 Korn/m² gesät. Vom 4. April bis 11. Juli wurden in beiden Jahren in regelmäßigen Abständen neun Ertragsschnitte durchgeführt und Trockenmasseertrag, Trocksubstanz-, Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt, Stickstoff- und Kohlenstoffertrag, das C/N-Verhältnis und mineralisierter Bodenstickstoff (N_{min}) bestimmt.

Zusatzversuch II: Ertrag und Trockensubstanzgehalt von Mais in Abhängigkeit vom Saattermin

Zusatzversuch II wurde in den beiden Jahren 2007 und 2008 durchgeführt. Die Maissorte Atletico, KWS, wurde an sieben Saatterminen vom 18. April bis 29. Juni und n = 3 Wiederholungen in einer Blockanlange mit 12,8 Pflanzen/m² gesät. Die Ernten erfolgten analog zur Maisernte des Hauptversuchs Mitte Oktober bis Anfang November.

Probennahmen, Analysen, Berechnungen

Die Ernte des oberirdischen Winterzwischenfruchtaufwuchses (FM) erfolgte von Hand in Kleinteilflächen (Miniplots, 1,32 m²). Nach Zerkleinerung der Proben wurde je eine FM-Teilprobe bei 60°C zur Gewichtskonstanz getrocknet, vermahlen und für Inhaltsstoffanalysen verwendet. Ein weiteres Aliquot wurde gewogen, zur Trockenmassebestimmung (TM) bei 105°C bis zur Gewichtkonstanz getrocknet und zurückgewogen, um die TM-Erträge pro Fläche zu berechnen. Die Maisernte und Bestimmung der TM-Erträge erfolgte analog auf einer Miniplotfläche von 7,5 m². Zur Bestimmung der Mineralstickstoffgehalte (N_{min}) im Boden wurden jedes Versuchsjahr zur Winterzwischenfruchtsaat, Vegetationsbeginn, Winterzwischenfruchternte und Maisernte Bodenproben aus drei Bodenschichten (0-30, 30-60, 60-90 cm) entnommen. Die Behandlung der Proben erfolgte nach VDLUFA-Methode, die Analysen des Nitrat- (NO_3) und Ammoniumstickstoffs (NH_4) erfolgten nach der N_{min}-Methode (WEHRMANN & SCHARPF 1979, HOFFMANN 1991). Der N_{min}-Gehalt errechnete sich aus der Summe von NO_3- und NH_4-Stickstoff. Für die Biogas- und Methanuntersuchungen wurden tiefgefrorene FM-Proben bei der Firma Cutec, Clausthal-Zellerfeld in diskontinuierlichen Gärtests (Batchversuchen nach VDI 4630) analysiert. Die spezifischen Gaserträge wurden mit den Werten der Trockensubstanz (TS), organischer Trockenmasse (oTM) und der Trockenmasse pro Fläche (TM/m²) auf Gasflächenerträge umgerechnet. Die Berechnung der Methanerträge des Maises erfolgte mit dem aus der Literatur entnommenen Wert von 650 Nl Biogas /kg oTM, 95% oTM in der TM und einem Methangehalt von 52% (DÖHLER ET AL. 2009). Für Analysen zum Schwefel- und Stickstoffgehalt wurden bei 60°C getrocknete, gemahlene TM-Proben vom Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Bundesforschungsinstitut für ländliche Räume, Westerau, analysiert. Die Umrechnung auf Stickstoff- (N) und Schwefelerträge (S) pro Fläche wurde anhand der TM-Erträge pro Fläche durchgeführt. C/N- Analysen wurden mit der Dumas-Methode in einem C/N-Analyser der Firma Elementar (Typ Vario EL) untersucht. Die Berechnung auf Stickstoff- und Kohlenstofferträge pro Fläche erfolgte anhand der erhobenen TM/m².

Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der Daten erfolgte mit dem Programm Plabstat (UTZ 1994, UTZ 2004, UTZ 2007). Für Ertragsdaten des Hauptversuchs wurde eine logarithmische Transformation durchgeführt. Die arcsin-Transformation (Winkeltransformation) wurde bei Prozentzahlen angewendet (DORMANN ET AL. 2009). Die Verrechnung der Daten erfolgte mit einer Varianzanalyse und einem gemischten Modell für eine vierstufige

Spaltanlage für den Hauptversuch (MUNZERT 1992, THOMAS 2006). Beim Biogasversuch und den Zusatzversuchen wurde das Modell für eine einfache Blockanlage verwendet. Der Faktor Wiederholung (W) wurde immer als zufällig, alle anderen Faktoren als fixiert angesehen. Das Signifikanzniveau durch „**, *, +“ für 1%, 5%, 10% gekennzeichnet. Bei maximal drei zu vergleichenden Mittelwerten, wurden die Mittelwertsvergleiche mit Grenzdifferenz (Signifikanznivieau 5%) berechnet. Sonstige multiple Mittelwertsvergleiche wurden mit dem Tukey-Test (α = 5%) vorgenommen. Nicht signifikante Differenzen wurden mit „n.s.“ gekennzeichnet, signifikante mit „*“. In graphischen Darstellungen sowie Tabellen wurden signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet. Zusammenhänge zwischen Merkmalen wurden mit Hilfe des Spearman Rangkorrelationskoeffizienten untersucht. Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten erfolgte mit Plabstat, einfache Regressionsrechnungen wurden mit Excel, Microsoft 2007, multiple Regressionsrechnungen mit Plabstat durchgeführt.

Ergebnisse

Hauptversuch

Trockenmasseerträge der Winterzwischenfrüchte

Die Trockenmasseerträge (TM) der Winterzwischenfrüchte schwankten zwischen 47,19 g TM/m² (Versuchsvariante J1, B2, F2, S2, E1) und 954,46 g TM/m² (Versuchsvariante J1, B2, F1, S2, E3). Das Gesamtmittel über alle Versuchsvarianten lag bei 344,18 g TM/m². Alle Hauptfaktoren (Jahre (J), Erntetermine (E), Saattermine (S), Winterzwischenfrüchte (F)) außer dem Winterackerbohnengenotyp (B) hatten einen signifikanten Einfluss auf die TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte. Es ergaben sich signifikante Trockenmasseertragsunterschiede zwischen den Gemengen aus Winterackerbohne und Winterroggen und den Varianten, die ausschließlich aus Winterleguminosen bestanden (Tab. 5). Die Winterackerbohnen in Reinsaat mit einfacher Saatstärke (Be) zeigten den niedrigsten TM-Ertrag mit 203,52 g TM/m². Die Erhöhung der Saatstärke der Winterackerbohnen zeigte ebenfalls signifikante Ertragseffekte. Dieser positive Effekt war bei Winterackerbohnen-Winterroggengemengen zwar nicht signifikant, aber als Tendenz zu erkennen.

Tab. 5: Trockenmasseertrag der Winterzwischenfrüchte (F) in zwei Jahren (J1, J2) und nach frühem und spätem Saattermin (S1, S2) jeweils gemittelt über die anderen Faktoren.

	Trockenmasseertrag Winterzwischenfrüchte [g/m²]											
F	J1	[1]	[2]	J2	[1]	S1	[1]	[2]	S2	[1]	Mittel	[1]
BRd	541,08	a	n.s.	446,64	a	573,32	a	*	414,39	a	493,86	a
BRe	520,89	ab	n.s.	412,64	a	501,27	b	n.s.	432,26	a	466,77	a
Bd	374,19	bc	n.s.	227,71	b	364,54	c	*	218,20	b	300,95	b
BE	303,03	cd	n.s.	208,54	b	306,08	cd	*	224,66	b	255,79	b
Be	262,56	d	*	144,49	c	251,34	d	*	155,71	c	203,53	c
Mittel	400,35		*	288,01		399,31		*	289,04		344,18	

Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen, Tukey-Test, α = 5%

[1] Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte innerhalb desselben Jahres sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet (Leserichtung vertikal).

[2] Signifikante Unterschiede zwischen den Jahren oder Saatterminen innerhalb derselben Winterzwischenfrucht sind mit * gekennzeichnet (Leserichtung horizontal).

Die Jahreseffekte in den beiden Versuchsjahren 2007/08 und 2008/09 auf die TM-Erträge zeigten sich deutlich (F-Wert = 916,81**). Des Weiteren bestand eine Interaktion zwischen Jahren und den Winterzwischenfrüchten. Der mittlere TM-Ertrag des ersten Versuchsjahres übertraf den des zweiten Jahres um 112,34 g TM/m² (Tab. 5). Während der TM-Ertrag der mit einfacher Saatstärke gedrillten Winterackerbohnenreinsaat (Be) im ersten Jahr signifikant höher waren als im zweiten Jahr, konnten bei den anderen Winterzwischenfrüchten keine signifikanten Differenzen zwischen den beiden Jahren festgestellt werden. Der höhere TM-Ertrag der Winterroggen-Winterackerbohnengemenge im Vergleich zu den anderen Winterzwischenfrüchten des selben

Jahres war vor allem im zweiten Jahr deutlich zu erkennen. Winterackerbohnen in Reinsaat mit einfacher Saatstärke (Be) erreichten die niedrigsten TM-Erträge.

Der Einfluss verschiedener Erntetermine der Winterzwischenfrüchte auf die TM-Erträge war deutlich erkennbar (F-Wert = 144,65**). Der Mittelwert über alle Winterzwischenfrüchte zum ersten Erntetermin (E1) lag mit 155,30 g TM/m² TM deutlich niedriger als der des zweiten Erntetermins (E2) (350,62 g TM/m²). Vom zweiten bis zum letzten Erntetermin (E3) stieg der TM-Ertrag der Winterzwischenfrüchte nochmals signifikant an und erreichte im Mittel über alle Winterzwischenfrüchte 526,61 g TM/m² (Abb. 1). Auch die Interaktion der Winterzwischenfrüchte mit den Ernteterminen (F-Wert = 5,14*) war signifikant. Alle Winterzwischenfrüchte steigerten ihren TM-Ertrag von Erntetermin zu Erntetermin signifikant. Zu allen drei Ernteterminen hatten die Winterackerbohnen-Winterroggengemenge signifikant höhere Erträge als die reinen Leguminosen zum gleichen Erntetermin. Die höchsten Erträge wurden am letzten Erntetermin mit dem Winterackerbohnen-Winterroggengemenge erzielt (BRe: 700,46 g TM/m² und BRd: 670,73 g TM/m²). Die Winterackerbohnenreinsaat mit einfacher Saatstärke wies zu jedem Erntetermin den niedrigsten TM-Ertrag auf. Das Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge (BE) und die Winterackerbohnenreinsaat mit doppelter Saatstärke (Bd) unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Sie erreichten an jedem Erntetermin signifikant niedrigere Werte als die Gemenge mit Winterroggen (BRe, BRd) und höhere als die einfache Winterackerbohnenreinsaat (Be).

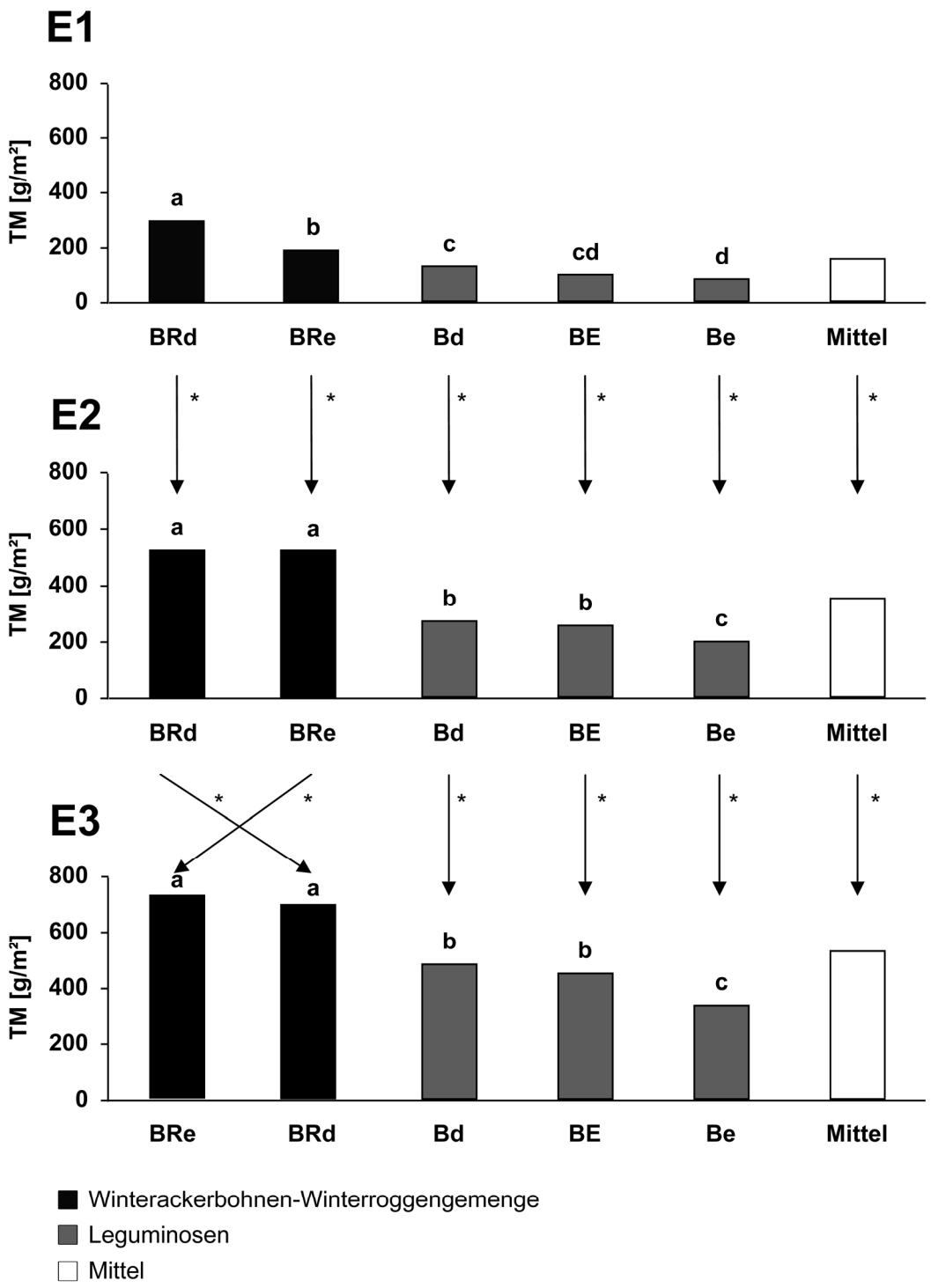

Abb. 1: Trockenmasseertrag (TM) der Winterzwischenfrüchte zum frühen, mittleren und späten Erntetermin (E1, E2, E3) gemittelt über die anderen Faktoren.

BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen. Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge. Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten der Winterzwischenfrüchte innerhalb derselben Ernte sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.Signifikante Unterschiede zwischen den Ernten innerhalb derselben Vorfrucht sind mit * gekennzeichnet. Tukey-Test, α = 5%.

Der späte Saattermin (S2) verringerte im Vergleich zum frühen (S1) die mittleren Trockenmasseerträge signifikant (F-Wert = 101,26**). Dies war bei allen Winterzwischenfrüchten außer beim Winterackerbohnen-Winterroggengemenge (BRe) signifikant nachweisbar (Tab. 5). Der höchste TM-Ertrag wurde somit mit dem früh gesäten Winterackerbohnen-Winterroggengemenge (BRd, S1) mit 573,32 g TM/m² erreicht. Gemenge mit Winterroggen erreichten unabhängig vom Saattermin stets höhere TM-Erträge als die anderen Winterzwischenfrüchte.

Der Hauptfaktor der Genotypen der Winterackerbohnen (B) wirkte sich nicht signifikant auf die TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte aus. Allerdings war eine schwache Interaktion zwischen den Faktoren J und B erkennbar (F-Wert = 3,06+).

Trockensubstanzgehalte der Winterzwischenfrüchte

Auch beim Trockensubstanzgehalt (TS) wurden mit F-Wert = 243,31** signifikante Unterschiede zwischen den Winterzwischenfrüchten festgestellt. Es wurde ein TS-Gehalt (gemittelt über alle Winterzwischenfrüchte und Faktoren) in Höhe von 12,7% erzielt. Im Vergleich zu den reinen legumen Versuchsvarianten wurden bei Winterroggen beinhaltenden Gemengen signifikant höhere TS-Gehalte realisiert. Die höchsten TS-Gehalte konnten mit den Winterackerbohnen-Winterroggengemengen erreicht werden, die niedrigsten mit den Winterackerbohnen in Reinsaat, welche mit weniger als 11% TS signifikant niedrigere TS-Gehalte als die anderen Winterzwischenfrüchte (Tab. 6) zeigten. Am ersten Erntetermin (E1) wurde mit den Winterzwischenfrüchten im Mittel über die anderen Faktoren ein TS-Gehalt von 13,87 % erzielt. Die beiden späteren Erntetermine führten zu signifikant geringeren TS-Gehalten (Tab. 6). Die Unterschiede zwischen den Winterzwischenfrüchten waren zum ersten Erntetermin am wenigsten deutlich ausgeprägt.

Tab. 6: Trockensubstanzgehalt der Winterzwischenfrüchte (F) zum frühen, mittleren und späten Erntetermin (E1, E2, E3) und nach frühem und spätem Saattermin (S1, S2) jeweils gemittelt über alle anderen Faktoren.

	Trockensubstanzgehalt Winterzwischenfrüchte [%]														
F	E1	[1]	[2]	E2	[1]	[2]	E3	[1]	S1	[1]	[2]	S2	[1]	Mittel	[1]
BRd	14,23	ab	n.s.	14,33	a	*	16,22	a	15,04	a	n.s.	14,81	a	14,93	a
BRe	15,32	ab	n.s.	14,44	a	*	16,71	a	15,49	a	n.s.	15,49	a	15,49	a
Bd	13,13	b	*	9,36	c	*	9,03	b	10,67	b	n.s.	10,34	b	10,51	c
BE	14,25	ab	*	11,42	b	*	9,74	b	11,84	c	n.s.	11,77	b	11,81	b
Be	12,43	b	*	10,62	b	n.s.	9,22	b	10,06	c	*	11,45	c	10,76	c
Mittel	13,87		*	12,03		*	12,18		12,62		n.s.	12,77		12,70	

Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen, Tukey-Test, α = 5%.

[1] Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte innerhalb derselben Ernte- oder Saattermine sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.

[2] Signifikante Unterschiede zwischen den Ernte- oder Saatterminen innerhalb derselben Winterzwischenfrucht sind mit * gekennzeichnet.

Der Saattermin der Winterzwischenfrüchte hatte keinen signifikanten Einfluss auf den TS-Gehalt. Nur die Winterackerbohnenreinsaat mit einfacher Saatstärke reagierte mit einer signifikanten Steigerung des TS-Gehalts vom frühen zum späteren Saattermin (Tab. 6). Es bestand kein signifikanter Einfluss der beiden Winterackerbohnengenotypen und der Versuchsjahre auf den TS-Gehalt.

Trockenmasseerträge der Zweitfrucht Mais

Anhand der Varianzanalyse ließ sich erkennen, dass die Faktoren Jahre (J), Saattermine (S) der Winterzwischenfrüchte und Winterackerbohnengenotyp (B) keine signifikanten Einflüsse auf den TM-Ertrag der Zweittfrucht Mais hatten. Anders war dies bei den beiden anderen Hauptfaktoren F und E, die zu signifikanten Mittelwertsunterschieden führten. In den beiden Jahren betrugen die Maistrockenmasseerträge im Mittel über alle Faktoren 1372,6 g TM/m². Die TM des Maises nach Winterroggengemengen war den TM-Erträgen nach rein legumen Gemengen signifikant unterlegen. Allerdings unterschieden sich weder die Winterackerbohnenreinsaaten oder Gemenge mit Wintererbsen voneinander noch die Gemenge mit Winterroggen untereinander (Abb. 2).

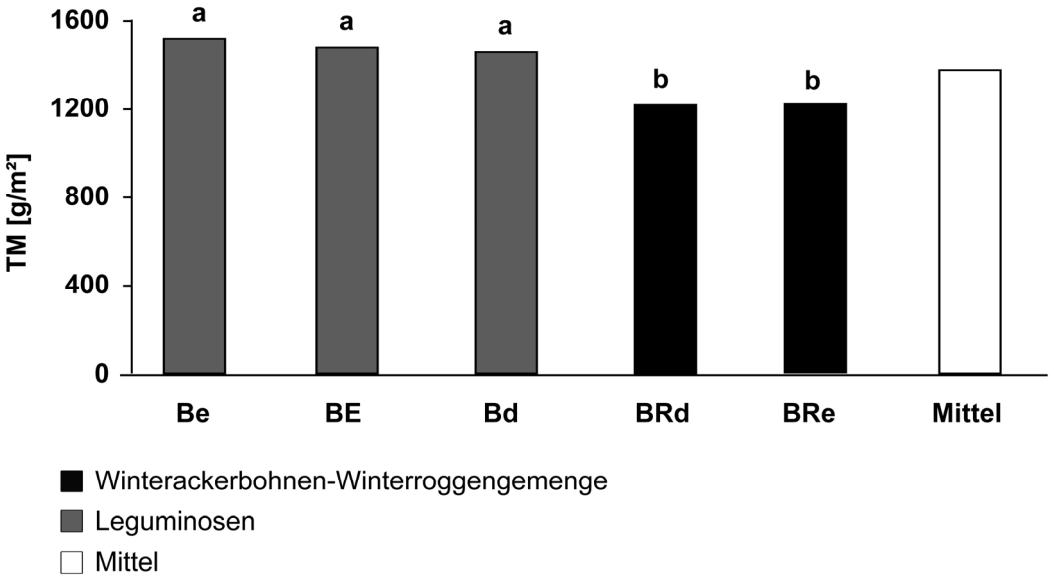

Abb. 2: Trockenmasseertrag (TM) der Hauptfrucht Mais nach Winterzwischenfrüchten (F) gemittelt über die anderen Faktoren.

BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen. Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet, Tukey-Test, α = 5%.

Der Mais, der nach früh, mittel oder spät geernteten Winterzwischenfrüchten gesät wurde, zeigte signifikante TM-Unterschiede. Nach allen Winterzwischenfrüchten sank der Mais-TM-Ertrag signifikant je später der Vorfruchterntetermin war. Der maximale

TM-Ertrag wurde mit den Varianten Bd, Be und BE, die zum ersten Erntetermin geerntet wurden, erreicht (Tab. 7). Auch innerhalb der Erntezeitvarianten konnten Differenzen im TM-Ertrag des Maises nach den verschiedenen Winterzwischenfrüchten festgestellt werden. Vor allem nach dem ersten Erntetermin (E1) zeigte sich die Unterlegenheit der Winterroggengemenge gegenüber den Leguminosen (Tab. 7).

Tab. 7: Trockenmasseertag des Maises nach Winterzwischenfrüchten (F) nach frühem, mittlerem und spätem Erntetermin der Winterzwischenfrüchte (E1, E2, E3) gemittelt über die anderen Faktoren.

	Trockenmassertrag Mais [g/m²]										
F	E1	[1]	[2]	E2	[1]	[2]	E3	[1]	Mittel	[1]
Bd	1854,64	a	*	1395,32	ab	*	1113,80	bc	1454,59	a
Be	1831,72	a	*	1497,81	ab	*	1212,38	ab	1513,97	a
BE	1819,68	a	*	1394,74	ab	*	1209,70	ab	1474,71	a
BRe	1433,76	b	*	1224,73	bc	*	962,06	d	1206,85	b
BRd	1387,31	b	*	1208,71	c	*	1043,07	cd	1213,03	b
Mittel	1665,42		*	1344.26		*	1108.2		1372,63	

Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen, Tukey-Test, α = 5%
[1] Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten der Winterzwischenfrüchte innerhalb derselben Erntetermine der Winterzwischenfrüchte sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.
[2] Signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen der Winterzwischenfrüchte innerhalb derselben Vorfrucht sind mit * gekennzeichnet.

Trockensubstanzgehalt der Zweitfrucht Mais

Weder verschiedene Saattermine (S), noch Jahre (J) noch Bohnengenotypen (B) führten zu signifikanten Mittelwertdifferenzen des TS-Gehalts des Maises. Auch die Winterzwischenfrüchte (F) bewirkten als alleiniger Faktor betrachtet keine TS-Unterschiede der Zweitfrucht. Allerdings hatten die Erntetermine (E) der Winterzwischenfrüchte, sowie deren Interaktion mit den Jahren, Winterzwischenfrüchten und Saatterminen Auswirkungen auf den TS-Gehalt.

Mais, der nach dem ersten Erntetermin (E1) der Winterzwischenfrucht gesät wurde, erreichte zur Ernte mit 28,89% TS signifikant höhere TS-Gehalte als der später gesäte. Die Effekte der Winterzwischenfrüchte auf den Mais-TS-Gehalt innerhalb der drei Erntetermine zeigten sich nur im dritten Erntetermin (E3) zwischen dem Gemenge einfacher Winterackerbohnenreinsaat (Be) und doppelter Winterackerbohnenreinsaat (Bd) signifikant. In allen anderen Fällen lagen zwischen den Winterzwischenfrüchten und deren Auswirkung auf den Mais-TS-Gehalt keine signifikanten Unterschiede vor (Tab. 8).

Tab. 8: Trockensubstanzgehalt des Maises nach Winterzwischenfrüchten (F) nach frühem, mittlerem und spätem Erntetermin der Winterzwischenfrüchte (E1, E2, E3) gemittelt über die anderen Faktoren

	Trockensubstanzgehalt Mais [%]										
F	E1	[1]	[2]	E2	[1]	[2]	E3	[1]	Mittel	[1]
Bd	29,86	a	*	22,91	a	*	20,23	b	25,05	a
BE	29,50	a	*	22,90	a	n.s.	21,10	ab	25,30	a
BRe	28,68	a	*	23,11	a	n.s.	21,22	ab	24,95	a
Be	28,50	a	*	24,67	a	*	21,47	a	24,98	a
BRd	27,90	a	*	22,65	a	n.s.	21,46	ab	24,68	a
Mittel	28,89		*	23,25		n.s.	21,09		24,99	

Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen, Tukey-Test, α = 5%
[1] Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte innerhalb dersselben Erntetermins sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.
[2] Signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen innerhalb derselben Vorfrucht sind mit * gekennzeichnet.

Gesamttrockenmasseerträge des Zweikulturnutzungssystems

Im Mittel über alle Faktoren betrug die Summe der Trockenmasseerträge des Zweikulturnutzungssystems bestehend aus Winterzwischenfrüchten und Mais (TM_{ges}) 1714,10 g/m². Weder zwischen unterschiedlichen Erntezeiten der Winterzwischenfrüchte (E) noch zwischen Winterzwischenfrüchten (F) (Tab. 9), Jahren (J) oder Winterackerbohnengenotypen (B) (Details nicht dargestellt) konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden.

Tab. 9: Gesamttrockenmasseertrag aus Winterzwischenfrüchten (F) und Mais nach frühem, mittlerem und spätem Erntetermin (E1, E2, E3) der Winterzwischenfrüchte (F) und nach früher und später Saat der Winterzwischenfrüchte (S1, S2) jeweils gemittelt über die anderen Faktoren.

	Gesamttrockenmasseertrag Winterzwischenfrüchte und Mais [g/m²]														
F	E1	[1]	[2]	E2	[1]	[2]	E3	[1]	S1	[1]	[2]	S2	[1]	Mittel	[1]
Bd	1980,2	a	*	1664,2	a	n.s.	1594,3	a	1897,4	a	*	1595,1	a	1746,2	a
Be	1911,1	a	*	1694,4	a	n.s.	1544,1	a	1754,3	ab	n.s.	1678,7	a	1716,5	a
BE	1914,7	a	*	1648,3	a	n.s.	1657,3	a	1847,0	ab	*	1633,2	a	1740,1	a
BRe	1619,5	b	n.s.	1738,9	a	n.s.	1662,5	a	1686,5	b	n.s.	1660,8	a	1673,6	a
BRd	1664,7	b	n.s.	1728,7	a	n.s.	1688,7	a	1782,4	ab	*	1605,8	a	1694,1	a
Mittel	1818,0		n.s.	1694,9		n.s.	1629,4		1793,5		*	1634,7		1714,1	

Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen, Tukey-Test, α = 5%.
[1] Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte innerhalb derselben Erntezeitpunkts sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.
[2] Signifikante Unterschiede zwischen den Erntezeitpunkten bzw. den Saatterminen innerhalb derselben Vorfrucht sind mit * gekennzeichnet.

Auswirkungen auf den TM_{ges} konnten lediglich durch die Saattermine (S) der Winterzwischenfrüchte erzielt werden (Tab. 9). Der späte Saattermin verursachte eine signifikante Ertragsminderung von 158,80 g TM/m². Signifikante Unterschiede innerhalb des ersten Saattermins (S1) lagen nur zwischen dem Winterackerbohnen-Winterroggengemenge (BRe) und der doppelten Winterackerbohnenreinsaat (Bd) vor. Innerhalb des späten Termins (S2) verursachten die Winterzwischenfrüchte keine signifikanten Mittelwertsunterschiede (Tab. 9).

Gehalte des mineralisierten Stickstoffs im Boden

Zu Versuchsbeginn (Saat der Winterzwischenfrüchte) betrug der Gehalt des mineralisierten Stickstoffs (N_{min}) im Boden von 0 bis 90 cm Tiefe im Mittel über beide Versuchsjahre und alle Varianten 63,58 kg N/ha (Abb. 3). Hiervon befand sich ca. die Hälfte des Stickstoffs in der obersten (0-30 cm), der geringste Anteil (12,70 kg N/ha) in der untersten Bodenschicht (60-90 cm). Zu Vegetationsbeginn im Frühjahr betrugen die N_{min}-Gehalte im Boden gemittelt über alle Varianten und Jahre 52,77 kg N/ha (Abb. 3). Die Abnahme des N_{min}-Gehalts im Boden von Saat bis Vegetationsbeginn fand vor allem in der obersten Bodenschicht statt, während er in der untersten anstieg. Unter rein legumen Varianten (Bd, Be, BE) sank der N_{min}-Gehalt signifikant weniger als unter den Winterroggengemengen (BRd, BRe). Bis zur Winterzwischenfruchternte ging der Mittelwert des N_{min}-Gehaltes bis 90 cm Bodentiefe über alle Varianten und Jahre auf 38,31 kg N/ha zurück (Abb. 3). Der signifikant höchste N_{min}-Gehalt wurde zur Winterzwischenfruchternte unter der einfachen Winterackerbohnenreinsaat gemessen (54,91 kg N/ha), die niedrigsten mit weniger als 20 kg N/ha bei den Roggengemengen. Im Vergleich zu den N_{min}-Gehalten zum Vegetationsbeginn verringerte sich bei diesen Gemengen vor allem der N_{min}-Gehalt in der Tiefenstufe von 60-90 cm. Zur Maisernte war der Mittelwert des N_{min}-Gehalts im Boden über alle Varianten und Jahre auf 16,24 kg N/ha gesunken (Abb. 3). Unter allen Winterzwischenfruchtvarianten lagen die N_{min}-Gehalte zur Maisernte unter 20 kg N/ha. Über die Hälfte des N_{min}-Gehaltes befand sich in der Bodenschicht von 0-30 cm. Die N_{min}-Gehalte unter den rein legumen Varianten waren signifikant höher als unter Winterroggengemenge.

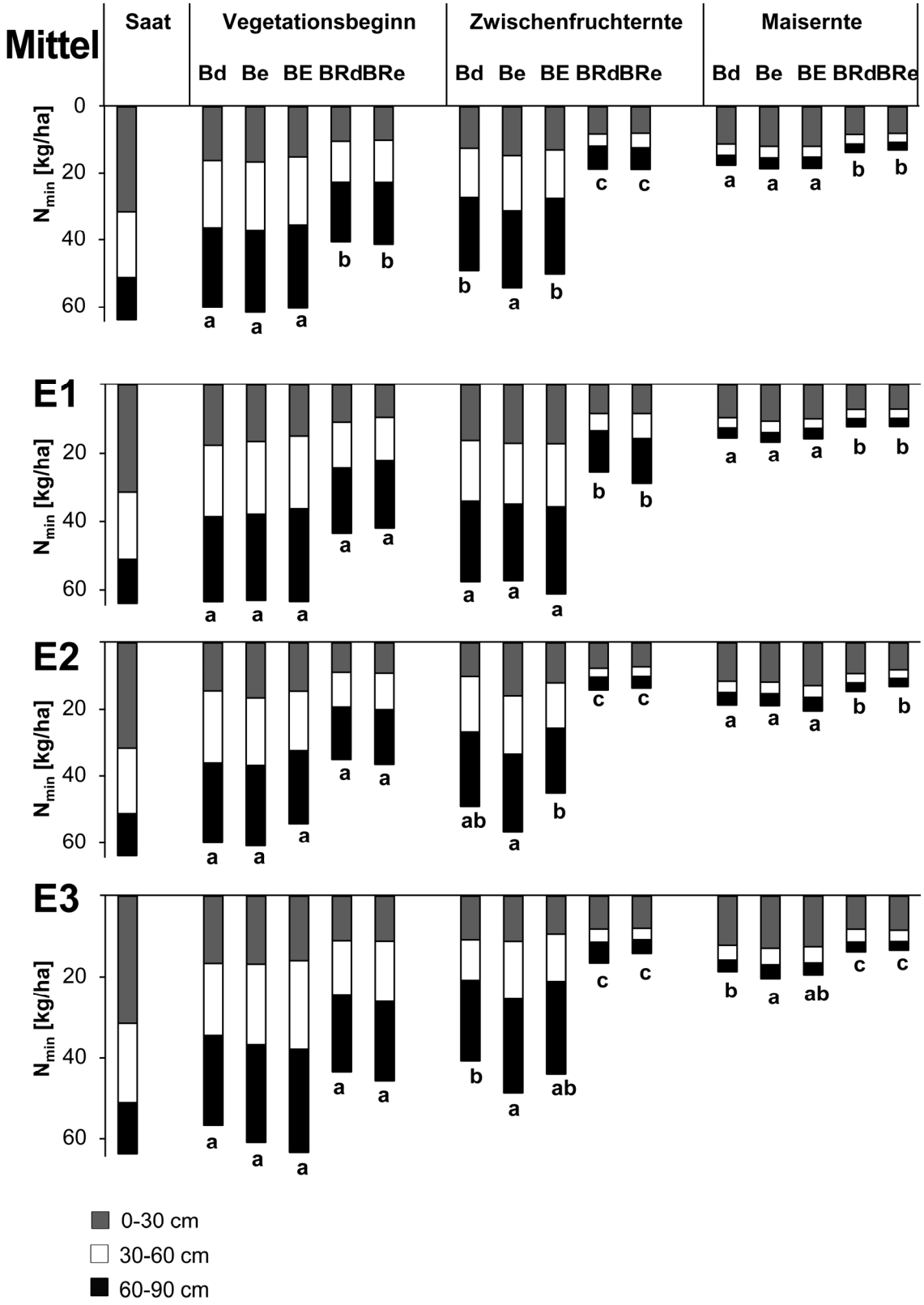

Abb. 3: N_{min}-Gehalte im Boden [kg/ha] in Abhängigkeit von den Winterzwischenfrüchten* und Erntezeiten (E1, E2, E3) zu deren Saat, Vegetationsbeginn, Ernte und Maisernte gemittelt über die anderen Faktoren

*Bd/Be: Winterackerbohne, doppelte/einfache Saatstärke, BE: Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, BRd/BRe: Winterackerbohnen-Winterroggengemenge, doppelte/einfache Saatstärke der Winterackerbohnen, Tukey-Test, α = 5%.
Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten der Winterzwischenfrüchte innerhalb desselben Probenahmezeitpunktes sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.

Die Erntetermine (E1, E2, E3) hatten erst ab der Winterzwischenfruchternte signifikanten Einfluss auf die N_{min}-Gehalte im Boden (Winterzwischenfruchternte: F-Wert = 14,12*, Maisernte: F-Wert = 54,76**). Der Mittelwert der N_{min}-Gehalte der ersten Winterzwischenfruchternte (E1) gemittelt über alle Varianten lag mit 46,37 kg N/ha signifikant über dem der zweiten (E2, 35,66 kg N/ha), welcher sich nicht signifikant vom Mittelwert der dritten Winterzwischenfruchternte (E3, 32,89 kg N/ha) unterschied (Abb. 3). Die Interaktionen zwischen den Winterzwischenfrüchten und den Ernteterminen waren signifikant: Von der ersten zur zweiten Winterzwischenfruchternte sanken die N_{min}-Gehalte unter den Gemengen (BE, BRd, BRe) signifikant, die unter Winterackerbohnen nicht. Auch zum Zeitpunkt der Maisernte wirkten sich die Zeitpunkte der Winterzwischenfruchternten (E1, E2, E3) auf die N_{min}-Gehalte aus. Die N_{min}-Mittelwerte von E1 und E2 sowie E2 und E3 unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Bei den rein legumen Winterzwischenfruchtvarianten lagen die N_{min}-Gehalte im Boden zum ersten Erntetermin (E1) signifikant unter den beiden späteren Ernteterminen (E2, E3). Bei den Winterroggengemengen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Ernteterminen nachgewiesen werden.

Die beiden Versuchsjahre 2007/08 und 2008/09 unterschieden sich hinsichtlich des N_{min}-Gehalts signifikant voneinander. Es lagen signifikante Interaktionen (Vegetationsbeginn F-Wert = 2,96*, Winterzwischenfruchternte F-Wert = 9,20**, Maisernte F-Wert = 18.058**) zwischen den Jahren (J) und den Vorfruchtvarianten (V) vor. N_{min}-Gehalte zu Versuchsbeginn (Saat) lagen im zweiten Jahr (J2) signifikant höher als im ersten (J1). Vor allem in der untersten beprobten Bodenschicht konnten im zweiten Jahr sehr geringe N_{min}-Gehalte nachgewiesen werden. Der Mittelwert aller Winterzwischenfruchtvarianten zu Vegetationsbeginn im ersten Versuchsjahr erreichte 37,30 kg N/ha und lag damit 30,93 kg N/ha unter dem des zweiten Jahres. Alle Winterzwischenfruchtvarianten im ersten Jahr unterschieden von denen des zweiten Jahres signifikant. Zur Winterzwischenfruchternte gemessene N_{min}-Gehalte erreichten gemittelt über alle Faktoren im zweiten Jahr (J2) mit 47,43 kg N/ha siginifikant höhere Gehalte als im ersten Jahr (J1, 29,19 kg N/ha). Die Unterschiede waren bei allen Winterzwischenfruchtvarianten signifikant. Diese Jahreseffekte zeigten sich zur Maisernte nicht mehr ganz so ausgeprägt: Die Mittelwerte über alle Versuchsvarianten unterschieden sich nicht signifikant. Nur die Winterackerbohnenreinsaaten (Be, Be) und das Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (BE) hatten im zweiten Jahr (J2) signifikant höhere N_{min}-Gehalte im Boden hinterlassen.

Der Hauptfaktor Saattermin (Daten nicht dargestellt) wirkte sich ebenfalls signifikant auf die N_{min}-Gehalte im Boden aus. Der Mittelwertsvergleich über alle Faktoren und alle Winterzwischenfruchtvarianten zeigte mit F-Wert = 9,47*, dass zu Vegetationsbeginn frühe Saat (S1) zu einem um 6,97 kg/ha niedrigeren N_{min}-Gehalt im Boden führte als die späte Saat (S2). Zwischen den Saatterminen und Winterzwischenfruchtvarianten lagen keine signifikanten Interaktionen vor. Auch am Beprobungstermin der Winterzwischenfruchternte lagen die N_{min}-Gehalte im Boden der frühen Saat (S1) signifikant niedriger als die der späteren Saat (S2). Auch hier zeigten sich keine signifikanten Interaktionen zwischen den Winterzwischenfrüchten und Saatterminen. Zur Maisernte zeigten sich neben dem

signifikanten Mittelwertsunterschiede über alle Winterzwischenfruchtvarianten signifikante Interaktionen zwischen den Winterzwischenfruchtvarianten und den Saatterminen (F-Wert = 13,74**). Signifikant unterschied sich nur die Winterackerbohnenreinsaat einfacher Saatstärke des ersten Saattermins (Be, S1) von der gleichen Variante des zweiten Saattermins (Be, S2). Die anderen Winterzwischenfruchtvarianten zeigten keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit des Saattermins.

Biogasversuch

Spezifische Biogas- und Methanerträge der Winterzwischenfrüchte

Tab. 10: Spezifische Biogas und Methanerträge der neun Winterzwischenfruchtvarianten* (V) in 2 Jahren (J1, J2),

	J1		J2		Mittel	
V*	Biogas-ertrag [Nl/kg oTR]	Methan-ertrag [Nl/kg oTR]	Biogas-ertrag [Nl/kg oTR]	Methan-ertrag [Nl/kg oTR]	Biogas-ertrag [Nl/kg oTR]	Methan-ertrag [Nl/kg oTR]
Standard	587,20	325,87	617,63	331,7	602,42	328,78
s	601,00	366,77	599,27	320,6	600,13	343,68
d	560,57	316,71	513,5	272,63	537,03	294,67
E1	557,83	304,13	581,33	311,77	569,58	307,95
E3	497,90	273,37	572,07	296,23	534,98	284,80
R	523,03	291,40	649,17	351,07	586,10	321,23
BRe	490,10	287,30	665,22	348,38	577,66	317,84
BRd	666,14	363,76	588,77	317,27	627,45	340,51
BE	612,89	328,71	620,72	329,47	616,80	329,09
Mittel	566,30	317,56	600,85	319,90	583,57	318,73

*Standard: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
E1: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), **früher Erntetermin (E1)**.
d: Reinsaat Winterackerbohne, **doppelte Saatstärke (Bd)**, früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
s: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), **später Saattermin (s)**, mittlerer Erntetermin (E2).
BE: **Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge**, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
E3: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), **später Erntetermin (E3).**
R: **Reinsaat Winterroggen**, einfache Saatstärke (R), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
BRe: Winterackerbohne-Winterroggengemenge, einfache Saatstärke (BRe), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
BRd: Winterackerbohne-Winterroggengemenge, doppelte Saatstärke (BRd), früher Saattermin (f) mittlerer Erntetermin (E2).

Der höchste spezifische Biogasertrag gemittelt über beide Versuchsjahre (2007/08 und 2008/09) wurde mit der Variante BRd gemessen (627,45 Nl Biogas/kg oTS). Bei den spezifischen Biogaserträgen konnten keine signifikanten Einflüsse der Faktoren J und V und deren Interaktion gefunden werden. Der mittlere Methananteil lag über beide Jahre (F-Wert = 0,08) und alle Varianten (F-Wert = 1,14) gemittelt bei 54,61%.

Die spezifischen Methanerträge erreichten im Mittel über beide Versuchsjahre (J1, J2) und alle neun Winterzwischenfruchtvarianten 318,73 Nl CH_4/kg oTR (Tab. 10). Die späte Winterackerbohnenreinsaat erreichte im Mittel über beide Jahre den höchsten, die spät geerntete Winterackerbohnenreinsaat (E3) den niedrigsten spezifischen Methan-

ertrag. Die beiden Hauptfaktoren Jahre (J) und Winterzwischenfruchtvarianten (V) zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die spezifischen Methanerträge. Es gab auch keine signifikante Interaktion zwischen den Jahren und Varianten.

Spezifische Biogas- und Methanerträge der Winterzwischenfrüchte waren mit r = 0,90** hoch signifikant korreliert, weshalb im weiteren Verlauf der Arbeit auf ausführliche Beschreibungen der spezifischen Biogaserträge verzichtet wird.

Biogas- und Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte

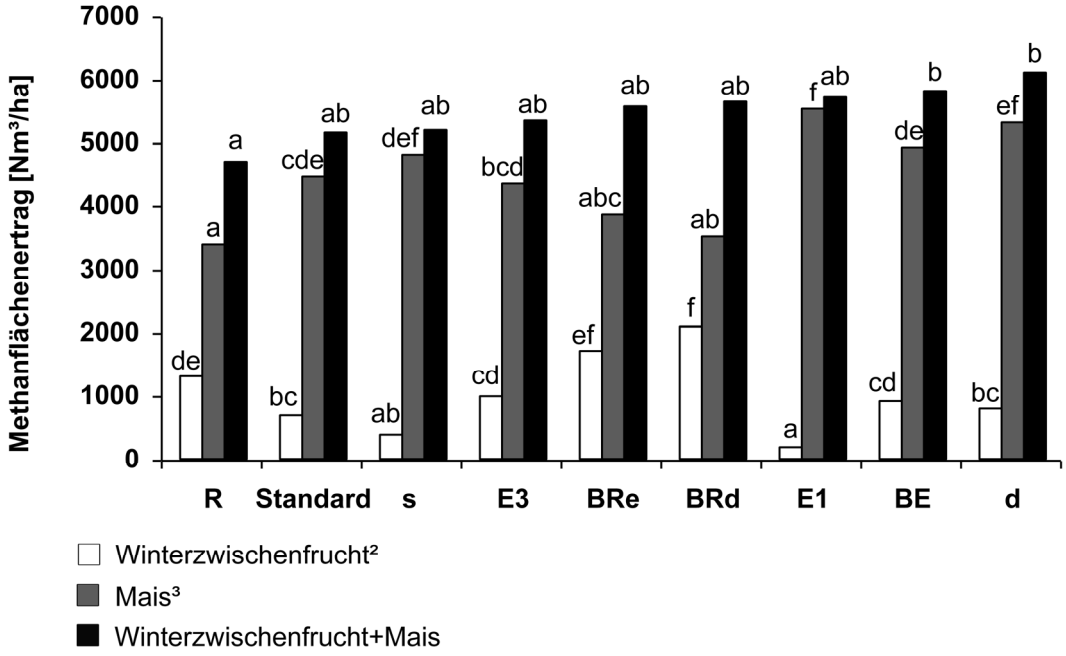

Abb. 4: Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte[1], des Maises und Summe aus Winterzwischenfrucht und Mais gemittelt über beide Versuchsjahre 2007/08 und 2008/09.

[1]Standard: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f) mittlerer Erntetermin (E2).
E1: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), früher Erntetermin (E1).
d: Reinsaat Winterackerbohne, doppelte Saatstärke (Bd), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
s: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), später Saattermin (s), mittlerer Erntetermin (E2).
BE: Reinsaat Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f) mittlerer Erntetermin (E2).
E3: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), später Erntetermin (E3).
R: Reinsaat Winterroggen, einfache Saatstärke (R), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
BRe: Winterackerbohne-Winterroggengemenge, einfache Saatstärke (BRe), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
BRd: Winterackerbohne-Winterroggengemenge, doppelte Saatstärke (BRd), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
[2]: in Batchversuchen ermittelt.
[3]: berechnet nach (DÖHLER ET AL. 2009)

Der mittlere Biogasflächenertrag der Winterzwischenfrüchte betrug im Mittel über beide Faktoren (J, V) 1832,3 Nm³ Biogas/ha. Die Korrelation zwischen dem Methan- und dem Biogasflächenertrag war mit r = 0,996** noch höher als die der spezifischen Gaserträge. So wurde mit denselben Varianten wie beim Methanflächenertrag der höchste und niedrigste Biogasflächenertrag erzielt. Wie bereits bei den spezifischen Biogaser-

trägen wird im Folgenden darauf verzichtet, ausführlich auf die Biogasflächenerträge der Winterzwischenfrüchte einzugehen.

Der Methanflächenertrag der Winterzwischenfrüchte betrug im Mittel über beide Versuchsjahre (J) und alle Varianten (V) 1004,1 Nm³ CH_4/ha. Im Mittel über beide Jahre wurden die signifikant höchsten Methanflächenerträge mit dem Winterackerbohnen-Winterroggengemenge mit doppelter und einfacher Saatstärke der Winterackerbohnen (BRd, BRe) (Abb. 4), die signifikant niedrigsten mit Winterackerbohnen Reinsaaten und früher Ernte oder später Saat (E1, s) erreicht. Nur diese Varianten lagen im Mittel über beide Jahre niedriger als die Standardvariante. Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte konnten mit doppelter Saatstärke der Winterackerbohne (d), Wintererbse oder Winterroggen als Gemengepartner (BE, BRe, BRd), Roggenreinsaat oder auch späterem Erntetermin der Winterackerbohne (E3) gesteigert werden. Signifikant waren die Ertragssteigerungen im Vergleich zu Standardvariante allerdings nur durch die Roggen beinhaltenden Varianten (R, BRe, BRd). Die Änderung des Erntetermins wirkte sich bei früherer Ernte als die der Standardvariante signifikant ertragssenkend aus. Die Verschiebung des Erntetermins auf einen späteren Zeitpunkt (E3) bewirkte im Vergleich zum Standarderntetermin keine signifikante Ertragssteigerung.

Die Differenz zwischen den Methanflächenerträgen der Winterzwischenfrüchte der beiden Versuchsjahre (J1, J2) gemittelt über alle Varianten war signifikant mit F-Wert = 570,66**. Im zweiten Versuchsjahr (J2) wurden mit 816,0 Nm³ CH_4/ha nachweisbar geringere Methanflächenerträge als im ersten Jahr (1192,3 Nm³ CH_4/ha) erzielt.

Die Reihenfolge der Varianten nach der Höhe der Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte war in beiden Jahren unterschiedlich. Allerdings wurden in beiden Jahren die drei niedrigsten Erträge mit den Varianten E1, s und Standard erzielt. Im ersten Versuchsjahr wurde der höchste Methanflächenertrag der Winterzwischenfrüchte mit Winterackerbohnen-Winterroggengemenge mit doppelter Saatstärke der WINTERACKERBOHNEN (BRd) erzielt. Dieser unterschied sich jedoch nicht signifikant vom gleichen Gemenge mit einfacher Saatstärke (BRe). Im zweiten Jahr (J2) unterschieden sich diese Gemenge (BRe, BRd) ebenfalls nicht signifikant voneinander. Der höchste Methanflächenertrag wurde allerdings nicht bei doppelter, sondern mit einfacher Saatstärke in den Gemengen ermittel (BRe).

Methanflächenerträge des Maises

Im Mittel der Versuchsjahre und aller Varianten konnten 4457,3 Nm³ CH_4/ha mit der Zweitfrucht Mais erreicht werden (berechnet nach DÖHLER ET AL. 2009). Die Winterzwischenfruchtvarianten (V) unterschieden sich in ihren nachfolgenden Maismethanflächenertrag signifikant (F-Wert = 16,66**), die Jahre (J) nicht. Der höchste Methanflächenertrag des Maises wurde nach der früh geernteten Winterackerbohnenreinsaat (E1, 5520,8 Nm³ CH_4/ha) erreicht, gefolgt von Mais nach Winterackerbohnenreinsaat doppelter Saatstärke (d) und dem Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge. Varianten, die Winterroggen beinhalteten, führten zu signifikant niedrigeren Methanflächenerträgen des Maises (<3853,7 Nm³ CH_4/ha, Abb. 4).

Gesamtmethanflächenerträge des Zweikulturnutzungssystems

Der Gesamtmethanflächenertrag des Zweikulturnutzungssystems errechnete sich aus der Summe der Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte und des nachfolgenden Maises. Bei den Gesamtmethanflächenerträgen ließ sich nur zwischen der niedrigsten (R) und den höchsten Varianten (d, BE) ein signifikanter Unterschied nachweisen (Abb. 4). Der höchste Gesamtmethanflächenertrag betrug 6104,9 Nm³ CH_4/ha. Gemittelt über alle Faktoren wurde ein Gesamtmethanflächenertrag von 5464,1 Nm³ CH_4/ha erzielt. Die beiden Versuchsjahre (J) unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Trockenmasseerträge, Schwefel- und Stickstofferträge und -gehalte

Tab. 11: Trockenmasse- (TM), Stickstoff- (N) und Schwefelertrag (S) und deren Gehalt in der Trockenmasse der neun Winterzwischenfruchtvarianten (V) gemittelt über beide Versuchsjahre (J1, J2)

V	TM [g/m²]	[1]	N-Ertrag [g/m²]	[1]	N-Gehalt [%]	[1]	S-Ertrag [g/m²]	[1]	S-Gehalt [%]	[1]
E1	81,69	a	2,78	a	3,48	c	0,13	a	0,16	c
s	129,73	a	4,44	a	3,67	c	0,19	a	0,17	c
Standard	249,61	b	9,13	b	3,73	c	0,40	b	0,17	c
d	317,40	bc	10,56	bc	3,28	c	0,42	b	0,14	bc
BE	326,88	bc	10,41	bc	3,27	c	0,47	bc	0,16	c
E3	402,82	cd	14,20	d	3,53	c	0,67	d	0,17	c
R	442,51	d	5,33	a	1,22	a	0,43	bc	0,10	a
BRe	588,81	e	12,90	cd	2,22	b	0,60	cd	0,11	ab
BRd	655,74	e	14,17	d	2,23	b	0,66	d	0,11	ab
Mittel	355,02		9,32		2,96		0,44		0,14	

Standard: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f) mittlerer Erntetermin (E2).
E1: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), früher Erntetermin (E1).
d: Reinsaat Winterackerbohne, doppelte Saatstärke (Bd), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
s: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), später Saattermin (s), mittlerer Erntetermin (E2).
BE: Reinsaat Winterackerbohnen-Wintererbsengemenge, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f) mittlerer Erntetermin (E2).
E3: Reinsaat Winterackerbohne, einfache Saatstärke (Be), früher Saattermin (f), später Erntetermin (E3).
R: Reinsaat Winterroggen, einfache Saatstärke (R), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
BRe: Winterackerbohne-Winterroggengemenge, einfache Saatstärke (BRe), früher Saattermin (f) mittlerer Erntetermin (E2).
BRd: Winterackerbohne-Winterroggengemenge, doppelte Saatstärke (BRd), früher Saattermin (f), mittlerer Erntetermin (E2).
[1] Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Varianten sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.

Die Trockenmasseerträge (TM) der neun Winterzwischenfruchtvarianten (V), mit welchen die Batchversuche durchgeführt wurden, zeigten im Mittel über die beiden Versuchsjahre (J) signifikante Unterschiede (F-Wert = 70,87**). Auch der Faktor J wirkte sich im Mittel über alle Varianten signifikant auf die TM-Erträge aus (F-Wert = 70,87**). Es bestand keine Interaktion zwischen den beiden Faktoren. Der signifikant höchste TM-Ertrag wurde, gemittelt über beide Jahre, bei den Winterroggengemengen (BRd, BRe, Tab. 11) festgestellt, die sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Die Roggenvariante (R) war die Reinsaatvariante mit signifikant höchstem TM-Ertrag und

lag mit 213,23 g TM/m² signifikant unter dem Höchstertrag der Gemenge. Die Ernte der Winterackerbohne (E1) und die spät gesäte Winterackerbohne (s) führten mit weniger als 130 g TM/m² (Tab. 9) zu den signifikant niedrigsten TM-Erträgen. Alle Änderungen der Standardvariante (Standard), außer doppelter Saatstärke (d) und Gemengepartner Wintererbse (BE), verursachten signifikante TM-Ertragsunterschiede.

Der Stickstoffertrag gemittelt über beide Versuchsjahre und alle Varianten betrug 9,32 g/m². Der Höchstertrag wurde mit der Winterackerbohnenreinsaat zum letzten Erntetermin geerntet (E3) gefolgt von den Winterroggengemengen (BRe, BRd) erreicht, der niedrigste lag bei 2,78 g N/m² zum frühen Erntetermin (E1,Tab. 11). Die beiden Versuchsjahre (J) unterschieden sich signifikant voneinander (F-Wert = 23.01*): Im ersten Jahr wurden im Mittel über alle Varianten 10,47 g N/m², im zweiten 8,18 g N/m² gemessen. Die Interaktion der Faktoren Jahre (J) und Winterzwischenfruchtvarianten (V) war ebenfalls signifikant, wenn auch nur bei p = 10% (F-Wert = 2,24+).

Die Stickstoffgehalte der Winterzwischenfruchtvarianten über beide Jahre erreichten im Mittel 2,96%. Die Winterroggenreinsaat (R) wies gemittelt über die beiden Jahre mit 1,22% den signifikant geringsten Stickstoffgehalt auf, gefolgt von den Winterroggengemengen (BRe, BRd), die sich nicht signifikant voneinander unterschieden (Tab. 11). Alle anderen Winterzwischenfruchtvarianten erreichten signifikant höherer Stickstoffgehalte, unterschieden sich aber nicht signifikant voneinander. Je höher der Winterroggenanteil einer Variante, desto geringer war der Stickstoffanteil in der TM. Der Hauptfaktor Jahre (J) wirkte sich signifikant auf die Stickstoffgehalte aus: Im zweiten Jahr wurden mit 3,21% höhere Stickstoffgehalte in den Trockenmasseproben analysiert als im ersten Jahr (2,71%). Es wurde keine signifikante Interaktion der Hauptfaktoren festgestellt.

Die Schwefelerträge erreichten Werte von 0,13 g S/m² zum frühen Erntetermin der Winterackerbohnenreinsaat (E1) bis 0,67 g S/m² bei der spätesten Ackerbohnenreinsaat (E3), die sich nicht signifikant von den Winterackerbohnen-Winterroggengemengen (BRe, BRd) unterschied (Tab. 11). Die Versuchsjahre hatten keinen signifikanten Einfluss auf den Schwefelertrag und es lagen keine Interaktionen zwischen den Versuchsjahren und Varianten vor.

In Tab. 11 wurden die Schwefelgehalte mit einem Mittwelwert von 0,14% gemittelt über beide Jahre dargestellt. Roggenhaltige Varianten (R, BRe, BRd) beinhalteten signifikant weniger Schwefel als rein legume Varianten. Eine Ausnahme bildete die doppelte Winterackerbohnenreinsaat (d), die sich von den Roggengemengen nicht signifikant unterschied. Es zeigte sich, dass der Schwefelgehalt einer Variante mit abnehmendem Roggenanteil steigt. Im zweiten Versuchsjahr lag der Schwefelgehalt gemittelt über alle Varianten (V) signifikant über dem des ersten Jahres und es gab gering signifikante Interaktion zwischen Jahren und Varianten (F-Wert = 2,19+).

Zusatzversuch I: Ertrag und Inhaltsstoffe von Winterackerbohnen in Abhängigkeit vom Erntetermin

Nachfolgende Abbildungen zeigen anhand von Regressionen den Verlauf der TM-Erträge und TS-Gehalte von Winterackerbohnen in Abhängigkeit verschiedener Erntetermine ab dem 4. April (Tag 4) bis 11. Juli 2008 bzw. 2009 (Tag 102), getrennt nach den beiden Versuchsjahren (J1, J2, Abb. 5) und deren Mittel (Abb. 6). Die beiden Versuchsjahre unterschieden sich sowohl beim TM-Ertrag als auch beim TS-Gehalt signifikant voneinander (TM: F-Wert = 105,75**, TS: F-Wert = 104,25**). In beiden Jahren stieg der TM-Ertrag der Winterackerbohnen stetig von Tag 4 bis Tag 102 an. Bis Mitte Mai (ca. Tag 40) war der TM-Zuwachs relativ gering. Danach ist die Steigerung der TM-Erträge pro Tag deutlich größer (Abb. 5, Abb. 6). Im ersten Jahr (J1) wurde als TM-Höchstertrag nur 1004,85 g TM/m² ermittelt, im zweiten (J2) 1686,92 g TM/m² (Abb. 5). Der Ertragsanstieg des zweiten Jahr war steiler als der des ersten. Bei den TS-Gehalten der Winterackerbohnen war bis Tag 66 in J1 (10,91%) bzw. Tag 44 in J2 (9,02 %) ein deutlicher Abfall zu festzustellen. Danach folgte in beiden Jahren ein rascher Anstieg der TS-Gehalte auf nahezu 20% (Abb. 5).

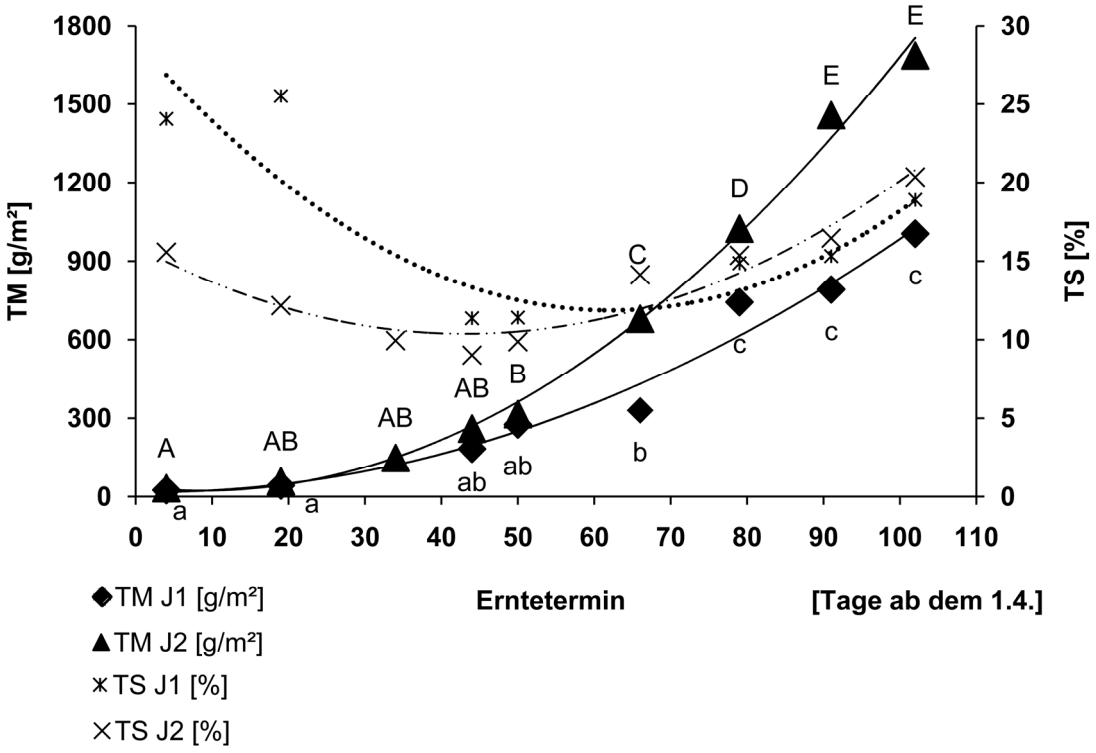

Abb. 5: Trockenmasseertrag (TM) sowie Trockensubstanzgehalt (TS) von Winterackerbohnen in zwei Versuchsjahren 2007/08 und 2008/09 (J1, J2), in Abhängigkeit vom Erntetermin

Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten innerhalb desselben Merkmals sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.

Im Mittel aller Versuchsvarianten befand sich 3,19% Stickstoff (N) und 41,32% Kohlenstoff (C) in der TM des oberirdischen Aufwuchses der Winterackerbohnen. Ab dem 14.

Mai 2008/09 (Tag 44) blieb der C-Gehalt des Aufwuchses nahezu unverändert erhöht bei ca. 43,5% (Abb. 6). Der Stickstoffgehalt der Winterackerbohnen sank im Mittel in beiden Versuchsjahren vom 4. April (Tag 4) zum 11. Juli 2008 bzw. 2009 (Tag 102) signifikant von 3,40% auf 2,48%. Durch den Anstieg des Kohlenstoffgehaltes und das Sinken ab dem dritten Erntetermin des Stickstoffgehaltes wurde das C/N-Verhältnis von 11,78 am Tag 4 auf 20,22 am Tag 102 geweitet.

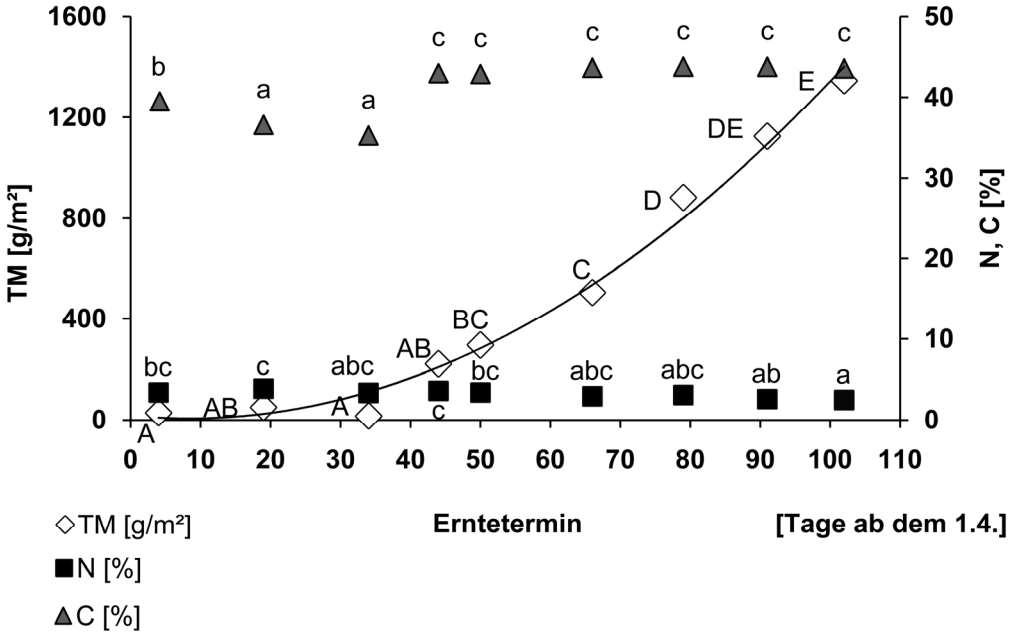

Abb. 6: Trockenmasseertrag (TM), Stickstoff- (N) und Kohlenstoffgehalt (C) von Winterackerbohnen in Anhängigkeit der Erntetermine gemittelt über beide Versuchsjahre.

Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten innerhalb desselben Merkmals sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.

Der Stickstoffertrag (N-Akkumulation) im Spross der Winterackerbohne stieg bis Tag 104 deutlich an (Daten nicht dargestellt). Bis zum 4. Mai 2008 bzw. 2009 (Tag 34) war der Stickstoffertragszuwachs nicht sehr hoch, ab Tag 44 wurde der Anstieg deutlich steiler. Am spätesten Erntetermin wurde der höchste Stickstoffertrag mit 33,44 g N/m² geerntet.

Der mittlere N_{min}-Gehalt in den Bodenschichten bis 90 cm über alle Varianten und Jahre lag bei 35,22 g N/m² (Daten nicht dargestellt). In Abhängigkeit der Erntetermine konnten unter Winterackerbohnen in beiden Jahren keine signifikanten N_{min}-Gehaltsdifferenzen nachgewiesen werden (Daten nicht dargestellt). In der untersten Bodenschicht (60-90 cm) befanden sich ca. 40% des N_{min}. Im Mittel über alle Erntetermine wurden im ersten Versuchsjahr (J1) signifikant niedrigere N_{min}-Gehalte nachgewiesen als im zweiten Jahr (J2).

Zusatzversuch II: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Mais in Abhängigkeit des Saattermins

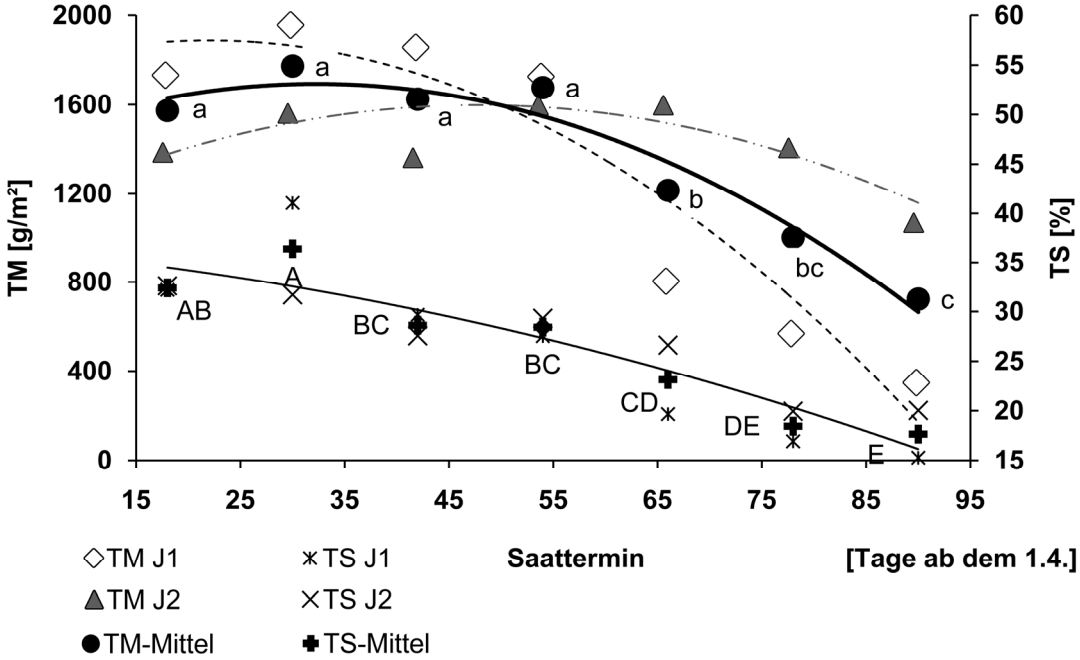

Abb. 7: Trockenmasseertrag (TM) und Trockensubstanzgehalt (TS) von Mais zur Ernte in den beiden Versuchsjahren 2006/07 und 2007/08 (J1, J2) und Mittel in Abhängigkeit vom Saattermin.

Signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet, Tukey-Test, α = 5%

Die TM-Erträge des Maises, der zu verschiedenen Zeitpunkten gesät, jedoch zum selben Zeitpunkt geerntet wurden, unterschieden sich signifikant in den Jahre voneinander (F-Wert = 20,37*). Die Maximumkurven (Abb. 7) der TM-Erträge des Maises in Abhängigkeit des Saattermins erreichen ihre Höhepunkte nicht durch den selben Saattermin: Im ersten Jahr (J1) wurde der maximale Maisertrag durch Saat am 30. April 2007 (Tag 30, 1965,9 g TM/m²), im zweiten (J2) durch Saat am 5. Juni 2008 (Tag 66, 1618,6 g TM/m²) erreicht. Die TM-Erträge des Maises zeigten in beiden Versuchsjahren, dass durch den ersten Saattermin (18. April 2007 bzw. 2008, Tag 18) nicht der maximale TM-Ertrag erzielt werden konnte. Der signifikante Einfluss der Saatzeit auf die TM-Erträge ist in beiden Jahren erst ab dem 5. Erntetermin (5. Juni 2007 bzw. 2008, Tag 66) zu erkennen (Abb. 7). Ab diesem Zeitpunkt wurden signifikant niedrigere TM-Erträge geerntet.

Im Mittel über alle Faktoren wurde ein TS-Gehalt von 26,43% zur Ernte des Maises erreicht. Der TS-Gehalt sank im Mittel über die beiden Jahre signifikant, je später der Saattermin war (Abb. 7). Die maximal erreichte Trockensubstanz betrug 32,4%. Der zum spätesten Zeitpunkt (29. Juni 2007/08) gesäte Mais konnte nur noch einen TS-

Gehalt von 16,76% zur Ernte erreichen. Es gab keinen signifikanten Einfluss der Jahre auf die TS-Gehalte des Maises.

Diskussion

Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte der Winterzwischenfrüchte

Vor allem bei konventioneller Bewirtschaftung wird Roggen für die Biogasproduktion als zusätzlicher Biomasselieferant vor Mais eingesetzt (WORTMANN 2007). Winterroggen ist ein relativ anspruchsloses Getreide, kann auch auf ärmeren Standorten hohe Erträge erzielen und erwies sich unabhängig vom Schnitttermin in Untersuchungen von HAHN (2007) und EDER ET AL. (2008) ertragsreicher als Winterrübsen oder Welsches Weidelgras. Die in der Literatur angegebenen TM-Erträge haben eine große Spannweite, die unter anderem durch genetische Unterschiede, unterschiedliche Düngung, Schnitttermine und Witterung hervorgerufen wird. VETTER (2008), WILLMS ET AL. (2008) und AIGNER (2009) berichten von TM-Erträgen zwischen 30-75 dt TM/ha, HAHN (2007) erreichte dagegen mit Grünschnittroggen Erträge von 15-16 dt TM/ha und EDER ET AL. (2008) berichtet von 10 dt TM/ha zum Ähren- und Rispenschieben. Die Winterroggenreinsaat unserer Versuche lag mit 44 dt TM/ha zwar signifikant unter dem Höchst-TM-Ertrag (66 dt TM/ha), den wir mit früh gesätem Winterackerbohne-Winterroggengemenge zum gleichen Erntetermin erreichten. Sie erzielte aber im Vergleich zu verschiedenen Varianten der Winterackerbohnenreinsaaten höhere Erträge, obwohl keine Stickstoffdüngung erfolgte.

Winterharte Leguminosen wie Wintererbsen können als Winterzwischenfrucht durch ihre Nährstoffbereitstellung für die Zweitfrucht Mais im ökologischen Anbau zu höheren TM-Erträgen führen als herkömmliche Anbausysteme (GRASS 2003). Sie haben aber teilweise unbefriedigende Ertragsleistungen und TS-Gehalte und können nach EDER ET AL. (2008) deshalb nicht für die Biogasproduktion empfohlen werden. Wintererbsen erreichten bei früher Ernte in Versuchen von EDER ET AL. (2008) nur einen TM-Ertrag von 3 dt TM/ha, bei später Ernte in der zweiten Maidekade 18 dt TM/ha. Sie wurden auf Grund dieser geringen Erträge als unbefriedigend eingestuft und nicht weiter als potentielle Winterzwischenfrucht für ein Zweikulturnutzungssystem untersucht. In den beschriebenen Göttinger Versuchen wurde, u.a. gestützt auf diese Aussage und den geringen TM-Ertrag der Erbse im Vergleich zu Roggen und Gemengen bei KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000), auf die Wintererbsenreinsaat verzichtet, obwohl GRASS (2003) von TM-Erträgen bei Wintererbsen bis 60 dt TM/ha TM berichtete. Außerdem traten in unseren Vorversuchen im Jahr 2006/07 unter anderem lagerbedingte Ernteschwierigkeiten mit dem Ganzpflanzenernter auf, was ebenfalls gegen den Anbau von Wintererbsen als Zwischenfrucht für die Biogasproduktion spricht.

Die Winterackerbohne wurde hinsichtlich ihres TM-Ertrags bisher kaum untersucht. Ihr Potential zu Biogasproduktion wurde deshalb in den Versuchsjahren 200/08-2008/09 in Göttingen evaluiert und mit anderen Winterzwischenfrüchten und Gemengen verglichen. Die Reinsaat der Winterackerbohnen mit einer Saatstärke von 35 Korn/m² zeigte in diesen Versuchen im Mittel über alle Faktoren und die Versuchsjahre 2007/08 und 2008/09 den niedrigsten TM-Ertrag (20,35 dt TM/ha). SCHELLER ET AL. (1984) erreichten zu Beginn der Kornfüllungsphase mit Sommerackerbohnen 75,0-91,8 dt TM/ha,

und GHANBARI-BONJAR & LEE, H.C. (2003) mit Winterackerbohnenernten ab Mitte Juni 94-121 dt TM/ha. Diese hohen Erträge sind allerdings nicht direkt mit den TM-Erträgen unserer Versuche vergleichbar, da die Erntetermine zu spät für eine anschließende Maisaussaat lagen.

Mit Gemengen können nicht nur höhere Kornerträge, sondern auch höhere TM-Erträge im Vergleich zur Summe ihrer Reinsaaten geerntet werden (MARTIN & SNAYDON 1982, GÖDEKE ET AL. 2007, HOF-KAUTZ 2008, BÖHM 2009). Dies bestätigen Untersuchungen von GHANBARI-BONJAR & LEE (2003) mit Gemengen aus Weizen bzw. Roggen mit Bohnen. Ein weiterer Vorteil des Gemengeanbaus im Vergleich zu Reinsaaten ist neben der höheren Artenvielfalt auch die größere Ertragsstabilität und höhere Futterqualität, die mit ihnen erreicht werden kann (KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000, GHANBARI-BONJAR & LEE 2003). Wie erwartet wurden positive Ertragseffekte des Gemengeanbaus auch durch unsere Ergebnisse bestätigt: Gemenge mit Winterroggen und Winterackerbohnen – vor allem mit doppelter Saatstärke der Winterackerbohne – erreichten in beiden Versuchsjahren höhere TM-Erträge als die anderen Winterzwischenfrüchte. Es zeigte sich, dass vor allem Gemenge aus Ackerbohnen und Roggen wie die Gemenge der Versuche von KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) aus Ackerbohnen und Weizen hinsichtlich des TM-Ertrags vielversprechend sind.

Durch frühe Saat im Herbst können Winterzwischenfrüchte auf Grund der längeren Nutzung der Vegetationszeit mehr Biomasse produzieren. Der Erfolg von Winterroggen für die Biomasseproduktion hängt von der optimalen Saat ab, da diese zu ausreichender Bestockung führt und eine zügige Jugendentwicklung im Frühjahr ermöglicht (LOCHOW-PETKUS 2007). Bei allen von uns untersuchten Varianten bestätigte sich, dass frühe Saat im September zu höheren TM-Erträgen der Winterzwischenfrüchte führte, als spätere Saat im Oktober.

Der Erntetermin der Winterzwischenfrüchte wirkte sich ebenfalls auf deren TM-Erträge aus. Die Massenwüchsigkeit der Pflanzen im Frühjahr, vor allem ab der letzten Maidekade, spricht für späte Erntetermine der Winterzwischenfrüchte. Deshalb empfehlen GRASS (2003) und EDER ET AL. (2008) nicht früher als Mitte Mai Zwischenfrüchte zu ernten und Mais zu säen.

Die Ernte des Grünschnittroggens sollte, um das Ertragspotential ausschöpfen zu können, nach Empfehlung VON LOCHOW-PETKUS (2007) erst Ende April oder Anfang Mai erfolgen. Dies stimmt nicht ganz mit den Empfehlungen von GRASS (2003) und EDER ET AL. (2008) überein. In Feldversuchen von AIGNER (2009) steigerte sich der TM-Ertrag des Roggens Mitte April bis Mitte Mai um ca. 34 dt TM/ha. Roggen erreichte zum Ährenschieben 102,9 dt TM/ha, die bis zur Teigreife auf 150 dt TM/ha anstiegen (AMON ET AL. 2006). Bei Untersuchungen von AMON EL AL. (2006) erreichten alle Getreide einen TM-Ertrag von 150 dt TM/ha. Diese hohen TM-Erträge wurden allerdings bei den meisten Getreiden erst nach der Milchreife und damit nach einem potentiellen Maissaattermin erreicht. Im späteren Verlauf der Vegetation nahm der TM-Ertrag nur noch gering zu. In unseren Versuchen wurden Roggen-TM-Erträge von 44,2 dt TM/ha erreicht. Die-

se lagen durch die früheren Erntetermine, die die folgende Maisaussaat ermöglichen mussten, deutlich unter den von AMON ET AL. (2006) erzielten Erträgen. Nicht nur bei Getreide sondern auch bei Leguminosen ist der Zeitraum Frühjahr für hohe TM-Erträge wesentlich, da vor und über Winter die Ertragszuwächse gering sind (HAAS ET AL. 2004). Bei Wintererbsen stiegen in Versuchen von EDER ET AL. (2008) und AIGNER (2009) die TM-Erträge von Ende April mit 2,8- 3,0 dt TM/ha bis Mitte Mai auf 18,0-64,7 dt TM/ha. Obwohl der TM-Zuwachs der Ackerbohnen in unseren Versuchen in den Versuchsjahren 2007/08 und 2008/09 bis Mitte Mai relativ gering war und erst ab Ende Mai deutlich zunahm, unterschieden sich die TM-Erträge von Ende April (12,6 dt TM/ha) bis Ende Mai (48,0 dt TM/ha) signifikant voneinander. In beiden Versuchsjahren war nach Ende Mai die Steigerung der TM-Erträge der Ackerbohnen pro Tag deutlich erhöht. Versuche von GHANBARI-BONJAR & LEE (2003) mit Winterweizen und Winterackerbohne bestätigten den Anstieg der TM bis Ende Juni. Nach Anfang Juli wurden in Göttingen keine Biomasseernten mehr durchgeführt. GHANBARI-BONJAR & LEE (2003) bestätigten auch unseren visuellen Eindruck, dass die TM-Erträge von Ackerbohnen ab Juli nicht mehr stark zunahmen, da die Bohnen ihre Blätter ab diesem Zeitpunkt verloren. Somit sollte der Erntetermin, um maximale TM-Erträge mit Winterackerbohnen zu erreichen, nicht vor Mitte Mai erfolgen, aber auch nicht zu weit in den Sommer verschoben werden.

Um nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ hochwertige Biomasse zu ernten, sollte der Erntetermin nicht nur vom TM-Ertrag der Pflanzen abhängen. Der TS-Gehalt von Pflanzen ist ein weiteres wichtiges Kriterium, das berücksichtigt werden muss. Von ihm hängt die technische Erntefähigkeit der Pflanzen ab (SCHELLER ET AL. 1984). Vor allem ist der TS-Gehalt der Gesamtpflanze auch für die Qualität der Silierung von entscheidender Bedeutung (WORTMANN 2007). Der Erntetermin der Winterzwischenfrüchte sollte deshalb nicht nur anhand der maximalen Biomasseproduktion bestimmt, sondern auch nach dem TS-Gehalt festgelegt werden, der ausreichend ist die Biomasse zu silieren (GÖDEKE ET AL. 2007). Dieser TS-Gehalt liegt zwischen 25-35% und führt unter 25% zu schlechter Silagequalität, was niedrigere Biogaserträge zur Folge hat (STÜLPNAGEL 2007, WEILAND 2010). BECKMANN & KOLBE (2000) und AMON ET AL. (2006) fordern sogar TS-Gehalte über 28%. Werden diese Werte mit geernteter Biomasse nicht erreicht, muss vor dem Silieren angewelkt werden.

In Versuchen von AMON (2006) erreichte Getreide erst nach der Milchreife 30% TS. Im weiteren Verlauf dieser Versuche nahm der TS-Gehalt weiter zu und die Silierfähigkeit der Getreidepflanzen verschlechterte sich. Bei Wintererbsen in Reinsaat stiegen bei EDER ET AL. (2008) und AIGNER (2009) die TS-Gehalte von Mitte April (13,9%) bis Mitte Mai auf nur 15,3%. Auch die von uns untersuchten Winterzwischenfrüchte erreichten bis zur Biomasseernte Ende Mai keine zum Silieren ausreichenden TS-Gehalte. Durch zu niedrige TS-Gehalte ist für diese Winterzwischenfrüchte, die vor Maissaat geerntet werden, Anwelken vor dem Silieren nötig. KOLBE ET AL. (2004) berichteten, dass sich Gräser im Zwischenfruchtanbau noch am besten silieren ließen. Untersuchungen von STÜLPNAGEL (2007) bestätigten dies, da sie mit Roggen als Erstkultur die zum Silieren

nötigen 30% TS erreichten. In Versuchen von EDER ET AL. (2008) wurde wie bei uns mit keiner der untersuchten Arten der zum Silieren nötige TS-Gehalt erreicht.

Im Rahmen dieses Projektes wurden keine Untersuchungen zur Siliereignung von Winterackerbohnen durchgeführt. Allerdings ließ sich Ackerbohnenstroh in Versuchen von THAYSEN (2010) gut silieren und auch bei MCVICAR ET AL. (2008) wurden die Ackerbohnen als eine gut silierbare Frucht beschrieben. Die gute Konservierbarkeit und schnelle Fermentation dieser Leguminose bestätigten auch SCHELLER ET AL. (1984), OPLINGER ET AL. (2000), GHANBARI-BONJAR & LEE (2003) und MUSTAFA & SEGUIN (2003) verwiesen auf die Abhängigkeit des TS-Gehaltes vom Erntetermin. Angaben zu TS-Gehalt und genauen Ernteterminen der Ackerbohnen fehlen in den Artikeln einiger Autoren jedoch. Vermutlich lag die Bohnenernte meist nach Mai. Laut SCHELLER ET AL. (1984) liegt der optimale Termin der Ackerbohnenernte drei Wochen vor der Druschreife. Zu diesem Zeitpunkt war die optimale Kombination aus TM-Ertrag und TS-Gehalt gegeben. Der TS-Gehalt betrug hier ca. 35% TS (SCHELLER ET AL. 1984, GHANBARI-BONJAR & LEE 2003). Da die Druschreife der Winterackerbohnen jedoch deutlich nach dem möglichen Aussaattermin für Mais liegt, kommt ein so später Erntetermin der Winterackerbohnen für ein Zweikulturnutzungssystem nicht in Frage. Da der TS-Gehalt der Winterackerbohnen unserer Versuche erst Ende Mai deutlich anstieg, wurden während der gesamten Versuchsdauer keine TS-Gehalte über 20% erreicht. Silieren ohne voriges Anwelken ist bei Winterackerbohnen in Reinsaat, wenn sie als Winterzwischenfrucht vor Mais angebaut werden, somit nicht möglich.

Im Gegensatz zu den Varianten, die nur Leguminosen als Winterzwischenfrucht beinhalten, konnte in unseren Versuchen mit den Roggengemengen höhere TS-Gehalte realisiert werden. Grund war der höhere TS-Gehalt des Roggens. Spätere Ernte führte zur weiteren Steigerung des TS-Gehaltes. Allerding lag der maximale TS-Gehalt auch in den spät geernteten Winterroggen-Winterackerbohnengemengen nur bei 16,71%. Diese Ergebnisse bestätigen die von anderen Autoren beschriebenen Erfahrungen mit TS-Gehalten von Winterzwischenfrüchten für die Biogasnutzung vor Mais. Anwelken scheint nicht nur bei Winterackerbohnen, sondern unabhängig von der Zwischenfrucht durch die relativ frühen Erntetermine unumgänglich zu sein. Der günstigste Nutzungszeitpunkt bei Gräsern für eine gute Silage lag bei KOLBE ET AL. (2004) vor der Blüte zum Zeitpunkt der Knospenbildung, bei Leguminosen zum Zeitpunkt der Blüte. Die Winterzwischenfrüchte, die hinsichtlich des TM-Ertrages zu Biogasnutzung interessant erschienen, sollten hinsichtlich ihrer Siliereignung noch näher untersucht werden, bevor abschließende Handlungsempfehlungen geben werden können (HAAS ET AL. 2004).

Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt der Zweitfrucht Mais

Der TM-Ertrag des Maises spielt in einem Zweikulturnutzungssystem eine entscheidende Rolle. Es muss darauf geachtet werden, dass Mais als Zweitfrucht durch die Winterzwischenfrüchte nicht so hohe Ertragsverluste erleidet, dass sie von dieser nicht kompensiert werden können. Im Zweikulturnutzungssystem konnten bei TOEWS ET AL. (2008) und WILLMS ET AL. (2008) Maiserträge zwischen 170-230 dt TM/ha geerntet

werden. Andere Autoren berichten aber von geringeren Erträgen mit nur 102 dt TM/ha (RAUPP ET AL. 1991) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung. Die maximalen Maiserträge des Zusatzversuchs II ohne vorherige Winterzwischenfrucht erreichten ca. 180 dt TM/ha. Mais nach Leguminosenreinsaaten, der zum frühest möglichen Saattermin gesät wurde, übertraf diesen Wert leicht. Hieraus und aus Ergebnissen anderer Arbeitsgruppen sieht man, dass Zwischenfrüchte starke Einflüsse auf die TM-Erträge des Maises haben (KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000, GRASS & SCHEFFER 2003). Unsere Ergebnisse zeigen, dass Leguminosen positive Auswirkungen auf den Maisertrag haben: TM-Erträge des Maises nach reinen legumen Varianten waren höher als nach Gemengen mit Winterroggen. Durch diese Ergebnisse konnte die Aussage, dass es positive Auswirkungen der Erstfrüchte auf den Maisertrag gibt, bestätigt werden (SCHIERMANN 2004, YUSUF ET AL. 2009).

Nicht nur verschiedene Winterzwischenfrüchte beeinflussten den TM-Ertrag des Maises. Entscheidend ist auch zu welchem Zeitpunkt die Winterzwischenfrucht das Feld räumt, da erst nach diesem Zeitpunkt Mais gesät werden kann. Späte Ernte der Winterzwischenfrüchte hat meist negative Auswirkungen auf den Mais-TM-Ertrag, da der Mais nicht zum optimalen Saattermin gesät werden kann und zu späte Maisaussaat eine verkürzte Vegetationszeit und dadurch ein Sinken des TM-Ertrags zur Folge hat (OLNESS ET AL. 1990, SCHIERMANN 2004). Dies zeigte sich auch in unseren Versuchen, da der Mais-TM-Ertrag niedriger war, je später er nach Anfang Mai gesät wurde. Für Mais spielt die Jugendentwicklung eine entscheidende Rolle, die erst ab einer Bodentemperatur von 9-10°C möglich ist. Wird diese Temperatur unterschritten oder sind die Witterungsbedingungen schlecht, kann der Mais im Wachstum zurückbleiben (BECKMANN & KOLBE 2000). Deshalb hat zu frühe Maisaussaat, obwohl viele Untersuchungen zeigten, dass diese vorteilhaft ist, auch als alleinige Hauptfrucht nicht immer den maximalen TM-Ertrag zu Folge (OLNESS EL AL. 1990). Zu sehen war dies z.B. im Versuchsjahr 2009, in welchem die erste Maihälfte sehr nass und kühl war. Die schlechte Witterung und damit verbunden nicht optimale Saatbettbereitung wirkte sich negativ auf die Jugendentwicklung des früh gesäten Maises aus. Dieser schlechte Start machte sich noch bei der Ernte im Herbst bemerkbar. In beiden Versuchsjahren wurden nach frühsten Saatterminen des Maises nicht die höchsten TM-Erträge des Maises erreicht. Ein weiterer Grund dafür, dass mit frühestem Saattermin des Maises nicht immer die Höchsterträge erreicht werden, ist, dass durch eine Verschiebung des Maisaussaattermins die frühe Pflanzenentwicklung beschleunigt wird, da die Wachstumsrate der jungen Maispflanzen zwischen 10 und 30°C deutlich ansteigt (OLNESS ET AL. 1990). Außerdem hat die späte Ernte der Winterzwischenfrüchte auch positive Auswirkungen, da die Vorfruchtwirkung der Leguminosen nicht so stark verringert wird wie bei früher Ernte.

Obwohl etwas spätere Saattermine des Maises auch Vorteile aufweisen, ist zu beachten (SCHEFFER ET AL. 1984, BECKMANN & KOLBE 2000), dass die spätere Saat und damit der spätere Eintritt des Maises von der vegetativen in die generative Phase zu sinkenden TS-Gehalten führt. BECKMANN & KOLBE (2000) berichten von höheren FM-Erträgen nach späterer Saat. Durch sinkende TS-Gehalte wurde aber nach beiden

Saatterminen der gleiche TM-Ertrag erreicht. Im Zusatzversuch II konnten mit Mais, der nach dem 24. Mai der beiden Versuchsjahre gesät wurde, nur noch ein TS-Gehalt unter 25% erreicht werden, da der Mais zu Ernte noch nicht ganz ausgereift war. Im Hauptversuch wurden nur mit der frühsten Maisaussaat TS-Gehalte über 25% erzielt. Späte Maisaussaat darf nicht dazu führen, dass der Mais im Herbst die Siloreife nicht erreichen kann. Die Auswirkungen eines späteren Maisaussaattermins auf die Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte des Maises sind komplex; es ist nicht einfach, den optimalen Saattermin herauszufinden und durch die Abhängigkeit von der Witterung ist es nicht möglich eine perfekte Vorhersage zu treffen.

Zu beachten ist allerdings, dass in Abhängigkeit vom Maissaattermin eine angepasste Maissorte gewählt werden und bei späterem Saattermin Mais mit niedrigerer Reifezahl bevorzugt werden sollte. In Feldversuchen ist die Vergleichbarkeit der Varianten nicht gegeben wenn verschiedene Maissorten angebaut werden. Aus diesem Grund wurde auch bei den späten Saaten die dafür nicht optimal angepasste Maissorte Atletico verwendet. Desweiteren sollte bei den Ergebnissen aus den hier vorgestellten Göttinger Versuchen bedacht werden, dass auf Stickstoffdüngung gänzlich verzichtet wurde, wie auch BOLLER & NÖSBERGER (1987), KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000), HAUGGAARD-NIELSEN ET AL. (2003) und YUSUF ET AL. (2009) es in einigen Versuchsvarianten handhabten. Vor allem bei nicht-legumer Winterzwischenfrucht konnten deshalb nicht die maximal möglichen Maiserträge erreicht werden (BECKMANN & KOLBE 2000). Außerdem ist die Bewirtschaftung ohne Düngung von Gärresten oder anderen organischen Dünger nicht nachhaltig (WILLMS ET AL. 2009). Auswirkungen der Düngung auf die Erträge sind mehrfach untersucht worden (BECKMANN & KOLBE 2000, KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000, GRASS 2003) und werden auch in der Göttinger Arbeitsgruppe in anderen Feldversuchen untersucht.

Im Gegensatz zu den Ernteterminen hatte die frühe Saat der Winterzwischenfrüchte in unseren Versuchen keine signifikanten Auswirkungen auf den TM-Maisertrag oder dessen TS-Gehalt. Die Vorfruchteffekte änderten sich durch frühe Saat nicht so sehr, dass die Maiserträge davon signifikant profitiert hätten.

Gesamttrockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt des Zweikulturnutzungssystems in den Zusatzversuchen I und II

Mit Zweikulturnutzungssystemen können höhere Gesamtflächenerträge als mit alleiniger Hauptfruchtnutzung oder mit Hauptfruchtnutzung und abfrierender Zwischenfrucht pro Fläche produziert werden. Die Mehrerträge können je nach Standort 40-70 dt TM/ha über einem Hauptfruchtanbau mit Hirse oder Mais liegen (STÜLPNAGEL 2007). Das bekannteste, auch im konventionellen Landbau verbreitete Zweikulturnutzungssystem, ist der Anbau von Roggen als Winterzwischenfrucht (ca. 30-60 dt TM/ha), gefolgt von Mais als Zweitfrucht (ca. 127-190 dt TM/ha) (VETTER 2007). Mit Roggenanbau vor Mais lassen sich Biogasfruchtfolgen optimieren, da mit Roggen als Zwischenfrucht deutlich höhere Gesamt-TM-Erträge als bei alleinigem Maisanbau erreicht werden (LOCHOW-PETKUS 2007, VETTER 2007, TOEWS ET

AL. 2008). In Versuchen von STÜLPNAGEL (2007) und TOEWS ET AL. (2008) konnte eine Steigerung der Erträge von mehr als 19% im Vergleich zum alleinigen Maisanbau erzielt werden.

Im Mittel über alle von uns untersuchten Varianten wurde ein Gesamt-TM-Ertrag von 171,41 dt TM/ha erreicht. Ähnlich hohe Gesamt-TM-Erträge wurden in Versuchen von KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) und GRASS (2003) im Zweikulturnutzungssystem mit Erbse als Erstkultur erzielt (ca. 140-200 dt TM/ha). Bei KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) wurden mit Varianten mit Roggenreinsaat und Gemenge aus Roggen und Erbse niedrigere Erträge als mit Erbsenreinsaat erreicht. GHANBARI-BONJAR & LEE (2003) dagegen berichten von höheren TM-Erträgen mit Gemengevarianten im Vergleich zu Reinsaaten. In Versuchen von GRASS & SCHEFFER (2003) wurde mit Gemengen aus Winterroggen und Wintererbsen vor Mais sogar 240 dt TM/ha geerntet. Unsere Ergebnisse konnten keine dieser widersprüchlichen Aussagen bestätigen. Obwohl die TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte und auch die Mais-TM-Erträge von der Wahl der Wintervorfrucht beeinflusst wurden, unterschieden sich die Gesamt-TM-Erträge unserer Versuche in Abhängigkeit von den verschiedenen Winterzwischenfrüchten nicht signifikant. Dies lag u.a. daran, dass der Gesamt-TM-Ertrag, der sich aus der Summe der TM der Winterzwischenfrucht und der TM des Maises errechnete, nicht mit dem TM-Ertrag der Winterzwischenfrucht korreliert war. Die Korrelation zwischen dem Mais-TM-Ertrag und dem Gesamt-TM-Ertrag betrug r = 0,67**. Da der TM-Ertrag der Winterzwischenfrüchte negativ mit dem TM-Maiserträgen des Maises korrelierte (r = -0,82**), hoben sich positive und negative TM-Ertragseffekte im Gesamt-TM-Ertrag auf. Zwischen den TM-Erträgen der Winterzwischenfrüchte und dem Gesamt-TM-Ertrag lag keine signifikante Korrelation vor. Obwohl der Betrag der Korrelation zwischen dem Mais-TM-Ertrag und dem Gesamt-TM-Ertrag nicht sehr hoch war, hatte der TM-Maisertrag somit mehr Einfluss auf den Gesamt-TM-Ertrag als die TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte.

Auch bei den Ernteterminen, die keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamt-TM-Erträge hatten, wurde dieser Effekt deutlich. Eine späte Ernte der Winterzwischenfrüchte bedeutete für diese eine lange nutzbare Vegetationszeit, in der viel Biomasse gebildet werden konnte. Sie hatte jedoch eine späte Maisaussaat zur Folge und verkürzte somit dessen Vegetationszeit. Durch die verkürzte Vegetationszeit des Maises sanken dessen TM-Erträge. Die beiden aufeinanderfolgenden Früchte standen hierdurch in direkter Konkurrenz um die Wachstumszeit, was sich u.a. in der negativen Korrelation der TM der Wintervorfrüchte mit der TM des Maises ausdrückt. Anhand der Korrelationen der TM-Erträge wird deutlich, dass Mais einen größeren Einfluss auf die Gesamterträge ausübt als die Winterzwischenfrüchte. Der gewählte Erntetermin der Winterzwischenfrüchte war nicht von entscheidender Bedeutung, um den TM-Ertrag des Zweikulturnutzungssystems zu maximieren.

Um diese im Hauptversuch nicht signifikanten Effekte des späteren Erntetermins der Winterzwischenfrüchte und dem daraus folgenden späten Saattermin des Maises zu verdeutlichen, wurden hier die Ertragskurven aus den Daten der Zusatzversuche I und

II miteinander verrechnet (Abb. 3): Durch Aufsummieren der extrapolierten Funktionen der TM-Erträge von Ackerbohne und Mais wurde die Maximumsfunktion f(x) errechnet. Diese stellt den potentiellen TM-Ertragsverlauf der Gesamtflächenerträge des Zweikulturnutzugssystems aus Winterackerbohne und Mais in Abhängigkeit vom Erntetermin der Winterackerbohne und Saattermin des Maises dar. Die erste Ableitung schneidet die Zeitachse 57,73 Tage nach dem 1. April. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Maximum der Gesamt-TM-Erträge von 186,37 dt TM/ha erreicht wird. Die tägliche Zu- bzw. Abnahmen der TM-Erträge in einem Intervall von +/- 15 Tagen um den 58. Tag waren sehr gering. Eine Verschiebung des Erntetermins innerhalb dieses Zeitintervalls veränderte die TM-Gesamterträge um weniger als 1%. Die Zeitspanne, in welcher der Mais gesät werden sollte, um optimale TM-Erträge mit einem Zweikulturnutzungssystem zu erzielen, war deshalb relativ groß und lag zwischen Ende April/Anfang Mai und Anfang Juni. Diese Ergebnisse erklären den nicht signifikanten Einfluss der Erntetermine des Hauptversuchs auf die Gesamt-TM-Erträge, da alle drei Erntetermine innerhalb dieses Zeitraums lagen.

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Berechnungen sehr vereinfacht und nur modellhaft sind, um den Zusammenhang von Gesamt-TM-Ertrag und Erntetermin der Wintervorfrüchte darzustellen. Nicht berücksichtigt wurde u.a., dass die Maisaussaat z.B. durch Anwelken der Winterackerbohnen und Bodenbearbeitung nicht direkt am Erntetermin der Winterackerbohne erfolgen kann. Winterackerbohnen und Mais wurden hier nicht auf der selben Fläche angebaut und die Versuche fanden z.T. in verschiedenen Jahren statt. Weder positive noch negative Vorfruchteffekte wie Stickstoffanreicherung im Boden oder Konkurrenz um Wasser flossen deshalb in diese Berechnung ein. Der in Abb. 3 dargestellte Ansatz des Gesamt-TM-Ertrags in Abhängigkeit vom Erntetermin der Winterackerbohne bzw. vom Saattermin des Maises bleibt u.a. aus obigen Gründen nur eine grobe Annäherung an die tatsächlichen Gesamt-TM-Erträge eines Zweikulturnutzungssystems mit Winterackerbohnen als Zwischenfrucht vor Mais.

Winterackerbohnen erreichten während der gesamten Versuchsdauer keine TS-Gehalte über 20%. In einem Zweikulturnutzungssystem müssen sie deshalb unabhängig vom Erntetermin vor dem Silieren angewelkt werden. Mais, der vor dem Tag 55 (25. Mai) gesät wurde, erreichte zur Ernte noch TS-Gehalte, die zum Silieren ausreichten. Um zusätzlich zum hohen Gesamt-TM-Ertrag die Silierbarkeit des Maises zu gewährleisten, sollte der Mais deshalb vor dem 25. Mai gesät werden. Der optimale Zeitraum um Winterzwischenfrüchte in einem Zweikulturnutzungssystem zu ernten und Mais zu säen, wurde somit auf die Zeit von Ende April/Anfang bis Mitte Mai eingegrenzt. Die Entscheidung wann innerhalb dieses empfohlenen Zeitraumes geerntet werden sollte, beeinflusste das Verhältnis der Erträge von Winterackerbohne und Mais am Gesamt-TM-Ertrag, nicht jedoch den Gesamt-TM-Ertrag (Abb. 3). Die Empfehlung von GRASS & SCHEFFER (2003), spät zu säen, da die Vegetationszeit bis in die letzte Maidekade für die Entwicklung der Erstkultur benötigt wird, konnte basierend auf den Berechnungen und den Ergebnissen des Hauptversuchs nicht bestätigt werden.

Ob spätere Winterzwischenfruchternte kombiniert mit einer spätsaatverträglichen Maissorte eine Alternative zu dem auf Grund der vorliegenden Ergebnisse vorgeschlagenen Maisaussaattermin darstellt, könnte anhand zukünftiger Untersuchungen geklärt werden.

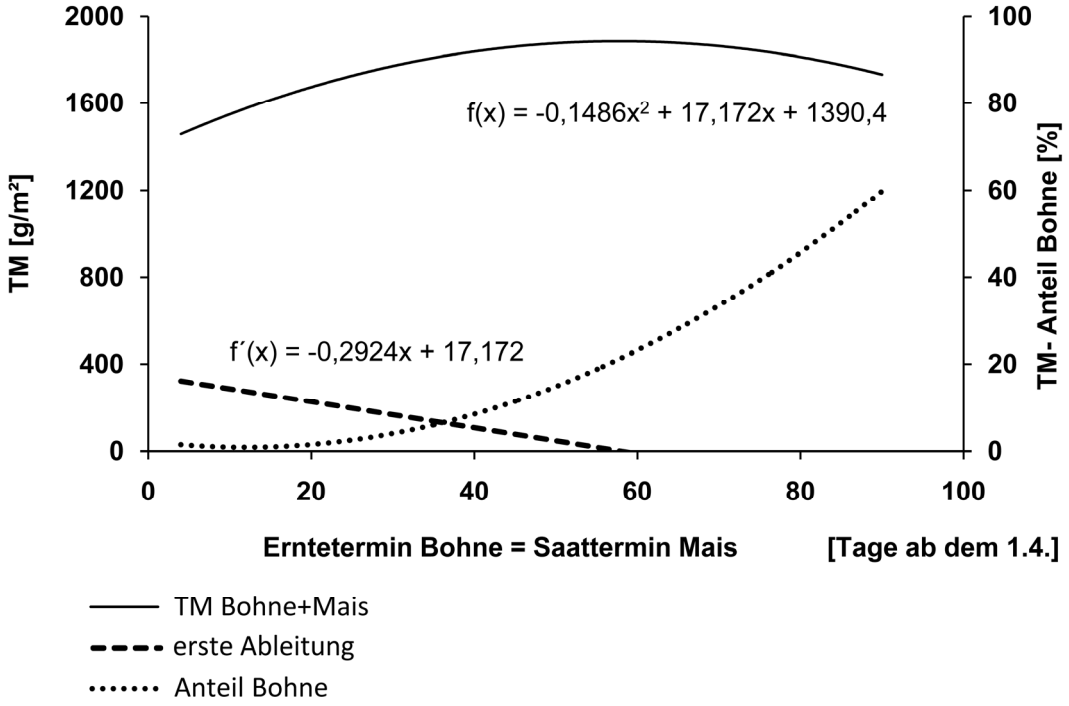

Abb. 8: Errechnete Funktion f(x) des Gesamtflächenertrags (TM) von Winterackerbohne und Mais aus den Zusatzversuchen I und II, deren erste Ableitung f´(x) und Anteil der TM-Gehalte der Winterackerbohne am Gesamtflächenertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin der Winterackerbohne.

In den Versuchen wurde deutlich, dass die Vegetationszeit ein limitierender Faktor der TM-Bildung pro Fläche ist. Mit Maissorten, die erst spät abreifen, kann die Vegetationszeit am Ende des Zweikulturnutzungszeitraumes bereits ausgeschöpft werden. Winterzwischenfrüchte ermöglichen eine Verlängerung der Vegetationszeit zur Biomasseproduktion über Winter. Die frühe Winterzwischenfruchtsaat wirkt sich deshalb als einziger der untersuchten Faktoren signifikant erhöhend auf den Gesamttrockenmasseertrag aus. Frühe Saat der Winterzwischenfrüchte im Herbst ermöglichte TM-Ertragssteigerungen der Winterzwischenfrüchte, ohne TM-Ertragseinbußen des Maises hervorzurufen.

Stickstoffdynamik im Zweikulturnutzungssystem und im Zusatzversuch I

Durch Winterzwischenfrüchte eines Zweikulturnutzungssystems kann Stickstoffverlusten entgegenwirkt werden, da sie freien Stickstoff im Herbst aus dem Boden aufnehmen (KOLBE ET AL. 2004, LOCHOW-PETKUS 2007). Die Abnahme des N_{min}-Gehalts bis zum Vegetationsbeginn war in unseren Versuchen auch unter Leguminosen zu beobachten, da sie während ihrer Jugendentwicklung im Herbst kaum Stickstoff fixieren, sondern ebenfalls auf die Stickstoffvorräte im Boden angewiesen sind (MAYER & HEß 1997). Bedenken, dass Ackerbohnen durch unzureichende Stickstoffaufnahme bodenbürtigen Stickstoffs auf der einen Seite und durch Stickstofffixierung auf der anderen Seite Stickstoff in den Boden eintragen und damit die Auswaschungsgefahr des Bodenstickstoffs über Winter erhöhen (WILLMS ET AL. 2008) bestätigten sich nicht. Die Abnahme des N_{min}-Gehalts im Boden fand unter den Winterzwischenfrüchten bis zum Vegetationsbeginn vor allem in der obersten Bodenschicht statt, während er in der untersten anstieg. Durch das im Winter noch nicht vollständig ausgebildete Wurzelsystem der Leguminosen und die niedrige Wurzellängendichte der Ackerbohnen im Unterboden konnten die unteren Bodenschichten nicht entleert werden (SCHMIDTKE 1997). Möglicherweise kam es außerdem zur Mineralisation unterirdischer Wurzelrückstände der Vorfrucht und zu leichter Stickstoffverlagerung in tiefere Schichten, was den Anstieg des N_{min}-Gehalts dort erklären würde.

Die Reduktion der N_{min}-Gehalte unter reinen Leguminosenbeständen bis zum Vegetationsbeginn war nicht so deutlich wie unter Gemengen aus Winterroggen und Winterackerbohnen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von HOF-KAUTZ (2008) überein, die zeigten, dass Gemenge aus Getreide und Leguminosen pflanzenverfügbaren Stickstoff im Boden ebenso gut abschöpfen wie Getreidereinsaaten, unter Leguminosenreinsaaten aber höhere Stickstoffauswaschungsgefahr besteht. KÖNIG (1996) und SCHIERMANN (2004) berichteten ebenfalls von einer Reduktion des Nitratgehalts im Boden unter Zwischenfrüchten. Die geringere Abnahme des N_{min}-Gehalts unter reinen legumen Varianten könnte mit dadurch zustande gekommen sein, dass Wintererbsen und Winterackerbohnen im Vergleich zu Winterroggen mehr im Samen gespeicherten Stickstoff nach der Saat nutzen können, wodurch weniger N_{min} aus dem Boden aufgenommen werden musste.

Bis zur Ernte der Winterzwischenfrüchte sank der N_{min}-Gehalt unter allen Winterzwischenfrüchten weiter. Obwohl mit der Biomasse Stickstoff abgefahren und zuvor nicht gedüngt wurde, waren bedeutende N_{min}-Gehalte (> 40 kg N/ha) im Boden verblieben. Unter reinen Leguminosen blieb bis zur Zwischenfruchternte wieder ein höherer N_{min}-Gehalt im Boden als unter Roggengemengen, da nicht nur der Ausgangswert zu Vegetationsbeginn sondern vermutlich auch die Aufnahme des bodenbürtigen Stickstoffs im Roggengemenge höher war. Durch die höhere Stickstofffixierung der rein legumen Varianten im Vergleich zu Gemengen mit Winterroggen könnte außerdem Stickstoff in den Boden eingetragen worden sein (SCHMIDTKE 1997, GRASS 2003). KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) bestätigen niedrigere Stickstofffixierung unter Gemengen und begründen diese u.a. mit der niedrigeren Saatstärke der Legumi-

nosen in den Gemengen als in Reinsaaten. Dieser Aussage kann zumindest bis zum Zeitpunkt der Zwischenfruchternten (Ende April/Anfang Mai) nicht zugestimmt werden, da in unseren Versuchen Gemenge mit doppelter Winterackerbohnensaatstärke (53 Korn/m²) signifikant niedrigere N_{min}-Gehalte im Boden hinterließen als die einfache Winterackerbohnenreinsaat mit nur 35 Korn/m². Hieraus ist erkennbar, dass die Aufnahme des bodenbürtigen Stickstoffs unter den Leguminosen bis Anfang Mai höher ist als der Eintrag durch Luftstickstoff, da sonst der mineralische Stickstoffgehalt im Boden mit der Anzahl Pflanzen/m² gestiegen oder konstant geblieben wäre.

Zusätzlich zu Stickstoff, der zur Winterzwischenfruchternte bereits pflanzenverfügbar ist, wird im Laufe der Vegetation mineralisierter Stickstoff aus unterirdischer Biomasse und oberirdischen Ernteresten der Winterzwischenfrüchte dem Mais zur Verfügung gestellt (GRASS 2003). Aus den Wurzeln von Winterackerbohne und Wintererbse können laut KÖPKE (1989) ca. 90 kg/ha höhere Stickstoffmengen freigesetzt werden als bei Winterroggen. Die Menge des Stickstoffs, bestehend aus N_{min} zur Ernte der Zwischenfrüchte und N_{min} während der weiteren Vegetation, die dem Mais als Zweitfrucht zur Biomassebildung zur Verfügung steht, ist nach Leguminosen deshalb höher als nach Gemengen aus Roggen und Leguminosen (KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000). Da wir auf eine Stickstoffdüngung des Maises verzichteten, lassen sich die niedrigeren TM-Erträge des Maises nach Roggengemengen darauf zurückführen, dass Mais nach diesen Gemengen stärkerem Stickstoffmangel ausgesetzt war, als nach den rein legumen Zwischenfrüchten. Gemenge mit Winterroggen stehen somit im Gegensatz zu rein legumen Varianten nicht nur in Konkurrenz um die Wachstumszeit mit Mais, sondern auch um den pflanzenverfügbaren Bodenstickstoff. Je weiter die Zwischenfruchternte verschoben wurde, desto mehr Stickstoff wurde vom Roggen aus dem Boden aufgenommen und stand dadurch dem nachfolgenden Mais nicht mehr zu Verfügung. Dies erklärt neben der Konkurrenz um die Vegetationszeit die negative Korrelation zwischen dem TM-Ertrag der Winterzwischenfrüchte und dem TM-Ertrag des Maises. Im Gegensatz zu den N_{min}-Gehalten der Winterroggengemenge beeinflusste die Erntezeit der Zwischenfrüchte den N_{min}-Gehalt unter den Winterackerbohnenreinsaaten auch bis Anfang Juli nicht. Die Stickstoffaufnahme aus dem Boden konnte durch die Stickstofffixierung von den Leguminosen zum größten Teil kompensiert werden, da die Stickstofffixierung mit der TM-Bildung anstieg (SCHMIDTKE 1997).

In unseren Versuchen zum Zweikulturnutzungssystem wurde keine Variante mit Schwarzbrache angelegt, weshalb keine direkten Vergleiche zum etablierten System des Maisanbaus ohne Winterzwischenfrüchte möglich sind. Untersuchungen von HAAS ET AL. (2004) zeigten allerdings, dass nach Winterzwischenfruchternte die Stickstoffmineralisation der Ernte- und Wurzelrückstände im Vergleich zur Brache zu geringfügig höheren N_{min}-Mengen im Boden führt (HAAS ET AL. 2004). Dieser und andere posititve Vorfruchteffekte der Winterleguminosen treten u.a. in den hohen TM-Erträgen des Maises nach Leguminosen zutage (HAAS 2003).

Durch das hohe Stickstoffaneignungsvermögen des Maises ist dieser auch ein guter Stickstoffverwerter, der im Laufe der Vegetation dem Boden viel freigesetzten Stickstoff

entzieht (BENKE UND MARTENS 2001). Nach GRASS (2003) eignet er sich gut für den ökologischen Landbau, da seine Vegetationszeit und Nährstoffaufnahme vor allem mit spät gesätem Mais bis in den Herbst reicht. Problematisch ist allerdings, dass Mais nach der Ernte höhere Reststickstoffgehalte im Boden als viele andere Kulturen hinterlässt, die zu Auswaschungsverlusten führen können (GRASS 2003, SCHIERMANN 2004). Die neuen ackerbaulichen Strategien wie das Zweikulturnutzungssystem mit Winterkörnerleguminosen müssen deshalb neben hohen Flächenerträgen dem Ziel geringer Stickstoffverluste gerecht werden (MAYER & HESS 1997). Dies bedeutet, dass hohe N_{min}-Gehalte im Boden zu auswaschungsgefährdeten Zeitpunkten vermieden werden sollen.

Mais entzieht Stickstoff aus der Frühjahrsmineralisation nicht sofort, da sein Hauptnährstoffbedarf relativ spät in der Vegetationsphase zwischen Juli und August liegt (BECKMANN & KOLBE 2000). Die Umsetzungsprozesse des organisch gebundenen Stickstoffs der Winterzwischenfrüchte setzen sich im Wachstumsverlauf der Nachkultur fort und erreichen ihren Höhepunkt meist erst zum höchsten Bedarf dieser Kulturen und nicht in der auswaschungsgefährdeten Zeit direkt nach der Maisaussaat (KOLBE ET AL. 2004).

Obwohl die Zeit, die für maximale Akkumulationsraten des Maises benötigt wird, mit der Verzögerung der Aussaat abnimmt (OLNESS ET AL. 1990), stellten wir fest, dass spät gesäter Mais nach seiner Ernte einen höheren N_{min}-Gehalt im Boden hinterließ als früh gesäter. Der Zeitpunkt der Maisaussaat, und damit indirekt der Erntetermin der Winterzwischenfrüchte, wirkte sich vor allem bei rein legumen Varianten auf den N_{min}-Gehalt nach der Maisernte aus. Je später die Maisaussaat nach Leguminosen erfolgte, desto höher waren die Rest-N_{min}-Gehalte im Boden nach der Maisernte, da die Zeitspanne, in der stickstoffzehrende Pflanzen wuchsen (Mais) mit späterer Maisaussaat abnahm. Im Gegensatz zu Leguminosen senkte Winterroggengemenge während seines Wachstums den N_{min}-Gehalt im Boden, waren also auch stickstoffzehrend. Hierdurch steht dem Mais weniger Stickstoff zur Verfügung als nach reinen Leguminosen. Dies führte bei gleicher Stickstoffaufnahmemenge des Maises zu niedrigeren N_{min}-Gehalten nach dessen Ernte. Auch KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) berichteten von geringeren Reststickstoffgehalten nach Winterroggengemenge im Vergleich zu legumen Varianten. Durch den Anbau von Roggen beinhaltenden Gemengen wird die stickstoffzehrende Wachstumszeit verlängert. Da die Spanne der stickstoffzehrenden Zeit (Roggengemenge + Mais) sich über die gesamte Vegetationsphase erstreckt, haben die Erntetermine bei Roggengemengen keinen Einfluss auf deren Länge und somit auch nicht auf den N_{min}-Gehalt im Boden zur Maisernte.

Da nicht nur Roggen, sondern auch Leguminosen direkt nach ihrer Aussaat Stickstoff aus dem Boden nutzen (MAYER & HESS 1997), verringert eine frühe Saat der Winterzwischenfrüchte den N_{min}-Gehalt in allen Varianten unabhängig von der Winterzwischenfrucht. Dies ist selbst im folgenden Herbst nach der Maisernte noch nachweisbar.

Biogas- und Methanerträge der Winterzwischenfrüchte

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen können verschiedene organische Stoffe als Gärsubstrate eingesetzt werden. Auch Grünmasseaufwuchs der Winterzwischenfrüchte aus Zweikulturnutzungssystemen kann nach erfolgreicher Ganzpflanzensilage zur Biogas- und Methanproduktion genutzt werden (EDER 2004). Biogasanlagen können nur dann ökonomisch betrieben werden, wenn ein hoher Biogas- und Methanertrag mit den Substraten, die für die Fermentation verwendet werden, erreicht wird. Deshalb sollten bereits bei der Planung einer Biogasanlage genaue Kenntnisse der erzielbaren Biogas- und Methanausbeuten aus den vorhandenen Substraten vorliegen (HELFFRICH & OECHSNER 2003). Zur Beurteilung unserer verschiedenen Winterzwischenfruchtvarianten wurden Frischmasseproben in diskontinuierlichen Vergärungsversuchen fermentiert (Batchverfahren) und so der Biogas- und Methangehalt, wie auch bei KUSCH & OECHSNER (2004) beschrieben, erhoben.

Methanausbeuten aus Laborversuchen sind, obwohl sie nach wie vor zeit- und kostenintensiv sind, zwischen verschiedenen Institutionen oft nicht direkt vergleichbar (WORTMANN 2007). Vergleiche innerhalb der gleichen Versuchsreihe sind bei normierten Versuchen jedoch möglich. Da keine Silierung der Winterzwischenfrüchte vor der Vergärung erfolgte, könnten die hier vorgestellten Gaserträge im Vergleich zu den in der Praxis erzielbaren Gaserträgen einerseits zu hoch liegen, da die möglichen Energieverluste (8-20%), die durch die Silierung entstehen nicht, berücksichtigt werden (WILLMS ET AL. 2008, BANEMANN & NELLS 2009). Andererseits wiedersprechen dem AMON ET AL. (2003), die von bis zu 26% höheren Methanerträgen durch Silagebereitung im Vergleich zu nicht konservierter Biomasse berichten.

Die spezifischen Biogas- und Methanerträge der von uns evaluierten Winterzwischenfrüchte erzielten im Mittel 584 Nl Biogas/kg oTR bzw. 319 Nl CH_4/kg oTR und erreichten mit diesen Werten ähnliche Ergebnisse wie sie in der Literatur bei Mais beschrieben werden. In Untersuchungen von TOEWS EL AL. (2008) wurden mit Mais 330 Nl CH_4/kg oTR und mit Roggen 350 Nl CH_4/kg oTR erreicht. In Versuchen von AMON ET AL. (2003) wurde mit Kleegrasmischungen sogar mehr als 70 Nl CH_4/kg oTR höhere spezifische Methanerträge gemessen. Die Höhe der spezifischen Methanerträge des Maises wurde in unseren Versuchen aus Kostengründen nicht in Batchversuchen analysiert, sondern Standardwerte aus der Literatur entnommen (DÖHLER ET AL. 2009). Direkte Vergleiche zwischen spezifischen Methanerträgen von Mais und Zwischenfrüchten sind deshalb nicht möglich. WEILAND (2010) berichtet, dass Mais das höchste Biogaspotential aufweist, gefolgt von Getreide. VETTER (2007) stimmt dem zu und erreichte mit Mais, gefolgt von Futterroggen, mit Batchversuchen einen Biogasausbeute von 600 Nl/kg oTR. Die Ergebnisse unserer Batchversuche zeigten keine wesentlichen Unterschiede im spezifischen Methangehalt der Zwischenfrüchte.

Die von HAHN (2007) und KTBL (2007) beschriebene Tendenz, dass die Reife und die hierdurch veränderte Zusammensetzung der Biomasse den spezifischen Methangehalt beeinflusst, konnte nicht bestätigt werden, da die Verschiebung der Erntezeiten sowie

die unterschiedlichen Früchte sich trotz unterschiedlicher TS-Gehalte nicht auf die spezifischen Biogas- und Methanerträge auswirkte. Nach AMON (2004) ist ein ausgewogenes C/N-Verhältnis wichtig, um einen ungestörten Prozessablauf zu gewährleisten; es sollte bei 10-30 liegen. Das C/N-Verhältnis der Winterackerbohnen in unseren Versuchen schwankte zwischen 9,51 und 22,22. Es gab keine signifikante Korrelation zu den spezifischen Methanerträgen. Der TS- und Schwefelgehalt hatte ebenfalls keinen Einfluss auf die spezifischen Methanerträge der Winterzwischenfrüchte. Da bei allen Winterzwischenfrüchten nur sehr niedrige TS-Gehalte erreicht wurden und die Pflanzen zu den Ernteterminen noch nicht sehr verholzt waren, wurden die spezifischen Methanerträge von den TS-Gehalten nicht negativ beeinflusst.

Das Hauptkriterium bei der Wahl der Pflanzen zur Energieerzeugung stellt deren Energieertrag pro Fläche dar, weshalb die Kulturpflanzenarten gefunden werden müssen, die möglichst hohe Methanflächenerträge produzieren (AMON ET AL. 2006, WEILAND 2010). Der Methanflächenertrag hängt zum einen vom jährlichen Biomasseertrag, der u.a. durch Erntezeitpunkt, Düngung, den Standorteigenschaften beeinflusst wird, zum anderen von der zugehörigen spezifischen Methanausbeute ab (EDER ET AL. 2008, LYSON ET AL. 2009). Um den optimalen Erntetermin verschiedener Energiepflanzenarten bestimmen zu können, sollten die Entwicklung der TM-Erträge und TS-Gehalte der Bestände im Verlauf bekannt sein (AMON 2006). In unseren Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte durch frühe Ernte oder späte Saat sanken. Doppelte Saatstärke sowie Gemenge- oder Roggenanbau sowie spätere Erntetermine ließen die Methanhektarerträge im Vergleich zu Winterackerbohnenreinsaat mit einfacher Saatstärke steigen (Abb. 4). Da sich die spezifischen Methanerträge kaum voneinander unterschieden, ist der TM-Ertrag der Winterzwischenfrüchte fast alleine für deren Methanflächenertrag relevant. Dies zeigte sich u.a. auch in der sehr hohen Korrelation (r = 0,99**) des TM-Ertrags der Winterzwischenfrüchte mit deren Methanflächenertrag. Die Winterzwischenfrüchte mit dem höchsten TM-Ertrag sind die Gemenge aus Winterackerbohnen und Winterroggen und somit die Varianten mit den höchsten Methanflächenerträgen. Keine signifikante Korrelation bestand zwischen dem Methanflächenertrag der Winterzwischenfrüchte und dem spezifischen Methanertrag der Winterzwischenfrüchte. Aus diesen beiden Korrelationen lässt sich die Aussage von KAISER ET AL. (2004) bestätigen, dass bei Nachwachsenden Rohstoffen die TM-Erträge eine weitaus bedeutendere Rolle spielen als die spezifischen Methanerträge.

Methanerträge der Zweitfrucht Mais

Da Silomais sehr gute Flächenerträge und Methanausbeuten ermöglicht, hat er sich als wichtige Rohstoffpflanze etabliert (EDER ET AL. 2008). Im Gegensatz zu weniger häufig angebauten Fruchtarten gibt es bereits viele Untersuchungen, die sich mit den Methanausbeuten des Maises beschäftigt haben. Um die Methanflächenerträge des untersuchten Zweikulturnutzungssystems zu berechnen, wurde auf Standardwerte des spezifischen Methanertrags zurückgegriffen (DÖHLER ET AL. 2009). Darüber hinaus wurden, obwohl die Vergleichbarkeit zwischen den Methanerträgen der Zwischenfrüch-

te und des Maises somit nicht optimal möglich war, keine eigenen Batchversuche durchgeführt.

Die Methanflächenerträge errechneten sich aus den Mais-TM-Erträgen und dem spezifischen Methanertrag. Somit wirkten sich alle Einflüsse, die auf die TM des Maises Auswirkungen haben, ebenfalls auf dessen hier berechneten Methanflächenertrag aus. Auch die negative Korrelation zwischen den Methanflächenerträgen des Maises und den Methanflächenerträgen der Winterzwischenfrüchte (r = -0.82**) ergab sich wie bei den TM-Erträgen aus der Konkurrenz der Winterzwischenfrucht mit dem Mais um die nutzbare Vegetationszeit und Nährstoffe. Wie bereits bei den Mais-TM-Erträgen konnte deshalb der höchste Methanflächenertrag nach früh geernteter Winterackerbohnenreinsaat erzielt werden, da der frühe Erntetermin der Zwischenfrüchte einen hohen Maisertrag durch lange Wachstumsphasen ermöglichte. Hinzu kommt, dass Winterackerbohnen den Maisertrag durch positive Vorfruchteffekte, wie relativ hohe N_{min}-Gehalte nach der Zwischenfruchternte oder hohe Stickstoffnachlieferung während der Vegetationszeit des Maises durch Wurzel- und Erntereste steigen ließ. Umgekehrt war der niedrigste Methanflächenertrag des Maises, wie schon die niedrigsten TM-Maiserträge, bei den Roggen beinhaltenden Varianten zu erkennen. Gründe sind bei Roggen fehlende positive Vorfruchteffekte auf den Mais und die hinzukommenden Konkurrenz um Stickstoff. Wie bei Untersuchungen von BECKMANN & KOLBE (2000), bei denen bei Spätsaat des Maises zum Teil deutlich niedrigere Energiemengen pro ha geerntet wurden, sanken die Methanflächenerträge des Maises nach dem ersten Saattermin signifikant.

Gesamtmethanerträge des Zweikulturnutzungssystems

Die Gesamtmethanflächenerträge (Methanflächenertrag Mais + Methanflächenertrag Zwischenfrüchte) waren mit den Gesamt-TM-Erträgen sehr hoch korreliert (r = 0,93**). Da sich die Gesamtflächenerträge der TM in Abhängigkeit der verschiedenen Zwischenfruchtvarianten nicht signifikant voneinander unterschieden, gab es auch kaum Unterschiede zwischen den Gesamtmethanflächenerträgen der Versuchsvarianten. Signifikant verschieden voneinander waren nur die Variante mit Roggenreinsaat und die Variante mit Ackerbohnenreinsaat doppelter Saatstärke, die mit 6105 Nm^3/ha den höchsten Gesamtmethanflächenertrag erreichte (Abb. 4). Außer dem Gesamttrockenmasseertrag korrelierte kein weiteres Merkmal signifikant mit dem Gesamtmethanflächenertrag. Da keine signifikante Korrelation zwischen Gesamtmethanflächenerträgen und den TM-Erträgen der Winterzwischenfrüchte oder denen des Maises gefunden wurde, stellte sich die Frage, wie diese beiden negativ miteinander korrelierten Merkmale tatsächlich im Detail mit dem Gesamtmethanflächenertrag zusammenhängen. Anhand einer multiplen linearen Regression sollte herausgefunden werden, wie groß der Effekt der TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte bzw. des Maises auf den Gesamtmethanflächenertrag ist, wenn der Zusammenhang der beiden TM-Erträge (r = -0,81**) untereinander berücksichtigt wird.

Die Linearkombination, die den multiplen Zusammenhang der Variablen beschrieb lautete:

Gesamtmethanflächenertrag = $33{,}53 + 0{,}29 \times TM_{Zwischenfrucht} + 0{,}30 \times TM_{Mais}$

Der Mittelwert des Gesamtmethanflächenertrags ergibt sich aus den Mittelwerten der Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte und des Maises:

$$\mu_{CH4ges} = \mu_{CH4Zw.Frucht} + \mu_{CH4Mais}$$

$$546{,}4 \text{ Nl } CH_4/m^2 = 100{,}7 \text{ Nl } CH_4/m^2 + 445{,}7 \text{ Nl } CH_4/m^2$$

Mit der Regressionsgleichung des Gesamtmethanflächenertrags werden 95,24% der Variabilität des Gesamtmethanflächenertrags durch die beiden TM-Erträge erklärt. Dies bedeutet, dass der Gesamtmethanflächenertrag fast ausschließlich von der Höhe und Variation der Trockenmasseerträge der Winterzwischenfrüchte und des Maises abhängt.

Da die Korrelation zwischen dem Gesamtmethanflächenertrag und dem Gesamttrockenmasseertrag mit r = 0,93** hochsignifikant ist, ist die Betrachtung der Mittelwerte der Trockenmasse der Winterzwischenfrüchte und des Maises und dem daraus errechneten Gesamttrockenmasseerträge und deren Varianzen so gut wie ausreichend zur Vorhersage der Gesamtmethanflächenerträge.

$$\mu_{TMges} = \mu_{TMZw.Frucht} + \mu_{TMMais}$$

$$1743{,}1 \text{ g TM/m}^2 = 355{,}0 \text{ g TM/m}^2 + 1388{,}1 \text{ g TM/m}^2$$

Die Varianz des Gesamttrockenmasseertrags setzt sich aus den beiden Varianzen der Trockenmassen der Winterzwischenfrüchte und des Maises sowie deren Covarianz zusammen:

(I) $$\begin{aligned} Var(TM_{ges}) &= Var(TM_{Zw.Frucht} + TM_{Mais}) \\ &= Var(TM_{Zw.Frucht}) + Var(M_{Mais}) + 2\,Cov(TM_{Zw.Frucht}, TM_{Mais}) \end{aligned}$$

Mit

(II) $Var(TM_{Zw.Frucht}) = 36726{,}6$ und $Var(M_{Mais}) = 55646{,}5$

(III) $r(TM_{ZW.Frucht}, TM_{Mais}) = -0{,}81^{**}$ und

(IV) $SD(TM_{Zw.Frucht}) = 191{,}6$ und $SD(TM_{Mais}) = 235{,}9$

und der daraus errechneten Covarianz

(V) $$\begin{aligned} &cov(TM_{ZW.Frucht}, TM_{Mais}) = \\ &r(TM_{ZW.Frucht}, TM_{Mais}) \times SD(TM_{Zw.Frucht}) \times SD(TM_{Mais}) = -36475{,}1 \end{aligned}$$

in (I) eingesetzt errechnet sich die Varianz des Gesamttrockenmasseertrags:

$$\text{(VI)} \quad Var\,(TM_{ges}) = 36726{,}6 + 55646{,}5 + 2 \times (-36475{,}1) = 19422{,}9$$

Durch die negative Korrelation der TM der Winterzwischenfrüchte mit der TM des Maises ist die Varianz des Gesamttrockenmasseertrags deutlich niedriger als die beiden einzelnen Varianzen der Trockenmassenerträge.

Die Winterzwischenfrüchte leisteten dennoch auch zur (kleinen) Variation der Gesamtmethanerträge einen wichtigen Beitrag, da ihre Standardabweichung 80% der TM-Erträge des Maises betrug (s.o.; bemerkenswert ist die mit Bezug auf ihren Mittelwert sehr große Streuung des Beitrages der Winterzwischenfrüchte zum Gesamtertrag). Die partiellen Korrelationskoeffizienten beider TM-Erträge waren ($part.r_{Mais}$ = 0,98, $part.r_{Zwischenfrüchte}$ = 0,96) sehr hoch; die Einflüsse beider TM-Erträge auf den Gesamtmethanertrag waren somit, wenn der jeweils andere konstant gehalten wird, erwartungsgemäß sehr hoch. Das Ziel eines möglichst hohen Gesamtmethanertrag auf der Fläche zu erzielen, hing demzufolge sowohl von den TM-Erträgen der Vorfrüchte, noch stärker aber von den TM-Erträgen des Maises ab.

Zusammenfassung

Die Anzahl der Biogasanlagen ist in den letzten Jahren auch im ökologischen Landbau angestiegen. Das meist verwendete pflanzliche Substrat für die Biogaserzeugung ist Mais, da er sehr hohe Flächen- und Methanerträge ermöglicht. Da im ökologischen Landbau auf mineralische Stickstoffdüngung verzichtet wird, kann der hohe Stickstoffbedarf des Maises nur schwer gedeckt werden. Desweiteren führt der Maisanbau oft zu Nachteilen wie Bodenerosion, Stickstoffauswaschung und Problemen bei der Unkrautregulierung. Um diese Schwierigkeiten zu verringern, um hohe Methanflächenerträge zu gewährleisten, und um die Biodiversität und den Körnerleguminosenanbau zu fördern und zu erhöhen wurde ein Zweikulturnutzungssystem mit Winterackerbohnen, Wintererbsen und Winterroggen in Reinsaaten und Gemengen vor Mais untersucht.

Am Standort Göttingen wurden mehrere zweijährige Feldversuche durchgeführt. Im sogenannten „Hauptversuch“ wurde ein Zweikulturnutzungssystem bestehend aus verschiedenen Winterzwischenfrüchten vor Mais untersucht. Die Versuchsanlage bestand aus einer vierstufigen Spaltanlange. Die untersuchten Faktoren waren neben den beiden Versuchsjahren die Winterzwischenfrüchte Winterackerbohne, Wintererbse und Winterroggen in Reinsaaten und Gemengen, die Saat- und Erntezeit der Winterzwischenfrüchte, verschiedene Saatstärken der Winterackerbohne sowie zwei verschiedene Winterackerbohnengenotypen. In diesem Versuch wurde neben Trockenmasseerträgen der Winterzwischenfrüchte und des Maises an mehreren Terminen Bodenproben zur Bestimmung des mineralisierten Stickstoffs (N_{min}) durchgeführt.

Zur Bestimmung der spezifischen Biogas- und Methanerträge der Winterzwischenfrüchte und Berechnung deren Methanflächenerträge wurde ein zweiter Versuch („Biogasversuch“) mit weniger Versuchsvarianten als im Hauptversuch durchgeführt. Es wurden die verschiedenen Winterzwischenfruchtvarianten und die beiden Versuchsjahre als Faktoren analysiert. Neben den Biogas-, Methan- und Trockenmasseerträgen der Winterzwischenfrüchte wurden auch deren Schwefel- und Stickstoffgehalte erhoben. Die Trockenmasseerträge des nachgebauten Maises wurden mit den Trockenmasseerträgen der Winterzwischenfrüchte zum Gesamttrockenmasseertrag addiert, der Methanflächenerträge des Maises wurde anhand von Daten aus der Literatur errechnet. Der Gesamtmethanflächenertrag errechnete sich aus den Methanflächenerträgen der Winterzwischenfrüchte und denen des Maises.

In zwei weiteren jeweils zweijährig angelegten Versuchen wurden Winterackerbohnen- und Maiserträge in Abhängigkeit vom Erntetermin der Winterackerbohnen bzw. vom Saattermin des Maises untersucht (Zusatzversuch I und II). Winterackerbohnen und Mais standen hier nicht nacheinander auf der selben Fläche, sondern wurden auf benachbarten Flächen angebaut. Bei Winterackerbohnen wurden zusätzlich der Kohlenstoff- und Stickstoffertrag, die Trockensubstanzgehalte und N_{min}-Gehalt im Boden bestimmt.

Im Hauptversuch wurde mit den verschiedenen Winterzwischenfrüchten Trockenmasseerträge zwischen 47,19 g TM/m² und 954,46 g TM/m² erzielt. Signifikant wurden die Trockenmasseerträge durch alle Faktoren außer den Winterackerbohnengenotypen beeinflusst. Frühe Saat und späte Ernte bewirkten eine Ertragssteigerung. Höchsterträge der Winterzwischenfrucht wurden mit den Gemengen aus Winterackerbohnen und Winterroggen erreicht. Die Trockensubstanzgehalte wurden ebenfalls von den verschiedenen Winterzwischenfrüchten und deren Ernteterminen beeinflusst. Winterroggengemenge wiesen die höchsten Trockensubstanzgehalte auf und eine späte Ernte steigerte die Trockensubstanzgehalte, die bei keiner Winterzwischenfrucht höher als 16% lagen. Auch der Trockenmasseertrag des Maises wurde von den Winterzwischenfrüchten beeinflusst. Mit rein legumen Winterzwischenfrüchten konnten unter unseren Versuchsbedingungen, ohne Stickstoffdüngung, höhere Maiserträge erreichet werden. Je früher die Winterzwischenfrüchte geerntet wurden, desto früher konnte die Maisaussaat erfolgen und desto höher war der Trockenmasseertrag des Maises. Späte Winterzwischenfruchternte und die daraus resultierende späte Maisaussaat verursachten einen niedrigeren Trockensubstanzgehalt des Maises. Spät gesäter Mais erreichte nur noch einen Trockensubstanzgehalt von 21,09%. Aus der Summe des Trockenmasseertrags der Winterzwischenfrüchte und des Trockenmasseertrags des Maises errechnete sich der Gesamttrockenmasseertrag, der im Mittel 1714,1 g TM/m² betrug. Nur der frühe Saattermin der Winterzwischenfrüchte wirkte sich ertragssteigernd auf den Gesamttrockenmasseertrag aus. Weder verschiedene Zwischenfrüchte noch Erntetermine oder Saatstärken bewirkten signifikante Unterschiede des Gesamtergebnisses. Der mineralische Stickstoffgehalt im Boden unter rein legumen Varianten war sowohl zu Vegetationsbeginn als auch zu den Zwischenfruchternten und auch bis nach der Maisernte signifikant höher als unter Winterackerbohnen-Winterroggengemengen.

Die mittleren spezifischen Biogaserträge aller Winterzwischenfrüchte des „Biogasversuchs“ betrugen 566,3 Nl Biogas/kg oTR, die spezifischen Methanerträge 317,56 Nl Methan/kg oTR. Beide waren mit r = 0,90** hoch signifikant korreliert und unterschieden sich nicht signifikant in Abhängigkeit der Winterzwischenfruchtvarianten. Die errechneten Methanflächenerträge der Winterzwischenfrüchte waren bei den Winterackerbohnen-Winterroggengemenge am höchsten, die des Maises in den Varianten, die früh geerntete Winterackerbohne als Winterzwischenfrucht beinhalteten. Die Gesamtmethanflächenerträge unterschieden sich kaum zwischen den Versuchsvarianten.

Die Ertragskurve des Zusatzversuchs I zeigte, dass der Trockenmassezuwachs der Winterackerbohnen bis Mitte Mai relativ gering war und erst danach eine deutlich größere Steigerung pro Tag erfuhr. Die Trockensubstanzgehalte der Winterackerbohnen verliefen in Form einer Minimumskurve und erreichten die niedrigsten Werte in 66 Tagen (2008) bzw. 44 Tagen (2009) nach dem 1. April.

Die maximalen Maiserträge in Abhängigkeit des Maissaattermins (Zusatzversuch II) wurden nicht durch die früheste Saat erreicht. Saattermine 65 Tage nach dem 1. April verursachten allerdings signifikant niedrigere Trockenmasseerträge des Maises als

frühere. Auch der zur Ernte erreichte Trockensubstanzgehalt des Maises sank mit den späteren Saatterminen.

Ziel landwirtschaftlicher Betriebe ist es, bei der Biogasproduktion in erster Linie möglichst hohe Gesamtmethanflächenerträge zu produzieren. Unsere Ergebnisse zeigten, dass die Variabilität des Gesamtmethanertrags des untersuchten Zweikulturnutzungssystems zu 95% durch die Trockenmasseerträge aus Winterzwischenfrüchten und Mais erklärt und von den weiteren untersuchten Merkmalen nicht wesentlich beeinflusst wurde. Deshalb muss das Augenmerk auf die Maximierung der Gesamttrockenmasseproduktion gelenkt werden. Die Gesamttrockenmasseerträge bestanden auf der einen Seite aus den Trockenmasseerträgen der Winterzwischenfrüchte und auf der anderen Seite aus den Trockenmasseerträgen des Maises. Die Trockenmasseerträge der Winterzwischenfrüchte waren in den Roggengemengen höher als bei rein legumen Varianten. Je später geerntet wurde, desto höhere Winterzwischenfruchterträge wurden erzielt. Gegenläufig reagierten die Trockenmasseerträge des Maises. Je später die Erntetermine der Winterzwischenfrüchte, desto weniger Vegetationszeit verblieb dem Mais. Zwischenfruchtvarianten mit Roggen führten durch die Konkurrenz um Stickstoff zu niedrigeren Maiserträgen. Durch diese sich so erklärende negative Korrelation zwischen den TM-Erträgen des Maises und denen der Winterzwischenfrüchten, hatte weder die angebaute Winterzwischenfrucht, noch deren Erntetermin einen signifikanten Einfluss auf die Gesamttrockenmasseerträge. Der einzige Faktor, der sich positiv auf die Winterzwischenfruchterträge auswirkte, ohne dabei die Maistrockenmasseerträge negativ zu beeinflussen, war ein früherer Saattermin der Winterzwischenfrüchte. Neben möglichst hohen Trockenmasseerträgen spielt die Silierfähigkeit der geernteten Biomasse eine wichtige Rolle. Keine der untersuchten Winterzwischenfruchtvarianten erreichte die zum Silieren nötigen Trockensubstanzgehalte, wodurch ein Anwelken vor dem Silieren der Winterzwischenfrüchte nötig gewesen wäre. Um bei Mais die nötigen Trockensubstanzgehalte zu erreichen, sollte dessen Saat nicht nach Mitte Mai erfolgen. Obwohl die Ackerbohnenreinsaat doppelter Saatstärke die maximalen Trockenmasseerträge erreichte, wird dennoch der Anbau eines Winterackerbohnen-Winterroggengemenges empfohlen. Diese Gemenge erreichten nicht nur höhere Trockensubstanzgehalte, sondern hinterließen auch geringere N_{min}-Gehalte im Boden. Die Gefahr der Auswaschung des Stickstoffs ins Grundwasser war bei ihnen deshalb geringer als bei rein legumen Varianten. Mit Gemengen wird die Biodiversität der Fruchtfolge gesteigert und eine höhere Ertragsstabilität erreicht. Desweiteren können durch geringere Saatgutkosten des Roggens im Vergleich zum Anbau der Winterackerbohnen in Reinsaat Kosten gespart werden.

Das Ziel auch im ökologischen Landbau hohe Methanflächenerträge zu produzieren kann mit dem Zweikulturnutzungssystem mit Gemenge aus Winterackerbohnen und Winterroggen erreicht werden. Das Winterzwischenfruchtgemenge sollte, wenn es die Vorfrucht ermöglicht, im September gesät werden und seine Ernte spätestens Ende Mai erfolgen. Die Gesamtmethanerträge können ohne Stickstoffdüngung sogar leicht über denen des in der landwirtschaftlichen Praxis bereits etablierten Zweikulturnutzungssystems mit Winterroggenreinsaat liegen. Umweltgefährdungen wie Bodenerosi-

onen und zu hohe N_{min}-Mengen nach der Maisernte können durch die Bodenbedeckung mit Winterzwischenfrüchten gesenkt werden. Die Biodiversität der landwirtschaftlich genutzten Flächen kann gesteigert und der Anbau selten gewordenen Körnerleguminosen kann mit diesem neu entwickelten Zweikulturnutzungssystem gefördert werden.

Eine Optimierung des Anbaus des Zweikulturnutzungssystems mit einem Gemenge aus Winterackerbohnen und Winterroggen vor Mais sollte zukünftig in weiteren Versuchen stattfinden. Hierbei könnten noch besser auf dieses Gemenge abgestimmte Saat- und Erntezeiten herausgefunden werden. Mehrortige, mehrjährige Versuche werden empfohlen, um die relative Vorzüglichkeit dieses Systems unter unterschiedlichen agro-ökologischen Bedingungen, insbesondere in Abhängigkeit des Faktors Wasserverbrauch besser zu verstehen.

Literaturverzeichnis

AIGNER, 2009: Derzeitige Einschätzung von Zwischenfrüchten als Substrat zur Biogasgewinung. http://www.lfl.bayern.de/ipz/pflanzenbau_biogas/30222/zwischenfrucht_substrat.pdf, besucht am 5. April 2010.

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, V. BODIROZA, W. ZOLLITSCH, J. BOXBERGER & E.M. PÖTSCH, 2006: Strategien zur nachhaltigen Biogaserzeugung aus Energiepflanzen durch standortangepasste Fruchtfolgesysteme, Sortenwahl und optimale Ernte. Fachkongress Biogas, Linz, 22.02.2006.

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, G. MOITZI, D. LYSON, E. HACKL, D. JEREMIC, W. ZOLLITSCH & E. PÖTSCH, 2003: Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Kleegras. Endbericht Juli 2003. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Nr. 1249.

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, W. ZOLLITSCH, K. MAYER, S. BUGA & A. AMID, 2004: Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. Beitrag zur 54. Züchtertagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, BAL Gumpenstein, 25.-27.11.2003.

ANSPACH, V. & D. MÖLLER, 2007: Strukturen landwirtschaftlicher Biogasproduktion im ökologischen Landbau in Deutschland. Tagungsband der 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bd. 1, 433-436.

ANSPACH, V. & D. MÖLLER, 2008: Biogas and Organic Farming: Emperical evidence on production structure and economics in Germany. In: NEUHOFF, D. ET AL. (eds.): Cultivating the future based on science. Volume 2 – Livestock, Socio-Economy and Cross Disciplinary Research in Organic Agriculture, 604-607.

ANSPACH, V. & D. MÖLLER, 2009: Konzepte und Strategien der Biogaserzeugung im Ökologischen Landbau – Ergebnisse des Bio-Biogas-Monitoring 2007. Tagungsband der 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bd. 1, 390-393.

AUFHAMMER, W., E. KÜBLER & H.-P. KAUL, 1996: Untersuchungen zur Anpassung des Stickstoff-Angebots aus unterschiedlichen N-Quellen an den Verlauf der N-Aufnahme von Maisbeständen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 159, 471-478.

BANEMANN, D. & M. NELLS, 2009: Von der Ernte bis in den Fermenter. VDI 2057, 29-46.

BECKMANN, U. & H. KOLBE, 2000: Maisanbau im ökologischen Landbau. Infodienst für Betratung und Schule der Sächsischen Agrarverwaltung, 04/00, 74-88.

BENKE, M. & R. MARTENS, 2001: Silomaisanbau im Ökologischen Landbau. Mais 3, 92-94.

BÖHM, H., 2009: Körnerleguminosen – Stand des Wissens sowie zukünftiger Forschungsbedarf aus Sicht des Ökologischen Landbaus. Journal für Kulturpflanzen 61 (9), 324-331.

BOLLER, B.C. & J. NÖSBERGER, 1987: Symbiotically fixed nitrogen from field-grown white and red clover mixed with ryegrasses at two levels ob ^{15}N-fertilization. Plant and Soil 104, 219-226.

DÖHLER, H., E. HENNIG, N. FRÖBA, S. GREBE, S. HARTMANN, U. HÄUSSERMANN, S. KLAGES, N. SAUER, S. NAKAZI, A. NIEBAUM, U. ROTH, B. WIRTH & S. WULF, 2009: Faustzahlen Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL Darmstadt, 2. Auflage.

DORMANN, C. & I. KÜHN, 2009: Angewandte Statistik für Biologische Wissenschaften, Helmholtzzentrum für Umweltforschung-UFZ. http://www.ufz.de/data/deutschstatswork7649.pdf, besucht am 24.02.2010.

EDER, B., E. STICKSEL & J. EDER, 2008: Ertragsleistung von Biogasmais nach Winterzwischenfrüchten. Ein Beitrag aus dem Geschäftsbereich des Bayrischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. http://www.lfl.bayern.de/ipz/pflanzenbau_biogas/29705/index.php, besucht am 20.04.2010.

GHANBARI-BONJAR, A. & H.C. LEE, 2003: Intercropped wheat (*Triticum aestivum* L.) and bean (*Vicia faba* L.) as a whole-crop forage: effect of harvest time on forage yield an quality. Grass and Forage Science 58, 28-36.

GÖDEKE, K., A. NEHRING & A. VETTER, 2007: Energiepflanzen clever anbauen. forum.new power – Magazin für erneuerbare Rohstoffe und Energie 3/2007, 34-37.

GRASS, R. & K. SCHEFFER, 2003: Direkt- und Spätsaat von Silomais nach Wintererbsenvorfrucht – Erfahrungen aus Forschung und Praxis. Beiträge zur 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Wien, 45-48.

GRASS, R., 2003: Direkt- und Spätsaat von Silomais – Ein neues Anbausystem zur Reduzierung von Umweltgefährdung und Anbauproblemen bei Optimierung der Erträge. Dissertation, Universität Witzenhausen.

GRUBER, H., U. THAMM & V. MICHEL, 2003: Nitrat-Stickstoffgehalte im Boden in einer 6-feldrigen Fruchtfolge. Ökologischer Landbau der Zukunft, Beiträge zur 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Wien, 467-468.

HAAS, G., H. BRAND & M. PUENTE DE LA VENGA, 2004: Stickstoffversorguung der Zweitfrüchte Feldgemüse und Mais nach Winterzwischenfrucht-Leguminosen. Forschungsbericht FKZ 514-43.10/02OE318, Bundesprogramm Ökologischer Landbau.

HAAS, G., 2003: Leistungsfähigkeit von Winter-Zwischenfrucht-Leguminosen. Beiträge zur 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Wien, 515-516.

HAHN, V. & T. MIEDANER, 2007: Sonnenblumen und Roggenganzpflanzen als Biogassubstrat. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Symposium Energiepflanzen, Bd. 31, 134-140.

HAUGGAAED-NIELSEN, H., P. AMBUS & E. S. JENSEN, 2003: The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. Nutrient Cycling in Agroecosystems 65, 289-300.

HELFRICH, D. & H. OECHSNER, 2003: Hohenheimer Biogasertragstest. Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. Agrartechnische Forschung 9 (3), 27-30.

HOFFMANN, G., 1991: Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Methodenbuch Bd. I, Darmstadt.

HOF-KAUTZ, C., 2008: Ursachen höherer Backqualität von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) im Gemenge mit Winterackerbohne (*Vicia faba* L.) oder Wintererbse (*Pisum sativum* L.). Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.

KAISER, F., M. DIEPOLDER, J. EDER, S. HARTMANN, H. PRESTELE, R. GERLACH, G. ZIEHFREUND & A. GRONAUER, 2004: Ertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, in: Biogas in Bayern, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 43-55.

KARPENSTEIN-MACHAN, M. & R. STÜLPNAGEL, 2000: Biomass and nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. Plant and Soil 218, 215-232.

KOLBE, H., M. SCHUSTER, M. HÄNSEL, A. GRÜNBECK, I. SCHLIESSER, A. KÖHLER, W. KARALUS, B. KRELLING, R. POMMER & B. ARP, 2004: Zwischenfrüchte im Ökologischen Anbau. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft-Fachmaterial.

KÖNIG, U. J., 1996: Zwischenfruchtanbau von Leguminosen. Verfahren zur Minimierung der Nitratausträge und Optimierung des N-Transfers in die Fruchtfolge, Bd. 6, Institut für Biologisch-Dynamische Forschung e.V., Darmstadt.

KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), 2007: Faustzahlen Biogas. Darmstadt, 49-51.

KUSCH, S. & H. OECHSNER, 2004: Feststoffvergärung in Batchreaktoren – erste Versuchsergebnisse. Tagungsband der 13. Jahrestagung „Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft“, 115-124.

LOCHOW-PETKUS, 2007: http://www.lochow-petkus.de/saat/ctrl.jsp?cat=0:124, besucht am 9.4.2010.

LÜTKE ENTRUP, N. & P. ZERHUSEN, 1992: Mais und Umwelt, Dr. Kovac Verlag, Hamburg.

LYSON, D.F., T. RINNOFNER, R. HRBEK, C. LEONHARTSBERGER, T. AMON, W. HEIN & J.K. FRIEDEL, 2009: Ertragsbildung von unterschiedlichen Kulturarten für die Biogaserzeugung im ökologischen Landbau. Tagungsband der 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bd. 1. Beitrag archiviert unter: http://orgprints.org/view/projects/int_conf_2009_wita.html, besucht am 14.03.2010.

MARTIN, M.P.L.D. & R.W. SNAYDON, 1982: Root and shoot interactions between barley and field beans when intercropped. Journal of Applied Ecology 19, 263-272.

MAYER, J. & J. HESS, 1997: Welchen Beitrag zur Stickstoffversorgung leisten Körnerleguminosen? Ökologie und Landbau 3, 18-21.

MCVICAR R., K. PANCHUK, C. BRENZIL, S. HARTLEY, P. PEARSE & A. VADENBERG, 2008: Faba Bean in Saskatchewan, Saskatchewan Ministry of Agriculture. www.agriculture.gov.sk.ca/adx/aspx/adxGetMedia.aspx?DocID=1070,335,185,81,1,Documents&MediaID=5743&Filename=Faba+Bean+in+Saskatchewan+-+Printer+Friendly.pdf, besucht am 15. April 2010.

MÖLLER, K., 2003: Systemwirkungen einer „Biogaswirtschaft“ im ökologischen Landbau: Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf Spurengasemissionen, Biogas Journal 1, 20-29.

MUNZERT, M., 1992: Einführung in das pflanzenbauliche Versuchswesen, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.

MUSTAFA, A.F. & P. SEGUIN, 2003: Characteristics and in situ degradability of whole crop faba bean, pea, and soybean silages. Canadian Journal of Animal Science 83, 793-799.

NEUBAUER, W. & R. KOHLS, 1994: Ergebnisse zur konservierenden Bodenbearbeitung bei Kartoffeln und Mais unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffs in Pflanze und Boden. Mitt. Gesellsch. Pflanzenbauwissensch. 7, 47-50.

OLNESS, A., G.R. BENOIT, V.K. SICKLE & J. RINKE, 1990: Effect of Planting Date on Time and Rate of Nitrogen Accumulation by Maize (*Zea mays* L.), J. Agronomy & Crop Science 164, 42-53.

OPLINGER, E.S., D.H. PUTNAM, J D. DOLL & S.M. COMBS, 2000: Fababean. Alternative field crops manual. Universities of Wisconsin and Minnesota, USA. http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/fababean.html, besucht am 12.03.2010

RAUPP, J., C. LETAIK & F. HAUNZ, 1991: Nitratentwicklung nach Kleegrasumbruch im Frühjahr unter der Folgefrucht Silomais. J. Agronomy & Crop Science 166, 181-190.

SCHEFFER, K., 2000: Biomasse – gespeicherte Sonnenenergie aus der Vielfalt der Pflanzenarten – Potentiale, Bereitstellung, Konversion. Forschungsverbund Sonnenenergie, „Themen 2000“, 34-39.

SCHEFFER, K., E. PAHMEYER & D. SZYMANSKI, 1984: Der Einfluss der Saatzeit auf die Ertragsbildung von Mais, dargestellt an Versuchen mit Folienbedeckung. KALI-BRIEFE Büntehof 17 (2), 145-151.

SCHELLER, H., F. KEYDEL & R. FUCHS, 1984: Untersuchungen über Ertrag und Inhaltsstoffe von Ganzpflanzen bei Ackerbohnen. KALI-BRIEFE Büntehof 17 (1), 59-73.

SCHIERMANN, T., 2004: Untersuchungen zur Variabilität und Kausalität des potentiellen Nitrataustrags beim Anbau von Zea Mais in Deutschland. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.

SCHMIDT, W. & H. BURGER, 2010: Sorten für den Ökolandbau. Mais, Saatgut-Magazin der DLG-Mitteilungen 1/10, 2-5.

SCHMIDTKE, K., 1997: Einfluß von Rotklee (*Trifolium pratense* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen auf symbiontische N_2-Fixierung, bodenbürtige N-Aufnahme und $CaCl_2$-extrahierbare N-Fraktionen im Boden. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen.

STOCKFISCH, N., 1997: Strohabbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in zwei Bodenbearbeitungssystemen. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.

STÜLPNAGEL, R., 2007: Standortvergleiche zum Zweikulturen-Nutzungssystem. Schrifentreihe Nachwachsende Rohstoffe, Symposium Energiepflanzen, Bd. 31,78-96.

THAYSEN, J., 2010: Ackerbohnen-Stroh für Biogas silieren? top agrar 3/2010, 48-49.

THOMAS, E., 2006: Feldversuchswesen, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

TOEWS, T., R. STÜLPNAGEL & C.V. BUTTLAR, 2008: Mit dem Zweifrucht-System den Gewinn erhöhen. Top Agrar 6/2008, 58-60

UTZ, H.F., 1994: PLABCOV Version 1BL. A computer program for statistical covariance analysis of plant breeding experiments. Institute of Plant Breeding, Seed Science, and Population Genetics, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.

UTZ, H.F., 2004: PLABSTAT. Ein Computerprogramm zur statistischen Analyse von pflanzenzüchterischen Experimenten. Version 3. Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik, Universität Hohenheim.

UTZ, H.F., 2007: PLABSTAT Version 2N. A computer program for the computation of variances and covariances. Institute of Plant Breeding, Seed Science, and Population Genetics, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.

VETTER, A., 2008: Anpassung der Pflanzenproduktion an den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln und Energierohstoffen. In: TIEDEMANN, A.V., R. HEITEFUSS & F. FELDMANN, 2008: Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, 16-31.

VETTER, A., 2007: Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die Produktion von Energiepflanzen. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Symposium Energiepflanzen, Bd. 31, 55-67.

WEILAND, P., 2010: Biogas production: current state and perspectives. Appl. Microbiol. Biotechnol. 85, 849-860.

WILLMS, N., J. HUFNAGEL & B. WAGNER, 2008: Nutzen und Risiken des Energiepflanzenanbaus für den Boden. VDLUFA Schriftenreihe 64, Kongressband 2008, 90-99.

WORTMANN, H., 2007: Strategien der SAATEN-UNION im Bereich der Energiepflanzenzüchtung. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Symposium Energiepflanzen, Bd. 31, 123-133.

YUSUF A.A., E.N.O. IWUAFOR, R.C. ABAIDOO, O.O. OLUFAJA & N. SANGINGA, 2009: Grain legume rotation benefits to maize in the northern Guinea savanna of Nigeria: fixed-nitrogen versus other rotation effects. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 84, 129-139.

3 Selektion auf Frosttoleranz von Winterackerbohnen (*Vicia faba* L.): Methodenoptimierung & Ergebnisse

Selection on freezing-tolerance of faba bean (*Vicia faba* L.): Improvement of methods & results

Nachdruck mit Erlaubnis der Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 60. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2009, 31 – 37

Abstract

Freezing-tolerance of winter faba bean is a component of winter-hardiness. The unpredictability of winter conditions hampers any field-based assessment of winter freezing-tolerance. Thus, at Göttingen we employ artificial freezing-tests. These experiments are conducted in a plant growth chamber. The well-establishes freezing methods (Arbaoui et al. 2008) were improved (e.g. optimization of vertical air flow, analysis of horizontal temperature distribution, modified temperature profile of the freezing-tests). Furthermore, new traits to assess freezing-tolerance were added. Based on these optimized artificial freezing-tests and on field trials from the seasons 2006/07 to 2008/09, the most frost and disease resistant winter faba bean lines were selected. This selection was based on a selection index, (composed of disposition to survive and regrowth after frost) and on susceptibility of the plants for Ascochyta and Botrytis. The best of 36 homozygous inbred lines were S4_122, S5_69, S4_151. Their survival rates were about 90%. These lines were developed from the “Göttinger Winter Faba Bean Population”.

Keywords: Winter faba bean; Vicia faba; winter hardiness; frost tolerance; artificial frost test.

Einleitung

Die Anbauflächen der in Europa einheimischen Körnerleguminosen und ihre Bedeutung in der Landwirtschaft ist seit Jahren rückläufig (SPECHT 2009). Im Gegensatz dazu ist die Anbaufläche von Sommerackerbohnen in den letzten zehn Jahren in ihren Hauptanbauregionen (Vereinigtes Königreich und Frankreich) leicht angestiegen und die der Winterackerbohnen blieb relativ stabil (SASS 2009). Winterackerbohnen zeichnen sich im Vergleich zu Sommerackerbohnen durch höhere Erträge bei früherer Reife aus (GHAOUTI 2007 und LINK 2009). Weitere Vorzüge sind geringere Saatstärke, gute Unkrautunterdrückung - die vor allem im Ökologischen Landbau eine wichtige Rolle spielt - sowie höhere Ertragsstabilität durch Ertragsbildung vor Blattlaus- und Pilzbefall. Eine durch den fortschreitenden Klimawandel zunehmend häufiger zu erwartende Wasserknappheit am Sommeranfang führt bei Winterackerbohnen zu geringeren Ertragseinbußen als bei Sommerackerbohnen. Trotz dieser Vorteile werden in kontinentaleren Regionen Europas wie Deutschland, Österreich oder Polen fast keine Winterackerbohnen angebaut. Der Grund hierfür ist eine für diese Regionen bislang noch nicht ausreichende Winterhärte (LINK und ARBAOUI 2005). Frosttoleranz kann als ein Bestandteil der Winterhärte in Feldversuchen wegen der Unvorhersagbarkeit der jeweiligen Winterbedingungen nur unzureichend untersucht werden. Deshalb werden in Göt-

tingen seit 2003 unter anderem Frostversuche mit Winterackerbohnen in einer Frostkammer durchgeführt. Die bisher erfolgreich etablierte Methode wurde technisch und hinsichtlich des Temperaturprofils verändert; neue Merkmale zur Evaluierung der frostresistentesten Winterackerbohnenlinien wurden entwickelt. Dadurch kann unter anderem mehr Pflanzenmaterial pro Saison getestet werden. Aus 36 Winterackerbohnenlinien wurden hier mit Hilfe dieser optimierten Frostkammermethode und mit Feldversuchen frost- und krankheitsresistente Winterackerbohnenlinien selektiert.

Material und Methoden

Pflanzenmaterial: Das untersuchte Material umfasste 35 Inzuchtlinien aus der genetisch breiten Göttinger Winterackerbohnenpopulation sowie eine Kontrolllinie. Die Inzuchtlinien der Göttinger Winterackerbohnenpopulation setzten sich wie folgt zusammen: (1) Linien aus der Kreuzung von Côte d`Or/1 x BPL4628. Côte d`Or/1 ist eine Linie aus einer französischen Landsorte, BPL4628 eine chinesische Inzuchtlinie (ICARDA). Beide sind mit hoher Frosttoleranz ausgestattet (DUC and PETIT JEAN 1995, OLSZEWSKI und HERZOG 1994); (2) Vertreter der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (WAB, S4, S5). Als Kontrolle wurde eine Inzuchtlinie aus der französischen Sorte Diva (2002/Agri-Obtentions) verwendet (Tab. 12). Das Material wurde in einer Frostkammer (VÖTSCH VB 4018 extra) sowie in Feldversuchen untersucht.

Tab. 12: Prüfgliedliste der Winterackerbohnenlinien, die in Frostkammerversuchen getestet wurden

PG	Inzuchtlinie	PG	Inzuchtlinie	PG	Inzuchtlinie
4	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.1)-5-4	**25**	S4_028	**1**	S4_230
5	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.1)-18-3	**6**	S4_038	**31**	S4_232
23	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.2)-20-3	**7**	S4_050	**11**	S4_244
3	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.3)-40-3	**19**	S4_054	**20**	S4_253
12	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.3)-41-3	**27**	S4_101	**29**	S4_268
28	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.4)-52-3	**17**	S4_122	**9**	S5_29
10	(Cote d`Or/1-1 x BPL4628/1521.6)-95-3	**15**	S4_151	**35**	S5_69
33	WAB98_21 IL`04	**26**	S4_184	**34**	S5_151
22	WAB-EP02-Fam/S1_157-1-2-4-3	**2**	S4_191	**16**	S5_213
32	WAB-EP02-Fam/S1_159-1-2-4-1	**13**	S4_196	**8**	S5_252
14	WAB-EP02-Fam/S1_159-1-2-4-3	**21**	S4_221	**36**	S5_326
24	WAB-EP02-Fam/S1_159-1-2-4-3	**30**	S4_228	**18**	Diva-3

Frostkammerversuche: Die Untersuchungen in der Frostkammer erfolgten analog der in Göttingen etablierten Methode (ARBAOUI et al. 2008). Diese Methode wurde technisch optimiert, indem eine bessere vertikale Durchlüftung ermöglicht, die horizontale Temperaturverteilung analysiert, die Versuchsanlage und Anordnung der Pflanzen in den Töpfen verändert (Abb. 9), die Samenablage exakter definiert, Töpfe isoliert und das Temperaturprofil des Tests verändert wurden. Bisherige Merkmale der Frosttoleranz wurden um neue ergänzt.

Abb. 9: Anordnung von vier Prüfgliedern (mit je zwei Einzelpflanzen) als Teilblock in einem isolierten Topf

Versuchsaufbau: Bei jedem der insgesamt drei Durchgänge in der Frostkammer wurden zwei Dreisatzgitter (9x4 Rechteckgitter) angelegt. Jeder Topf entsprach einem Teilblock und enthielt somit vier Prüfglieder, die mit je zwei Einzelpflanzen vertreten waren (Abb. 9). Die Saat erfolgte in exakt standardisierter Ablage und Anordnung der Prüfglieder im Topf. Pro Durchgang wurden 54 Töpfe verwendet. Jeder war mit einer 5kg Sand-Kompost-Mischung im Verhältnis 1:1 gefüllt. Die Töpfe wurden auf 70-80% der Wasserhaltekapazität eingestellt, die Luftfeuchte in der Frostkammer betrug 80-90%. Die Töpfe wurden mit einer ca. 1cm dicken Styroporisolierung versehen, um den in vorigen Versuchen beobachteten untypischen Erfrierungsverlauf der Wurzeln zu vermeiden (unveröffentlichte Ergebnisse ROTH und RODE 2009).

Versuchsdurchführung: Die Anzucht der Prüfglieder erfolgte im Gewächshaus bei einer Temperatur von 15-20 °C. Die anschließende Härtung der Pflanzen erfolgte in der Frostkammer zwei Tage bei 6°C tagsüber und 5° nachts und neun Tage mit einer 1°C niedrigerer Temperatur (5°C/4°C). Der Tag-Nacht-Rhythmus war 10 zu 14 Stunden (Kurztag). Im Anschluss an die Härtung erfolgten die Frosttests, deren Temperaturprofil aus zwei Frststufen in zwei aufeinanderfolgenden Nächten bestand. Der Tag-Nacht-Rhythmus blieb identisch zur Härtungsphase. Der Frost erfolgte in der Nachtphase. Diese bestand aus einer sechsstündigen Abkühlungsphase mit darauffolgender Frostphase (Frost I oder II), die vier Stunden konstant gehalten wurde. Es schloss sich eine Erwärmungsphase von vier Stunden auf die Tagtemperatur von 5°C an. In Tagphasen wurde immer eine Lichtintensität auf 200µmol/sm² programmiert. Die Pflanzen wurden einen Tag nach der zweiten Frostnacht aus der Kammer genommen und in ein Gewächshaus bei 10-15°C gestellt. Drei Tage nach Frost II wurden sie oberhalb des zweiten Nodiums abgeschnitten, um einheitliche Wiederaufwuchsbedingungen zu schaffen. Während der insgesamt 60-tägigen Versuchsdauer wurden folgende Merkmale erfasst bzw. bonitiert: Laubblattanzahl und Pflanzenhöhe am Tag vor Frost I, Turgeszens-

verlust und Blattverfärbung am Ende der Tagphase nach Frost I und II sowie drei Tage nach Frost II, Frischmasseertrag nach dem Schnitt der Winterackerbohnen oberhalb des zweiten Nodiums, Überlebensrate der Pflanzen und die Frischmasse ihres Wiederaufwuchses (Versuchsende am Tag 60), Überlebenszeit (täglich).

Versuchsauswertung: Bei frostunabhängigen Merkmalen (Laubblattanzahl, Pflanzenhöhe, Frischmasseertrag) wurden nach den Gitteranalysen die gitteradjustierten Mittelwerte verwendet, um eine weitere Varianzanalyse und eine Kovarianzanalyse durchzuführen.

Bei Betrachtung der frostabhängigen Merkmale Wiederaufwuchs, Überlebensrate und Überlebensneigung bestätigte sich die vorliegende Erfahrung, dass die horizontale Temperaturverteilung in der Kältekammer nicht homogen ist. Die äußeren Topfreihen erfahren mehr Frost als die inneren. Die Ausprägung der Frostschäden der Pflanzen zeigen einen Zusammenhang mit den logarithmierten (ln) Topfkoordinaten (Position in der Kammer, X1 und X2; unveröffentliche Ergebnisse). Deshalb wurden diese drei Merkmale (statt eine Adjustierung mittels Gitteranalyse durchzuführen) mittels eines anhand der Topfkoordinaten (von aussen nach innen) errechneten Korrekturwertes adjustiert. An jeder Topfposition wurde ein Merkmalsmittel über alle Durchgänge errechnet. Dann wurde die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Position als Abhängigkeit von den logarithmierten Topfkoordinaten (Reihe X1, Spalte X2) mittels einer Regression beschrieben: $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X1 + \beta_2 \ln X2$. Diese Regressionen führten zu R^2-Werten der drei Merkmale von $0{,}49 < R^2 < 0{,}63$ (Tab. 13). Der R-prozentuale Anteil der Differenz des Prüfgliedwertes zum (aufgrund Topfposition mittels Regression vorhergesagten) Positionswert wurde für die Adjustierung verwendet.

Tab. 13: Regressionkoeffizienten dreier frostabhängiger Merkmale nach multipler Regression auf die logaritmierten Topfkoordinaten

Merkmal	Regressionskoeffizienten*			
	β_0	β_1	β_2	R^2 [%]
Wiederaufwuchs [g]	3,112	2,665	1,573	62,72
Überlebensrate [%]	31,44	22,01	13,79	49,02
Überlebensneigung [°]	58,05	10,78	6,498	51,21

*der unabhängige Variablen: Topfkoordinaten ln (X1) und ln (X2)

Die frostabhängigen Merkmale Verfärbung und Turgeszenzverlust wurden analog der frostunabhängigen Merkmale verrechnet, da sich für diese Merkmale keine deutlichen Positionseffekte in der Kammer ergaben. Alle statistischen Analysen erfolgten mit PLABSTAT (UTZ 2004 und UTZ 2007) bzw. mit PLABCOV (UTZ, 1994). Die Berechnung der Korrelationen erfolgte ebenfalls mit PLABSTAT. Um nicht auf die Normalverteilung der Daten angewiesen zu sein (was bei den bonitierten Merkmalen nicht zutrifft) wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman verwendet, wie er in der BASIC-Routine in PLABSTAT implementiert ist. Für die Selektion der kältetolerantesten Winterackerbohnenlinien wurde aus den Ergebnissen der Kovarianzanalyse ein Optimums-

Index gebildet, der aus dem Hauptmerkmal der Überlebensneigung (s.u.) und dem Hilfsmerkmal des Wiederaufwuchses besteht. Die Berechnung der Indexkoeffizienten erfolgte nach Baker (1986); das Hilfsmerkmal erhielt ein ökonomisches Gewicht von Null. Der resultierende Index lautete: $Index_{Frostkammer}$ = 0,5611 x Überlebensneigung + 1,1436 x Wiederaufwuchs.

Feldversuche: Die 36 in der Frostkammer getesteten Winterackerbohnenlinien (Tab. 12) wurden 2006-2009 im Beobachtungsanbau mit weiteren Winterackerbohnenlinien am Versuchsstandort Göttingen, Reinshof untersucht. Im Versuchsjahr 2006/07 wurden sie mit weiteren 364 Prüfgliedern einfach wiederholt (r = 1) angebaut. 2007/08 standen sie mit r = 4 Wiederholungen und 2008/09 mit r = 2 Wiederholungen jeweils in einer 12x16 Gitteranlage. Es erfolgten in jedem Jahr Bonituren zur Überwinterung (Feldaufgang, Pflanzenanzahl, Bestand), Blühbeginn, Krankheiten (Ascochyta, Botrytis, Mehltau), Biomasse, Wuchshöhe, Lager und Reife. Desweiteren wurde der Kornertrag erhoben. Auswinterung gab es in diesen drei Jahren kaum. Die statistische Verrechnung erfolgte für alle drei Versuchsjahre mit PLABSTAT. Daten des einfach wiederholten Versuchs 2006/07 wurde mit Hilfe des gleitenden Mittelwertverfahrens adjustiert. Die Daten der beiden mehrfach wiederholten Versuche 2007/08 und 2008/09 wurden gitteradjustiert. Nach den Adjustierungen erfolgte eine Varianzanalyse über die drei Versuchsjahre und alle gemeinsamen Prüfglieder.

Ergebnisse und Diskussion

Frostkammerversuche: Die mittlere Überlebensrate der Winterackerbohnen nach 60 Tagen im Durchgang A betrug 72,9% nach den beiden Frostnächten mit -13°C und -15,5°C (Tab. 14). In den folgenden Durchgängen wurde die Temperatur der zweiten Frostnacht auf -17,5°C erniedrigt, um eine bessere Differenzierung der Linien zu erhalten. Über alle Durchgänge hinweg konnte so eine mittlere Überlebensrate von 68,9% und eine mittlere Überlebensneigung (s.u.) von 76° erreicht werden.

Tab. 14: Minimumtemperaturen, Mittlere Überlebensrate nach 60 Tagen und Mittlere Überlebensneigung über alle 36 Winterackerbohnenlinien und Durchgänge der Frostkammerversuche.

Durchgang	Minimum-Temperatur Frost I	Minimum-Temperatur Frost II	Überlebensrate	Überlebensneigung[$]
A	-13°C	-15,5°C	72,90%	77,3°
B	-13°C	-17,5°C	70,70%	79,4°
C	-13°C	-17,5°C	63,00%	71,3°

[$]siehe unten

Die *frostunabhängigen Merkmale* Wuchshöhe sowie Laubblattanzahl zeigten, dass das verwendete Pflanzenmaterial sehr homogen war: die Laubblattanzahl bei Testbeginn (Abb. 9) der Winterackerbohnen variiert kaum. Die Wuchshöhe der Winterackerbohnen weist etwas größere Unterschiede auf. Es gibt keine Korrelation dieser Merkmale zur Überlebensrate (Tab. 15). Obwohl es möglich ist Sommer- und Winterackerbohnen anhand des Wuchstypes voneinander zu unterscheiden, ist es nicht möglich Winterackerbohnenlinien allein mit Hilfe des Wuchstypes auf Kältetoleranz zu selektieren, da die Variation innerhalb der Winterackerbohnen zu gering ist. Es muss somit auf Merkmale der Frostkammerversuche oder andere Merkmale zurückgegriffen werden, um die kältetolerantesten Linien zu identifizieren.

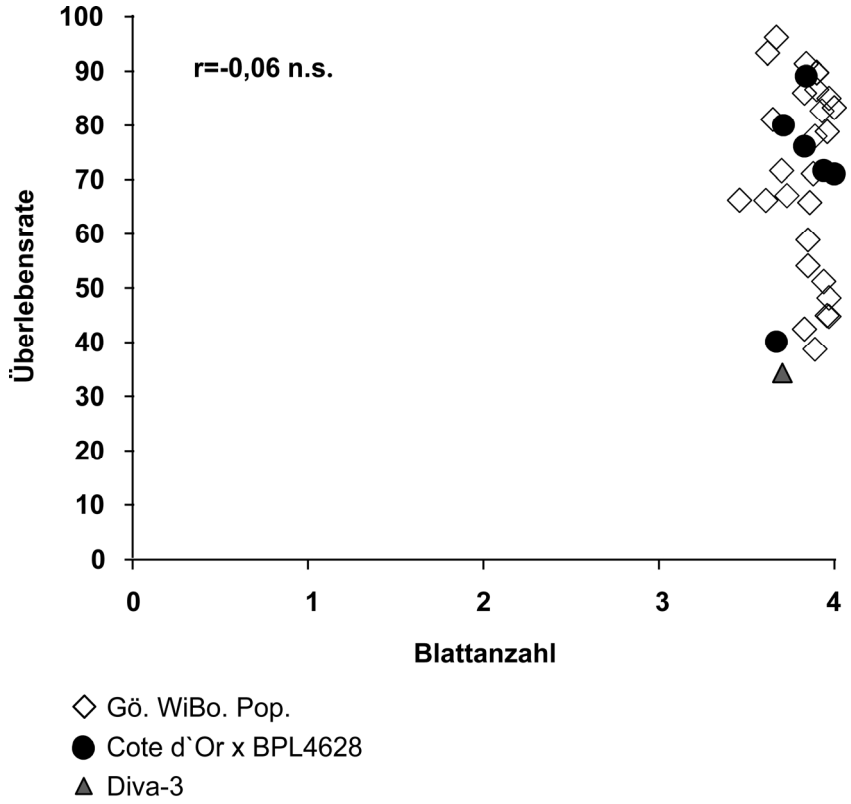

Abb. 10: Überlebensrate [%] (GD5% = 27,46) und bonitierte Anzahl der Laubblätter (GD5% = 0,37) von 36 Winterackerbohnenlinien der Frostkammerversuche vor Frost I.

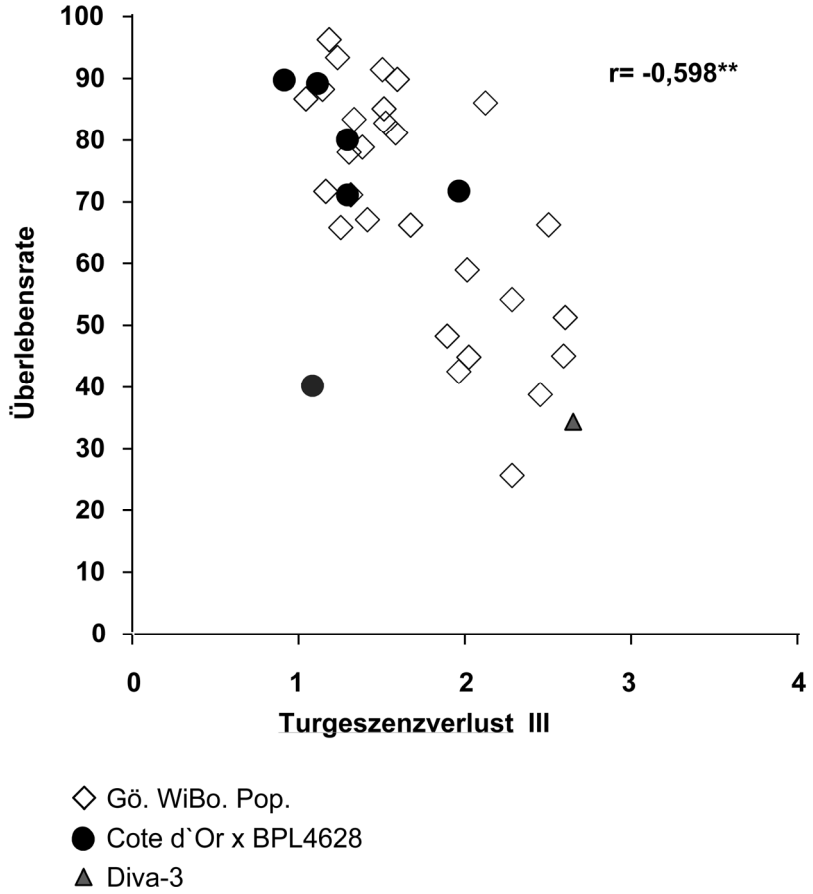

Abb. 11: Überlebensrate [%](GD5% = 27,46) und bonitierter Turgeszenzverlust (GD5% = 0,57) von 36 Winterackerbohnenlinien der Frostkammerversuche drei Tage nach Frost I. ** Signifikanzniveau 0,01

Tab. 15: Spearman Rangkorrelationen zwischen allen erhobenen Merkmalen der Frostkammerversuche

	Wuchs-höhe +	Laub-blätter +	Turgor I	Farbe I	Turgor II	Farbe II	Turgor III	Farbe III	FM-Ertrag +	Über-lebens-neigung	Über-lebens-rate
Blätter	-0,088										
Turgor I	0,178	0,091									
Farbe I	-0,060	-0,070	0,418*								
Turgor II	0,490**	0,188	0,595**	0,096							
Farbe II	0,084	0,066	-0,090	-0,068	0,037						
Turgor III	0,628**	0,067	0,160	-0,090	0,744**	0,242					
Farbe III	0,351*	0,082	-0,107	-0,152	0,266	0,561**	0,624**				
FM-Ertrag	0,433**	0,121	0,731**	0,181	0,596**	-0,240	0,276	0,002			
Ü.neigung	-0,356*	-0,010	-0,093	0,016	-0,442**	-0,414*	-0,646**	-0,637**	-0,161		
Ü.rate	-0,325	-0,060	-0,056	0,059	-0,394*	-0,446**	-0,598**	-0,622**	-0,138	0,971**	
W.-aufwuchs	-0,034	-0,020	-0,024	-0,015	-0,100	-0,443**	-0,287	-0,484**	0,159	0,763**	0,793**

*,** Signifikanzniveau 0,05 und 0,01
+ Frostunabhängige Merkmale

Die Merkmale Überlebenszeit und Überlebensrate, die Aussagen über die Frosttoleranz der Winterackerbohnen ermöglichen, weisen folgende Stärken und Schwächen auf (Tab. 16): Durch Erfassen des Tages, an welchem eine Einzelpflanze als tot erkannt wurde, kann jeder toten Pflanze eine Überlebenszeit (Tage ab der zweiten Frostnacht) zugewiesen werden. Pflanzen, die zu Versuchsende als lebend betrachtet werden haben keinen bekannten Todestag, also keine Überlebenszeit. Dies gilt sowohl für Pflanzen, die nach mehr als 60 Tagen noch an Frostfolgen sterben würden, als auch für diejenigen, die den Frost dauerhaft überleben würden. Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Pflanzengruppen (Linien) hinsichtlich ihres Überlebens ist nicht gegeben. Das Merkmal Überlebenszeit liefert in beiden Fällen keinen Wert. Dadurch liegt kein vollständiger Datensatz vor; dieses Merkmal ist mit der klassischen Methode der Varianzanalyse nicht verrechenbar. Der für eine Winterackerbohnenlinie typische Sterbeverlauf kann z.B. mit Hilfe einer Kaplan-Meier Kurve für Überlebenszeiten dargestellt werden. Unterschiedliche Sterbeverläufe in Abhängigkeit der jeweiligen Linie (Pflanzengruppe) sind beim Vergleichen der Kurven erkennbar (Abb. 12).

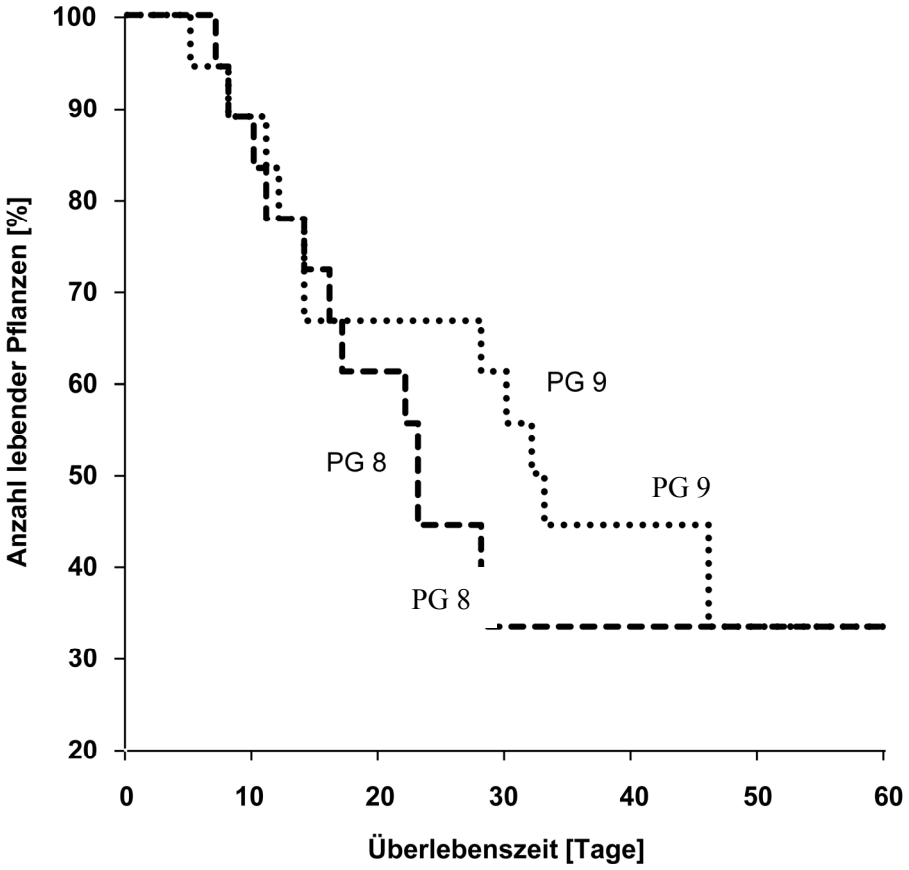

Abb. 13: Sterbeverlauf der beiden Winterackerbohnenlinien S5_252 (PG 8) und S5_29 (PG 9) nach Frostkammerbehandlung bis zum 60. Tage (Versuchsende) in Form von Überlebenskurven.

Das Merkmal *Überlebensrate* ergibt im Gegensatz dazu Werte für tote und lebende Pflanzen (tote Pflanzen = 0%; lebende Pflanzen = 100%). Damit hat jede Pflanzengruppe einen Wert für die Überlebensrate, der sich als Mittelwert der Einzelpflanzenwerte errechnet. Im Gegensatz zur Überlebenszeit ermöglicht die Überlebensrate keine Aussagen über mögliche Unterschiede der Sterbeverläufe der Gruppen (Tab. 16).

Tab. 16: Eigenschaften der während des Versuchs erhobenen Merkmale Überlebenszeit, Überlebensrate und Wiederaufwuchs und dem aus der Überlebenszeit transformierten Merkmal der Überlebensneigung.

	Einzelpflanzen		Pflanzengruppe	
Merkmal	**Wert für Gestorbene**	**Wert für Überlebende**	**Sterbeverlauf**	**Diffenenzierung der Überlebenden**
Todeszeitpunkt/ Überlebenszeit	+	-	+	-
Überlebendrate	+	+	-	-
Überlebensneigung	+	+	+	-
Wiederaufwuchs	+	+	-	+

Da die beiden primären Merkmale Überlebenszeit und Überlebensrate einzeln betrachtet nicht ausreichen, um Aussagen über überlebende Pflanzen und den für eine Linie typischen Sterbeverlauf zu erhalten, wurde das sekundäre Merkmal Überlebensneigung zur Versuchsauswertung verwendet. Die Überlebensneigung $\alpha_{xi} = \arctan (x_i/x_m)$ wird aus der Überlebenszeit x_i sowie der Mittleren Überlebenszeit x_m aller zu Versuchsende als gestorben bonitierten Pflanzen im rechtwinkligen, gleichschenkligen Dreieck errechnet (Abb. 14, A). Es gilt im Dreieck: $\alpha_{xm} = 45°$ = Höhe h (Abb. 13, B). Pflanzen, die zum Zeitpunkt des Versuchsendes (x_{60}) nicht als tot bonitiert wurden, erhalten den Wert $\alpha_{60} = 90°$(Abb. 13, C, D). Pflanzen, die nicht an Frostfolgen sterben und solche die erst nach mehr als 60 Tagen an Frostfolgen sterben würden, werden identisch behandelt. Es entsteht mittels dieser Transformation ein vollständiger Datensatz. Da die Überlebensneigung ein Winkel ist (Abb. 13), wird sie in Grad [°] angegeben.

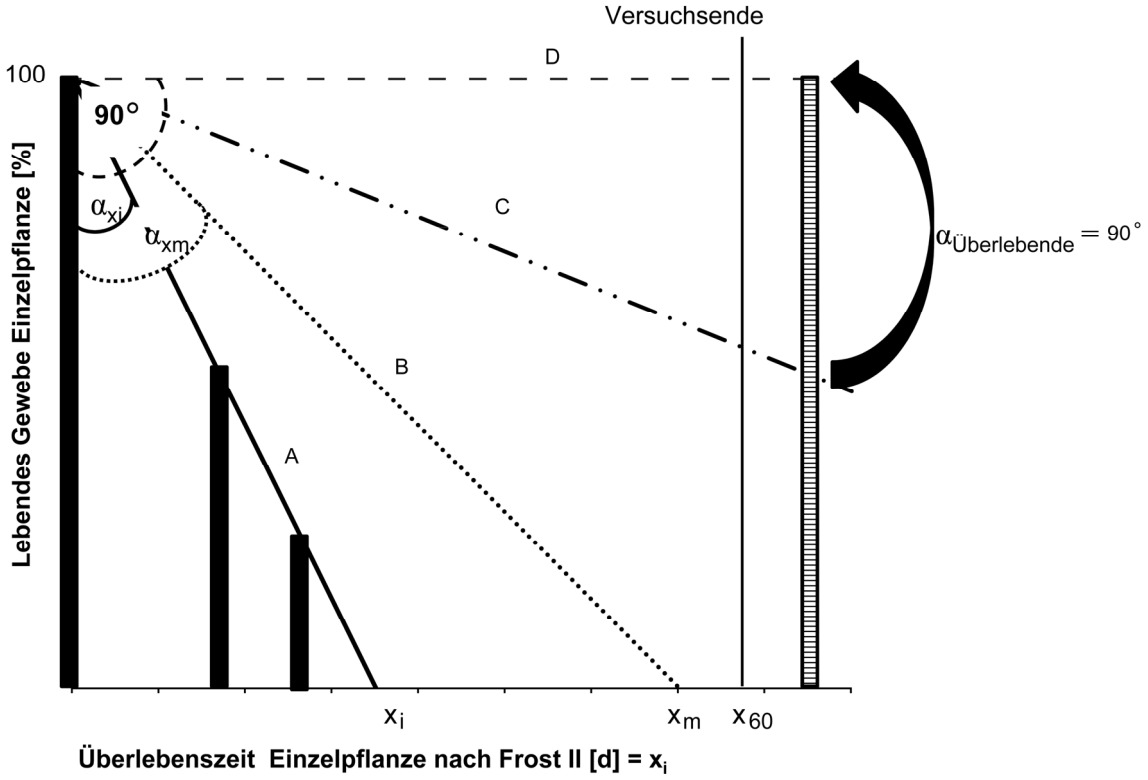

Abb. 14: Schematische Darstellung des Sterbeverlaufs von Einzelpflanzen und daraus abgeleiteter Überlebensneigung α_{xi}. A: Pflanze, die zum Zeitpunkt x_i als tot bonitiert wird. B: Pflanze, die am Mittleren Überlebenstag aller Toten Pflanzen als tot bonitiert wird. C: Pflanze, die erst nach Versuchsende an Folgen des Frostes sterben würde. D: Pflanze, die den Frost dauerhaft überlebt. Die Angabe „Lebendes Gewebe Einzelpflanze [%]) ist als Denkhilfe zu verstehen. Tatsächlich bonitiert wurde nur „lebt“ oder „tot“.

Der Vorteil des neuen Merkmales Überlebensneigung liegt darin, dass im Gegensatz zur Überlebenszeit ein vollständiger Datensatz zur statistischen Verrechnung vorliegt. Informationen über überlebende und tote Einzelpflanzen sowie den Sterbeverlauf sind im Merkmal Überlebensneigung ebenfalls enthalten. Die Korrelation der Überlebensneigung und der Überlebensrate ist mit r = 0,971 sehr hoch (Abb. 14). Dennoch sollte beachtet werden, dass sie von r = 1 verschieden ist, da sie eine Transformation der Überlebenszeit und nicht der Überlebensrate ist. Die Überlebensneigung aller als lebend bonitierten Pflanzen ist 90°. Das Merkmal Wiederaufwuchs erlaubt nun innerhalb dieser Gruppe eine Differenzierung. Es wird angenommen, dass Pflanzen, die die geringsten Frostschäden aufweisen den höchsten Wiederaufwuchs zeigen.

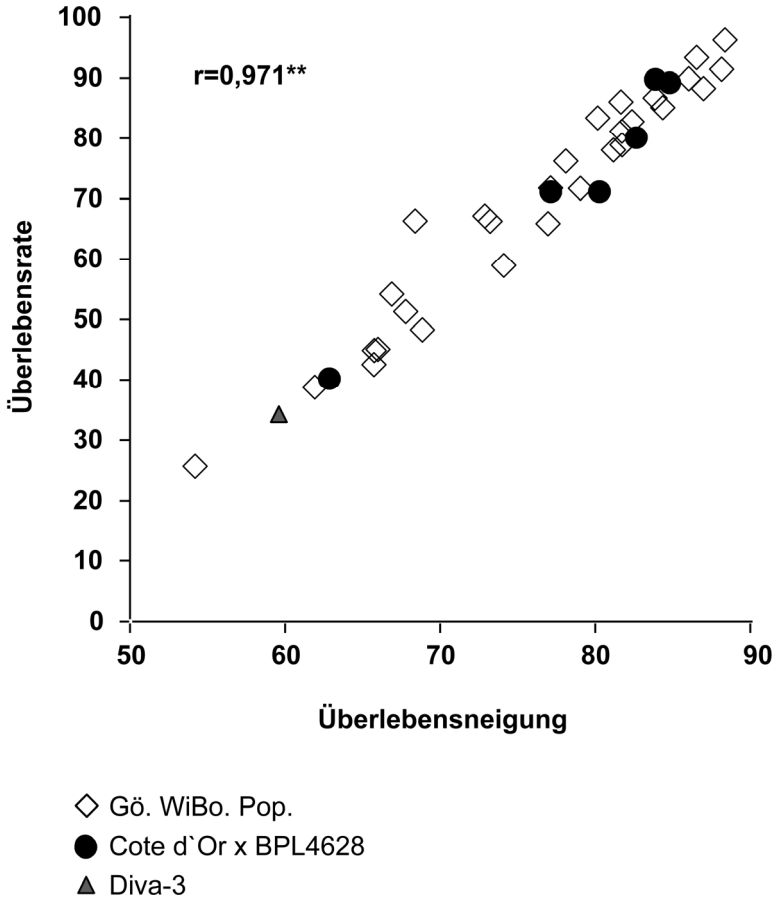

Abb. 15: Überlebensrate [%] (GD = 28,46) und Überlebensneigung [°] (GD = 14,57) der 36 Winterackerbohnenlinien der Frostkammerversuche

Nur bei fünf der 36 untersuchten Winterackerbohnenlinien starben bis zum sechzigsten Tag mehr als die Hälfte der Pflanzen. Auch die für das milde französische Klima gezüchtete Kontrolllinie Diva-3 befindet sich darunter. Das Genmaterial der Göttinger Winterackerbohnen-Population scheint hinsichtlich Kältetoleranz recht viel versprechend zu sein, da Nächte bis -17,5°C von den meisten Linien gut überlebt wurden. Eine Differenzierung hinsichtlich der Überlebensrate und der Überlebensneigung ist deutlich erkennbar und die Prüfglieder unterscheiden sich signifikant voneinander (Tab. 17). Eine Gruppierung nach Materialgruppe (Tab. 12) kann nicht beobachtet werden. Die Durchgänge der Frostkammer unterscheiden sich ebenfalls signifikant voneinander. Dies war zu erwarten, da die Temperaturen der Froststufe II nicht identisch war (Tab. 14). Ein weiterer Grund für Unterschiede zwischen Durchgängen ist, dass sich die für die einzelnen Durchgänge angezogenen Winterackerbohnen - bedingt durch unvermeidliche Licht- und Klimaunterschiede bei ihrer Aufzucht - sich hinsichtlich ihres Wuchses etwas voneinander unterschieden. Dies beeinflusst vermutlich auch die Heritabilität, die trotz genormter Frostkammerversuche nur den Wert h^2 = 0,674 erreicht. Der Frostkammerindex ($Index_{Frostkammer}$ = 0,5611 x Überlebensneigung + 1,1436 x Wiederaufwuchs) führte zu einer Heritabilität von h^2 = 0,711 bei einem Mittelwert des Materials von 46,92 und einer Grenzdifferenz (5%) von 9,42.

Tab. 17: Varianzanalyse der Überlebensneigung α_{xi} über die drei Durchgänge der Frostkammer

Varianzursache	FG	MQ	Varianz-komponente	F	GD5%
Durchgänge	2	3888,4	-	10,36 **	3,97
Wiederholungen$ in D.	15	375,4	-	1,23	8,08
Prüfglieder	35	1474,2	55,2	3,07 **	14,57
PD	70	480,6	29,39	1,58 **	19,78
PWD	525	304,2	304,21		

Heritabilität h^2= 0,674
** Signifikanzniveau 0,01
$ sechs Wiederholungen pro Durchgang entsprechend der beiden Dreisatzsatzgitter pro Durchgang

Selektion: Da das Befallsrisiko von Winterformen im Vergleich zu Sommerformen erhöht ist (POETSCH, 2006), spielen pilzliche Schaderreger wie Botrytis und Ascochyta bei Winterackerbohnen eine noch bedeutendere Rolle als bei Sommerackerbohnen. Deshalb wurde für die Selektion der 36 in der Frostkammer untersuchten Winterackerbohnenlinien neben dem Frostkammerindex (bestehend aus Überlebensneigung und Wiederaufwuchs, s.o.) noch zusätzlich die gemeinsame Feldbonitur für die Krankheiten Ascochyta und Botrytis hinzugezogen (Abb. 15). Die Krankheitsbonituren der Linien aus den Feldversuchen schwanken zwischen 2,8 und 5,6 Punkten auf einer Boniturskala von null bis neun. Neun ist die höchste Ausprägungsstufe der Krankheiten. Es gab keine Gruppierung der Linien. Die beiden krankheitsanfälligsten Prüfglieder stammen aus der Göttingen Winterackerbohnenpopulation, gefolgt von zwei Linien aus der Kreuzung von Côte d`Or/1 x BPL4628 (Abb. 15). Die Grenzdifferenz über alle im Feld angebauten Prüfglieder beträgt 1,02, der Mittelwert 3,36. Auch der Frostkammerindex zeigt eine signifikante Differenzierung zwischen den Linien. Die frosttolerantesten Genotypen stammen aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (Prüfglieder 17, 35, 22, 15; Tab. 12). Die kälteanfälligste Linie ist ebenfalls aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (Prüfglied 13) gefolgt von der Kontrolle Diva-3 und Prüfglied 4 aus der Kreuzung von Côte d`Or/1 x BPL4628.

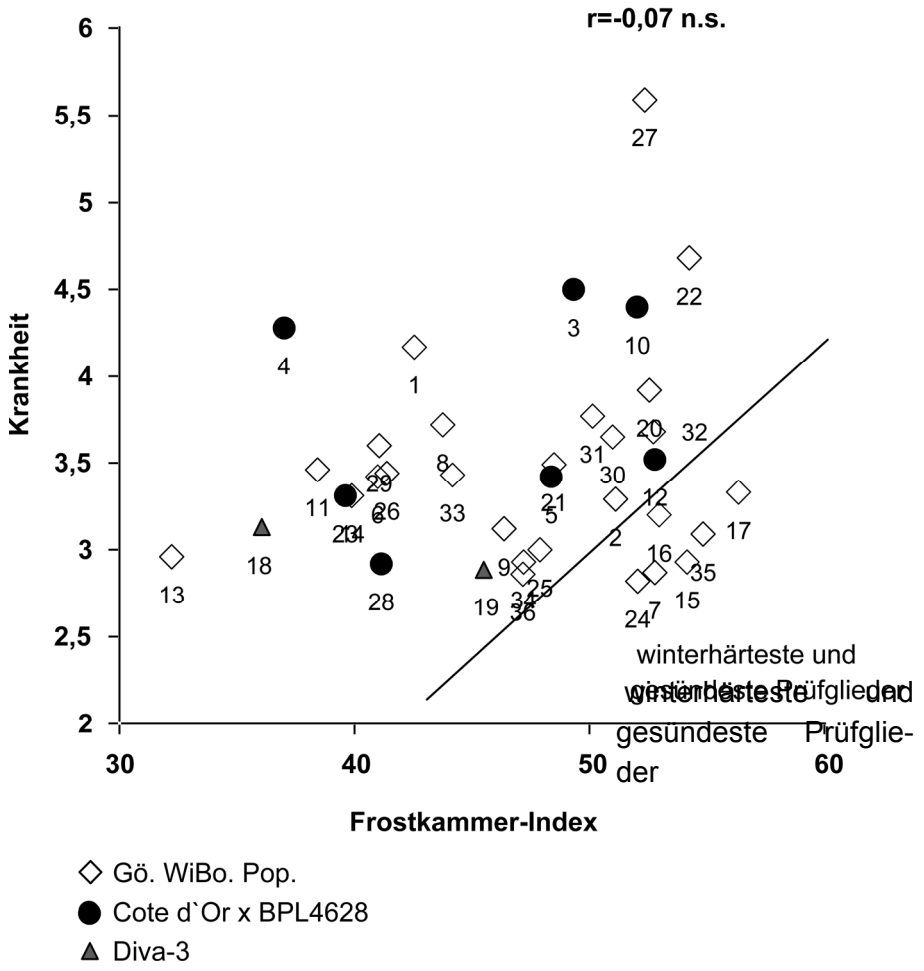

Abb. 16: Selektion der winterhärtesten und am wenigsten krankheitsanfälligen Winterackerbohnengenotypen aus Frostkammer- und Feldversuchen (2006/07-2008/09) mit Hilfe des Frostkammerindexes (GD = 9,42) und Krankheitsbonitur (GD = 1,02). Prüfgliednummern siehe Tab. 12.

Unter den untersuchten Linien aus der Kreuzung der „exotischen“ Winterackerbohnen (Côte d`Or/1 x BPL4628) konnte keine auffallend gute gefunden werden, die einen sehr guten Frostkammerindex mit einer niedrigen Krankheitsbonitur vereint hätte. Die Linien, die diese Anforderung am besten erfüllen stammen aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (Abb. 15).

Unser Dank geht an die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. in Gülzow bzw. an das BMELV für die Finanzierung des Projektes, zu dem diese Versuche gehören. Ebenso möchten wir gegenüber dem Züchterhaus NPZ Lembke für die überaus kollegiale und erfolgreiche Zusammenarbeit und Unterstützung unseren Dank ausdrücken.

Zusammenfassung

Frosttoleranz kann als ein Bestandteil der Winterhärte in Feldversuchen in Ermangelung kalter Winter nur unzureichend untersucht werden. Deshalb werden in Göttingen seit 2003 Frostversuche mit Winterackerbohnen in einer Frostkammer durchgeführt. Die bisher erfolgreich etablierte Methode (ARBAOUI et al. 2008) wirde technisch optimiert (z.B. Verbesserung der vertikalen Kammer-Durchlüftung, Analyse der horizontalen Temperaturverteilung, Änderungen des Temperaturprofils der Frosttests) und bisherige Merkmale der Frosttoleranz wurden um neue ergänzt. Aus 36 Winterackerbohnenlinien werden durch die optimierten Frostkammermethode und dreijährige Feldversuche frost- und krankheitsresistente Winterackerbohnenlinien selektiert.

Literaturverzeichnis

ARBAOUI, M., BALKO, C. and LINK, W., 2008: Study of faba bean (*Vicia faba* L.) winter hardiness and development of screening methods. Field Crops Research 106, 60-67.

BAKER. R.J. (1986) Selection Indices in Plant Breeding. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.

DUC, G. and PETITJEAN, F., 1995: Study on the inheritance of freezing tolerance in *Vicia Faba* L.2nd Europ. Conf. on Grain Legumes, AEP, Copenhagen, 130-131.

GHAOUTI. L. (2007) Comparison of pure line cultivars with synthetic cultivars in local breeding of faba bean (*Vicia faba* L.) for organic farming. PhD Thesis. Georg-August-Universität of Göttingen, Department of Crop Sciences.

LINK, W. (2009) Journal für Kulturpflanzen, 61 (9), S. 341-347, ISSN 0027-7479, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart.

LINK, W. und ARBOUI, M., 2005: NEUES von der Göttingen Winter-Ackerbohne. Bericht über die 56. Tagung 2005 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs HBLFA Raumberg – Gumpenstein. 22.- 24. November 2005.

OLSZEWSKI, A. und HERZOG, H., 1994: Frost-Resistenz-Verbreitung bei *Vicia Faba* L. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 7, 411-413.

POETSCH, J., 2006: Pflanzenbauliche Untersuchungen zum ökologischen Anbau von Körnerleguminosen an sommertrockenen Standorten Südwestdeutschlands, Dissertation, Universität Hohenheim, Fakultät für Agrarwissenschaften.

SASS, O., 2009: Journal für Kulturpflanzen, 61 (9), S. 306-308, ISSN 0027-7479, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart.

SPECHT, M., 2009: Journal für Kulturpflanzen, 61 (9), S. 302-305, ISSN 0027-7479, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

UTZ, H.F., 1994: PLABCOV (Version 1B(L)); A computer program for statistical covariance analysis of plant breeding experiments. Institute of Plant Breeding, Seed Science, and Population Genetics, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany

UTZ, H.F., 2007: PLABSTAT (Version 2N); A computer program for the computation of variances and covariances. Institute of Plant Breeding, Seed Science, and Population Genetics, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany

UTZ, H.F., 2004: PLABSTAT. Ein Computerprogramm zur statistischen Analyse von pflanzenzüchterischen Experimenten. Version 3. Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik, Universität Hohenheim.

4 Epilog

Die Erzeugung von Energie mit Hilfe von Biogas wird nicht nur von der deutschen Bundesregierung als klima- und ressourcenschonend betrachtet, da sie im Gegensatz zur Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas aus pflanzlicher Biomasse kohlendioxidneutral erfolgen kann. Das bei der Verbrennung von Biogas entstehende Kohlendioxid (CO_2) bewegt sich in einem Kreislauf, da es von den nachwachsenden Pflanzen im Verlaufe der Photosynthese wieder assimiliert wird. Uneingeschränkt stimmt HUB (2007) dieser Aussage jedoch nur zu, solange das Augenmerk ausschließlich auf die Verbrennung im Motor gerichtet wird, da nur dort die Menge CO_2 freigesetzt wird, die vorübergehend über den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen der Atmosphäre entzogen wurde. Bei Betrachtung der gesamten Biogasverfahrenskette fällt sein Urteil kritischer aus, da die günstige CO_2-Bilanz durch Aufwendungen bei der Produktion der verwendeten Biomasse, bei deren Verarbeitung bis zur energetischen Umwandlung teilweise verschlechtert wird. So ist z.B. die energiezehrende Produktion der mineralischen Düngemittel, deren Einsatz dann Ernten mit hohen Biomasseerträgen ermöglicht, oder auch der Transport der Biomasse zur Biogasanlage und der Gärreste zurück auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen nötig; dieses alles verbraucht (üblicherweise fossile) Energie. Durch die Einbeziehung solcher mit der Biogasproduktion zusammenhängender Schritte und Verfahren fällt die Energie- und CO_2-Bilanz des Biogasprozesses weniger positiv aus als oftmals dargestellt wird (HUB 2007).

Neben CO_2 ist auch Methan, als Hauptbestandteil des Biogases, wie viele andere Gase klimarelevant und hat ca. das 23-fache GWP (global warming potential, Treibhauspotential) des CO_2 (BAYLFU 2007). Methanemissionen müssen deshalb in Biogasanlagen auf jeden Fall vermieden werden, da der Klimanutzen der Biogasherstellung sonst deutlich geschmälert oder die Einsparung sogar aufgehoben werden können (HUB 2007, WILLE 2010).

Diskussionsbedarf besteht sicher auch noch in Zukunft über die Nutzung von gentechnisch veränderten Organismen für die Produktion von Biomasse und ihre Umwandlung in Biogas. Mit diesem Thema und auch mit der Frage nach der Nutzung von Pflanzen für die Biogasproduktion, die auch zur menschlichen Ernährung verwendet werden können, sollte verantwortungsvoll umgegangen werden. Pflanzenbestände, die für die Biogasproduktion verwendet werden, stehen in Flächenkonkurrenz mit Beständen, die der Nahrungs- und Futtermittelproduktion gewidmet werden. Diese Flächenkonkurrenz kann zu einer Verteuerung der Nahrungsmittel führen, was vor allem in den ärmsten Regionen der Welt Hungerkatastrophen nach sich zieht. Angesichts der steigenden Weltbevölkerung wird sich dieser Konflikt vermutlich weiter zuspitzen. Unter anderem um dies zu umgehen, sollten vor allem auch Reststoffe aus der Nahrungsmittelproduktion sowie Restmaterialien aus der Landschaftspflege vermehrt zur Biogaserzeugung dienen. Hierdurch könnte die Nahrungsmittelproduktion ergänzt anstatt verdrängt werden.

Zunehmend werden Futterpflanzen wie Mais in den Anlagen eingesetzt, während die Nutzung von Gülle und anderen Grün-Reststoffen stagniert. Grund hierfür ist u.a. der finanziellen Anreiz im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), nach dem Biogasproduzenten höhere Stromeinspeisevergütung erhalten, wenn sie nachwachsende Rohstoffe in der Biogasanlage einsetzen (WILLE 2010). Auch durch die steigende Zahl der Biogasanlagen ist die Maisanbaufläche in Deutschland angestiegen (DKM 2009). Der Maisanbau - vor allem in Monokultur - wirkt sich nicht nur auf das Landschaftsbild, sondern auch auf die Biodiversität der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus. Er kann auch negative Folgen für die Umwelt haben. Neben einem hohen Einsatz an Düngemitteln und Pestiziden kann die Bodenerosion und auch die Grundwasserbelastung durch Maisanbau verstärkt werden (GRASS 2003). Unter anderem aus diesen Gründen gilt der Maisanbau als intensive Landnutzungsform und wird oft mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt assoziiert (STEMANN & LÜTKE ENTRUP 1990).

Auch wenn der Anbau von Mais nicht immer positiv bewertet werden kann, ersetzt Biogas, das aus Mais als Biogassubstrat gewonnen wurde, klimaschädliche fossile Brennstoffe. Durch diesen wichtigen Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz ist Mais als Energiepflanze durchaus positiv zu bewerten. Bei der Verwendung pflanzlicher Rohstoffe für die Biogaserzeugung fallen Gärreste an. Diese werden, wenn auch meist unter dem Aufwand von fossiler Energie, auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht und stehen als hochwertiges Düngemittel zur Verfügung. Die Erzeugung von Biogas ermöglicht dadurch einen relativ geschlossenen Nährstoffkreislauf und kann ihren Düngemittelbedarf teilweise durch die Ausbringung der Gärreste verringern. Da die Herstellung von mineralischen Stickstoffdüngemitteln, die auf dem Haber-Bosch-Verfahren basiert, sehr energieintensiv ist (LEWANDOWSKI ET AL. 1995), führt die Reduzierung des Stickstoffdüngeraufwandes zu einer verringerten Energieintensität des Maisanbaus.

Ein weiterer Vorteil der Erzeugung von Bioenergie in Form von Biogas ist, dass sich landwirtschaftlichen Betrieben die Möglichkeit eröffnet einen neuen Betriebszweig zu führen. Das Betreiben von Biogasanlagen bietet der Landwirtschaft Einkommensalternativen und stärkt den ländlichen Raum.

In der Wirtschaftkrise 2009 haben sich die erneuerbaren Energien als ein stabil funktionierender Wirtschaftszweig erwiesen. Bemerkenswert ist hierbei außerdem, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch sogar auf 10,1% anstieg (BÖHME & MARK 2010).

Auch in ökologisch bewirtschafteten Betrieben hat Biogas eine zunehmende Bedeutung erfahren, in ähnlicher Weise wie in konventionellen Landwirtschaftsbetrieben (ANSPACH & MÖLLER 2009). Viele ökologisch wirtschaftende Betriebe sehen in der Erzeugung von Biogas ein sich durchaus lohendes Betätigungsfeld, das sich gut in eine bestehende Betriebsorganisation einfügen lässt (ANSPACH & MÖLLER 2007). Neben den ökologischen Vorteilen der Erzeugung nicht-fossiler Energie führt die Biogaserzeugung zu wesentlichen Vorteilen für den ökologischen Landbau. Da im ökologischen

Landbau der Einsatz von Düngemittel limitiert ist, spielt die Verwendung von Biogasgärresten eine noch bedeutendere Rolle als im konventionellen Landbau (MÖLLER 2003). Zwischenfrüchte, die sonst zur Gründüngung verwendet werden, können beim Betreiben einer Biogasanlage ebenfalls mit vergoren und im Anschluss als stickstoffhaltiges Substrat umverteilt werden. Allein diese Vorzüge der Vergärung von Biomasse machen deutlich, dass die Biogaserzeugung vor allem auch im ökologischen Landbau ein interessanter Betriebszweig sein kann (BÖHME & MARK 2010).

Der Anbau von Mais war im ökologischen Landbau lange Zeit wenig verbreitet. Dies hängt neben den hohen Nährstoffansprüchen des Maises mit Anbauproblemen und Umweltgefährdungen zusammen, die bei herkömmlichen Anbausystemen mit Mais, der ohne Zwischenfrucht angebaut wird, häufig auftreten. Bodenerosion, aufwändige Unkrautregulierung, Probleme mit Vogelfraß, Nährstoffverluste und vor allem die grundwassergefährdende Stickstoffauswaschungsgefahr über Winter, im Frühjahr und nach der Maisernte sind nicht zu vernachlässigende Aspekte und Probleme, die mit dem Anbau von Mais einhergehen können (BECKMANN & KOLBE 2000, GRASS & SCHEFFER 2003). Sie können vor allem im ökologischen Landbau dazu führen, dass Betriebe ganz auf den Anbau von Mais verzichten.

Kulturarten, die sich für die Biogasproduktion eignen, wurden bislang vorwiegend für die menschliche Ernährung und die Tierernährung gezüchtet. Erst in den letzten Jahren wurden eigens Zuchtprogramme für Biogasfrüchte erstellt. Um eine optimale Methanproduktion zu erreichen, müssen geeignete Kulturpflanzenarten und Genotypen erst gefunden und im Anschluss züchterisch bearbeitet werden, damit ein hoher Methanertrag pro Hektar möglich ist. Da bisher keine andere Kulturpflanze so hohe Flächenerträge für die Produktion von Biogas ermöglicht, stellt Mais trotz der aufgezählten Nachteile auch im ökologischen Landbau ein wichtiges Substrat dar (GÖDEKE ET AL. 2007). Neben den negativen Effekten, die Maisanbau verursachen kann, eignet sich Mais jedoch durch seine effiziente Stickstoffnutzung gut für den ökologischen Landbau. Durch den Verzicht auf chemisch-synthetische Pflanzenschutz- und Düngemittel ist im ökologischen Landbau die Wahl anderer Maissorten als im konventionellen Landbau sinnvoll und Anbausysteme, die dem Mais genügend Stickstoff zur Verfügung stellen und dabei mögliche Umweltbelastungen minimieren, sind unumgänglich.

Der Maisanbau in Zweikulturnutzungssystemen bietet - nicht nur dem ökologischen Landbau - ein Konzept, das die geforderte hohe Flächenproduktivität mit geringer Umweltbelastung verbindet. Durch eine vor dem Mais als Zweitfrucht angebaute Winterzwischenfrucht, wie z.B. die Winterackerbohne und der Winterroggen im hier vorgestellten Projekt, und die Duldung von Wildpflanzen wird nicht nur die Artenvielfalt gesteigert. Nährstoffeinträge in das Grundwasser und Bodenerosion können vermieden werden. Zweikulturnutzungssysteme sind in der Lage im Rahmen einer nachhaltigen Landwirtschaft Kulturpflanzenerträge zu steigern und die aus dem Anbau resultierenden Umweltbelastungen zu senken (SCHEFFER & KARPENSTEIN MACHAN 2000).

Für die Bereitstellung von Stickstoff sind im ökologischen Landbau Leguminosen von hoher Bedeutung. Im System Scheffer-Grass (GRASS & SCHEFFER 2003B) werden deshalb Wintererbsen als Zwischenfrucht im Zweikulturnutzungssystem verwendet. Da Wintererbsen jedoch nicht für alle agro-ökologischen Bedingungen die erste Wahl sind und Probleme bei der Ernte nicht auszuschließen sind, wurde in den beiden Göttinger Arbeitsgruppen Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung über Winterackerbohnen als alternative Winterzwischenfrucht für den Biogasanbau nachgedacht. In diesen Überlegungen sollte neben dem Anspruch auf hohe Erträge, technische Erntbar- und Silierbarkeit auch die Chance wahrgenommen werden, traditionelle, gegenwärtig wenig angebaute Kulturpflanzen zu fördern, Know-How des Anbaues und genetische Ressourcen zu schützen und zu erhalten und die Artenvielfalt zu steigern. Diese Gesichtspunkte und Anforderungen wurden bei der Auswahl der Winterackerbohne als potentielle Zwischenfrucht für die Biogaserzeugung im ökologischen Landbau bedacht und untersucht. Sie konnten zum größten Teil mit dem Anbau der hier untersuchten Zweikulturnutzungssysteme erreicht werden.

Im Mittel aller untersuchten Varianten mit Winterackerbohnen, Wintererbsen und Winterroggen in Reinsaaten und Gemengen vor Mais konnte ein Gesamtflächenertrag (Winterzwischenfrucht + Mais) von 1714,1 g TM/m² geerntet werden. Da der Gesamtmethanflächenertrag des Zweikulturnutzungssytems fast ausschließlich vom Trockenmasseertrag der Winterzwischenfrüchte und dem Trockenmasseertrag des Maises abhingen, konnten mit dem untersuchten Zweikulturnutzungssystem entsprechend befriedigend hohe Methanhektarertäge realisiert werden. Um einen möglichst hohen Gesamttrockenmasseertrag zu erreichen, sollten die Winterzwischenfrüchte wenn möglich bereits im September gesät werden, da hierdurch neben einer Erhöhung des Trockenmasseertrags der Gehalt an auswaschungsgefährdetem, mineralisiertem Stickstoff im Boden vor dem Winter in unseren Versuchen etwas geringer war als nach später Saat im Oktober. Der Erntetermin der Winterzwischenfrüchte wirkte sich durch die Konkurrenz zwischen Winterzwischenfrüchten und Mais um die Vegetationszeit nicht signifikant auf den Gesamttrockenmasseertrag aus. Dennoch sollte der Saattermin des Maises spätestens Mitte Mai liegen, um einen für das Silieren ausreichenden Trockensubstanzgehalt des Maises zu gewährleisten. Obwohl das Zweikulturnutzungssystem mit Winterackerbohnenreinsaat und einer Saatstärke von 70 Korn/m² den höchsten Methanflächenertrag erzielte, ist das Gemenge aus Winterackerbohnen und Winterroggen als Zwischenfrucht vor Mais eher empfehlenswert, da bei dieser Winterzwischenfruchtvariante der N_{min}-Gehalt im Boden zu den auswaschungsgefährdeten Zeiten geringer war als in den Versuchsvarianten mit reinen Leguminosen. Neben der Erhöhung der Biodiversität bietet das Gemenge aus Winterackerbohnen und Winterroggen im Vergleich zur Reinsaat der Winterackerbohne höhere Ertragsstabilität, da z. B. im Falle der Auswinterung der Winterackerbohne jedenfalls der kältetolerantere Roggen überlebt.

Trotz vieler positiver Eigenschaften der einheimischen Körnerleguminosen ist der Anbauumfang in Deutschland zurückgegangen (RÜHL ET AL. 2009, BÖHM 2009B). Die Argumente, wie Erhöhung der Biodiversität, Stickstoffdüngemittelreduzierung durch

Stickstofffixierung, Humusaufbau, und Förderung der Bodenfruchtbarkeit oder die Nährstoffmobilsierung aus tiefen Bodenschichten, die für eine Ausdehnung der Körnerleguminosenanbaufläche sprechen, reichen nicht aus, um Landwirte zu häufigerem Anbau von Körnerleguminosen zu motivieren (BÖHM 2009B). Dies liegt daran, dass den vielen Vorteilen beim Anbau von Körnerleguminosen in der Fruchtfolge eine Reihe begrenzender Faktoren gegenüberstehen. Die sicherlich wichtigsten Argumente gegen den Anbau von Körnerleguminosen sind das unzureichende Ertragspotential und die Sensitivität der Körnerleguminosen gegenüber klimatischen Faktoren, die sich negativ auf die Ertragsstabilität auswirken (STEMANN & LÜTKE ENTRUP 2001). An Standorten mit Sommertrockenheit kann es außerdem durch den hohen Wasserbedarf der Körnerleguminosen wie Ackerbohnen zu Anbauproblemen kommen (POETSCH 2007). Die hohe Selbstunverträglichkeit von Leguminosen, hohe Saatgutkosten, das im Vergleich zu Getreide schlechtere Unkrautunterdrückungsvermögen und die begrenzte Anzahl zugelassener Pflanzenschutzmittel wirken sich ebenfalls limitierend auf den Anbau von Körnerleguminosen aus (BÖHM 2009B). So betrug im Jahr 2009 der Anteil der Körnerleguminosen selbst im ökologischen Landbau nur 6,8% der Anbaufläche. Dies verdeutlicht, dass Anbaustrategien entwickelt werden müssen, die eine stärkere Integration von Körnerleguminosen in Fruchtfolgen ermöglichen (BÖHM 2009B).

Körnerleguminosen, die bisher vor allem zur Erzeugung proteinreichen Futters angebaut wurden, könnten durch Einbeziehung in ein Zweikulturnutzungssystem wieder mehr an Bedeutung gewinnen. Die Erfahrungen und das Knowhow der Landwirte bei Anbau der Körnerleguminosen könnten bewahrt und entwickelt werden, was höhere Ertragssicherheit zur Folge hätte (SASS 2009B).

Mit Körnerleguminosen als Zwischenfrucht vor Mais sollen hohe Biomasse- und Methanerträge erzielt werden, dem Mais Stickstoff zur Verfügung gestellt und Nitratauswaschung weitestgehend verhindert werden. Diese Ziele können, wie die Ergebnisse dieser Arbeit veranschaulichen, mit Winterackerbohnen in Reinsaat, noch besser aber mit Gemengen aus Winterackerbohnen und Winterroggen als Winterzwischenfrucht vor Mais erreicht werden.

Die Ackerbohne ist eine der ältesten Leguminosen, die zur Ernährung eingesetzt werden und zählt in Deutschland zu den „kleinen Feldfrüchten“, die selten angebaut werden. Versuche in Göttingen von 1978-1983 mit der Winterackerbohnensorte Webo zeigten, dass die Überwinterungsfähigkeit nicht ausreichend war, um Winterackerbohnen für den Anbau in Deutschland zu empfehlen (HAUSER & BÖHM 1984). Gestützt auf züchterische Arbeiten z.B. von HERZOG (1988) und BOND ET AL. (1994) arbeitete D. Stelling in Göttingen seit 1988 weiter züchterisch mit Winterackerbohnen. Neben den klassischen Zuchtzielen für Ackerbohnen ist ein Schwerpunkt der heute unter der Leitung von W. Link arbeitenden Göttinger Gruppe in Zusammenarbeit mit der NPZ Lembke KG, Hohenlieth, auch die Bearbeitung der Winterhärte von Winterackerbohnen. Nicht nur die im Rahmen dieses von der Fachagentur Nachwachende Rohstoffe (FNR) unterstützten Projektes durchgeführten Versuche, sondern auch Versuche von RODE (unveröffentlichte Ergebnisse RODE & LINK, 2009) zeigten, dass Göttinger Win-

terackerbohnen bereits Temperaturen von -17.5°C unbeschadet überleben können. Rode und Link (2009) bestätigten die in den Frostkammerversuchen gefundene Differenzierung der Winterackerbohnen hinsichtlich der Frosttoleranz. Durch diese genetische Variation der Frostresistenz der Göttinger Winterackerbohnenpopulation werden weitere Zuchtfortschritte möglich sein, die den zukünftigen Anbau von Winterackerbohnen auch in Deutschland ermöglichen. Durch gesteigerte Winterhärte auf der einen Seite und im Zuge des prognostizierten Klimawandels und der damit verbundenen Klimaerwärmung auf der anderen Seite können Winterackerbohnen zukünftig genügend Winterhärte aufweisen, um auch in Deutschland anbauwürdig zu sein.

Zuchtziele bisheriger Ackerbohnenzüchtung sind neben dem hohen Kornertrag vor allem auch Standfestigkeit, Frühreife, Resistenzen gegen Krankheiten wie Ascochyta, Botrytis und Rost. Auch auf die Qualität und Inhaltstoffe der Ackerbohnen wie Tannine, Vicin oder Convicin muss geachtet werden. Bei Winterackerbohnen werden diese vielfältigen Selektionsmerkmale noch um die Winterhärte ergänzt. Da Winterackerbohnen als Winterzwischenfrucht für die Biogasproduktion spätestens zur Blüte als Grünmasse geerntet werden, brauchen viele der aufgezählten Merkmale der Ackerbohnen zur weiteren Züchtung nicht berücksichtigt zu werden. Kornertrag und -qualität sowie einige Krankheiten, die erst in späteren Stadien auftreten oder späte Lagerneigung der Bohnen brauchen bei der Selektion auf biogasgeeignete Sorten nicht beachtet zu werden. Durch den Wegfall dieser Zuchtziele könnte sich die Selektion auf wenige Merkmale beschränken, was bei einer speziellen Züchtung auf Biogaseignung ungewöhnlich schnelle Zuchtfortschritte erwarten ließe.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Frostkammer- und Feldversuche dienten dazu, die winterhärtesten Genotypen zu identifizieren. So betrug die Überlebensrate aller 36 untersuchten Winterackerbohnenlinien aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation nach Frostnächten von -17,5 °C ca. 67%. Nur bei fünf der untersuchten Linien starben mehr als die Hälfte der Pflanzen. Das Genmaterial der Göttinger Winterackerbohnenpopulation ist recht vielversprechend hinsichtlich der Kältetoleranz. Durch die Optimierung der Methodik der Frostkammerversuche können anhand neuer Boniturmerkmale und veränderter Temperaturprofile zukünftig in kürzerer Zeit noch mehr Winterackerbohnen effektiv auf ihre Frosttoleranz untersucht und selektiert werden.

Anhand weiterer Daten aus Feldversuchen sollen zukünftig unter den bereits untersuchten Genotypen diejenigen herausgefunden werden, die zum optimalen Erntezeitpunkt, spätestens Mitte Mai, maximale Biomasseerträge erreichen. Des Weiteren soll dabei untersucht werden, wie bedeutend die genetische Variation der Trockenmasseerträge und der Siliereignung der entsprechenden Genotypen ist. Diese für die Biogasproduktion entscheidenden Merkmale werden mit den bisher für die Züchtung wichtigen Merkmalen wie z.B. Kornertrag, Krankheitsresistenzen oder Lagerneigung verrechnet. Anhand der Größe und Richtung der Merkmalskorrelationen soll herausgefunden werden, ob die Züchtung der Winterackerbohnen für Biomasse parallel in bereits bestehenden Zuchtprogrammen verlaufen kann oder ob die Zuchtziele der Biomasseproduktion den klassischen Zuchtzielen widersprechen. In den hier vorgestellten Ver-

suchen wurden aus der genetisch breiten Göttinger Winterackerbohnenpopulation nur 36 Genotypen ausgewählt; die genetische Variation der Göttingen Winterackerbohnenpopulation wurde somit nicht voll ausgeschöpft. In weiteren Frostkammer- und Feldversuchen wurde und wird weiteres Göttinger Material auch in Zusammenarbeit mit der NPZ-Lembke KG, Hohenlieth, vor allem hinsichtlich der Überwinterungseigenschaften phänotypisiert. Wünschenswert wäre nicht nur eine zusätzliche Genotypisierung des Göttinger Winterackerbohnenmaterials, sondern eine Ausweitung auf das weltweite Genmaterial der Winterackerbohnen, um die maximal mögliche genetische Variation züchterisch nutzen zu können.

Der Forschungsbedarf für Körnerleguminosen ist nach wie vor groß und besteht vor allem in den Bereichen Züchtung und der Fruchtfolgeforschung (BÖHM 2009B). Bedauerlicherweise sind die züchterischen Aktivitäten unter anderem aus ökonomischen Gründen zurzeit nicht in der Lage, einen konkurrenzfähigen Zuchtfortschritt für diese Arten sicherzustellen. Hierdurch wird die Leistungsschere zwischen den kleinen und großen Arten weiter auseinandergehen (SASS 2009B). Um den züchterischen Fortschritt und damit den Anbauumfang steigern zu können, sind finanzielle Anreize notwendig. Zur Aufrechterhaltung oder Steigerung des Körnerleguminosenanbaus in Deutschland ist es sicherlich erforderlich, Aspekte wie die Biodiversität in landwirtschaftlichen Fruchtfolgen zu honorieren (SASS 2009B).

Der Mischfruchtanbau mit Körnerleguminosen wurde schon vielfältig untersucht, hierbei wurde vor allem, wie auch teilweise in unseren Versuchen, Artenkombinationen, Aussaatstärken, Sortenwahl und Aussaatverfahren betrachtet (HAUGGARD-NIELSEN ET AL. 2008). Durch Anwendung der ^{15}N-Methode soll in laufenden und zukünftigen Analysen in Göttingen die symbiotische Stickstofffixierung der Winterackerbohne in den Ackerbohnenreinsaaten und in den Gemengen aus Winterackerbohnen und Winterroggen studiert werden. Von besonderem Interesse in den Gemengen ist auch die Frage, wie viel symbiotisch fixierter Stickstoff während der Vegetationszeit der Winterackerbohne zum Winterroggen transferiert wird. Ein bedeutender Stickstofftransfer würde die Autarkie der Gemenge gerade unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus unterstreichen. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um den Anbau von Winterackerbohnen-Winterroggengemengen vor Mais zu optimieren und um noch besser auf dieses System abgestimmte Saatstärken und Erntetermine herauszufinden. Das empfohlene Zweikulturnutzungssystem könnte in weiteren Versuchen nicht nur hinsichtlich der Siliereignung sondern auf unterschiedlichen Standorten mehrjährig z.B. hinsichtlich des Wasserverbrauchs geprüft werden. Nicht nur in ökologisch wirtschaftenden Betrieben ist der Nachhaltigkeitsaspekt für den ökonomischen Erfolg bedeutsam. Da jedoch Untersuchungen aus dem konventionellen Landbau oft nur eingeschränkt auf Fragen des ökologischen Landbaus übertragbar sind, sollten verstärkt ökolandbauspezifische Forschungsfragen bearbeitet und gefördert werden.

5 Zusammenfassung

Die Biogaserzeugung stellt eine Schlüsseltechnologie zur nachhaltigen Nutzung von erneuerbaren pflanzlichen Energien dar, hat ein großes Potenzial, um Strom und Wärme zu liefern und fossile Energieträger wie Kohle, Erdgas oder Erdöl zu ersetzen und trägt somit zur Ressourcenschonung bei. Durch die Biogaserzeugung kann erneuerbare Energie mit hohem ökologischen Wirkungsgrad erzeugt werden. Für landwirtschaftliche Betriebe, die Biogasanlagen betreiben, ist der erzielbare Methanhektarertrag von grundlegender Bedeutung. In den meisten Biogasanlagen wird vor allem Mais zur Energieproduktion eingesetzt. Im ökologischen Landbau wird Mais relativ ungern angebaut. Gründe sind neben möglichen Umweltbelastungen u.a. die aufwändige Unkrautregulierung und der hohe Stickstoffbedarf des Maises. Da beim alleinigen Anbau von Mais die landwirtschaftliche Nutzfläche einen Teil des Jahres ungenutzt ist, kann nicht die volle Vegetationsperiode und damit auch nicht das gesamte Flächenpotential zur Produktion ausgenutzt werden. Um den maximalen Methanhektarertrag zu erzielen, müssen neue Fruchtfolgekonzepte entwickelt werden, die u.a. eine hohe Flächenproduktivität aufweisen. In sogenannten Zweikulturnutzugssystemen werden Winterzwischenfrüchte vor Mais angebaut. Dies ermöglicht eine optimale Ausnutzug der Vegetationszeit und hat damit höhere Trockenmasse- und Biogaserträge zur Folge. Der Boden ist dabei auch vor und über den Winter bedeckt, wodurch Erosionen vermieden und Auswaschungsverluste des von den Winterzwischenfrüchten konservierten Stickstoffs gesenkt werden können. Da im ökologischen Landbau durch den Verzicht auf synthetische Düngemittel keine stickstoffzehrenden Zwischenfrüchte vor Mais angebaut werden können, erscheint es sinnvoll Winterleguminosen als Zwischenfrüchte im Zweikulturnutzungssystem für den ökologischen Landbau zu integrieren. Da das Zweikulturnutzungssystem mit Wintererbsen nicht immer ausreichende Erträge erzielen kann, könnte alternativ auch die Winterackerbohne als legume Zwischenfrucht eines Zweikulturnutzugssystems für die Biogasproduktion eingesetzt werden und wurden entsprechend in dieser Arbeit evaluiert. Winterackerbohnen werden in Deutschland unter anderem wegen ihrer begrenzten Winterhärte nur äußerst selten angebaut. In der Arbeitsgruppe „Züchtungsforschung Ackerbohne“ in unserem Department wird allerdings seit vielen Jahren erfolgreich an der Erhöhung der Frostresistenz und Winterhärte von Winterackerbohnen gearbeitet. Der Zielstellung dieses Projektes folgend sollte auch der aktuelle Stand der Winterhärte von Winterackerbohnen evaluiert werden. Ausreichende Winterhärte, genügend hohe Erträge und ein geringes Umweltrisiko lassen ein Zweikulturnutzungssystem mit Winterackerbohnen erfolgreich und vielversprechend erscheinen.

In zweijährigen Feldversuchen wurde in Göttingen ein Fruchtfolgeausschnitt in Form eines Zweikulturnutzungssystems untersucht, indem verschiedene Winterzwischenfrüchte vor Energiemais angebaut werden. Die Winterzwischenfrüchte Winterackerbohnen, Wintererbsen und Winterroggen wurden in Reinsaaten und Gemengen angebaut, im Herbst zu verschiedenen Zeitpunkten gesät, im Frühjahr zu verschiedenen Zeitpunkten geerntet und danach Energiemais angebaut. Die Auswirkungen, die sich durch die Variation der Saat- und Erntetermine, der Bestandesdichte und der Fruchtart

der Winterzwischenfrüchte auf die Trockenmasseerträge, spezifischen Methanerträge der Winterzwischenfrüchte und Gesamtmethanflächenerträge des Zweikulturnutzungssystems ergaben, wurden untersucht. Von Interesse war ebenfalls inwieweit mit Winterackerbohnen als Winterzwischenfrucht zum einen Stickstoff für die Nachfrucht bereitgestellt werden konnte, zum anderen, ob das Stickstoffaufnahmevermögen über Winter ausreichend hoch war, um die Belastung des Grundwassers durch Stickstoffaustrag weitgehend zu vermeiden.

Der spezifische Methanertrag der Winterzwischenfrüchte unterschied sich nicht signifikant voneinander. Deshalb wurde der Methanflächenertrag der Winterzwischenfrüchte fast ausschließlich von deren Trockenmasseertrag bestimmt. Analog war der Gesamtmethanertrag bestehend aus den Methanflächenerträgen der Winterzwischenfrüchte und dem des Maises sehr hoch mit dem Trockenmasseertrag des Gesamttrockenmasseertrag (r = 0,93**) korreliert. Damit möglichst hohe Methanflächenerträge erreicht werden können, müssen vor allem die Gesamttrockenmasseerträge maximiert werden. Um hohe Gesamttrockenmasseerträge mit möglichst guter Silierfähigkeit innerhalb eines Jahres zu erzielen, ist es, wie unsere Versuche zeigten, vor allem wichtig die Winterzwischenfrucht zu einem frühen Saattermin im Herbst zu säen. Der Saattermin des Maises sollte spätestens Mitte Mai liegen, um ausreichende Abreife zu gewährleisten. Ein nicht mit Stickstoff gedüngtes Zweikulturnutzungssystem mit Winterackerbohnen kann geringfügig höhere Flächenerträge erzielen als ein ebenfalls ungedüngtes Zweikulturnutzungssystem mit Winterroggen als Winterzwischenfrucht. Durch das ausreichende Stickstoffaufnahmevermögen der untersuchten Zweikulturnutzungssysteme kann die Gefahr des Stickstoffaustrags vor allem nach der Maisernte im Herbst und somit eine Belastung des Trinkwassers vermindert werden. Unter Roggen beinhaltenden Versuchsvarianten war der N_{min}-Gehalt sogar noch nach der Maisernte niedriger als unter Varianten mit Winterackerbohnen und Wintererbsen in Reinsaat oder Gemenge als Winterzwischenfrüchte. Obwohl das Zweikulturnutzungssystem mit der Reinsaat Winterackerbohne und Saatstärke von 70 Korn/m² den höchsten Methanflächenertrag erzielte, ist das Gemenge aus Winterackerbohnen und Winterroggen als Zwischenfrucht vor Mais empfehlenswerter, da dem nicht signifikanten Unterschied der Methanflächenerträge die Vorteile des geringeren mineralischen Stickstoffgehalts im Boden nach der Maisernte gegenüberstehen, wodurch die Gefahr der Stickstoffauswaschung nach dem Mais verringert wird. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die Siliereignung von Ackerbohnen durch die Beimischung von Winterroggen verbessert wird. Allerdings wurden selbst mit den Winterackerbohnen-Winterroggengemengen keine zum Silieren ausreichenden Trockensubstanzgehalte erreicht. Alle untersuchten Winterzwischenfruchtvarianten müssten zum Silieren angewelkt werden.

Neben diesen pflanzenbaulichen Versuchen und Analysen, die den Anbau von Winterackerbohnen in einem Zweikulturnutzungssystem optimieren, wurde untersucht, ob Winterackerbohnen ausreichend Frosttoleranz besitzen, um in einem solchen System erfolgreich angebaut werden zu können. Die Frosttoleranz von Winterackerbohnen kann als ein Bestandteil der Winterhärte in Feldversuchen nur unzureichend untersucht

werden, da im Feld vielerlei Faktoren wirken und sinnvoll differenzierende Winter selten sind. Deshalb werden in Göttingen seit 2003 kontrollierte Frostversuche mit Winterackerbohnen in einer Frostkammer durchgeführt. Die bisher erfolgreich etablierte Methode wurde technisch optimiert und bisherige Merkmale der Frosttoleranz um neue Merkmale ergänzt. Aus 36 Winterackerbohnenlinien wurden anhand von Frostkammer- und dreijährigen Feldversuchen frost- und krankheitsresistente Winterackerbohnenlinien selektiert – sie stammen aus einem Liniensortiment, welches aus der genetisch breiten Göttinger Winterackerbohnenpopulation entwickelt wurde. Nächte bis -17,5°C wurden von den meisten der 36 untersuchten Linien gut überlebt. Nur bei fünf der 36 untersuchten Winterackerbohnenlinien starben bis zum sechzigsten Tag nach dem Test mehr als die Hälfte der Pflanzen. Pilzliche Schaderreger wie Botrytis und Ascochyta spielen bei Winterackerbohnen eine bedeutende Rolle. Deshalb wurde für die Selektion der 36 in der Frostkammer untersuchten Winterackerbohnenlinien zwar auf einen Index aus Überlebensneigung und Wiederaufwuchs, zusätzlich aber auch auf die Feldbonituren der mehrjährigen Feldversuchen für die Krankheiten Ascochyta und Botrytis bezogen. An Hand der in Göttingen durchgeführten Feld- und Frostkammerversuche konnte gezeigt werden, dass das Liniensortiment aus der Göttinger Winterackerbohnen auch hinsichtlich der Kältetoleranz für den Anbau zur Biogasproduktion vielversprechend ist.

Das Winterackerbohnen-Winterroggengemenge als Winterzwischenfrucht in einem Zweikulturnutzungssystem ist zumindest in nicht zu kalten Wintern wie die der beiden Versuchsjahre (2007/08 und 2008/09) unter den hier dargestellten Bedingungen ohne Stickstoffdüngung gut geeignet, um maximale Methanflächenerträge zu erzielen, die Umweltgefährdung z.B. durch zu hohe N_{min}-Gehalte im Boden zu senken und die Biodiversität innerhalb der Fruchtfolge zu erhöhen. Mit diesem Zweikulturnutzungssystem für die Biogasproduktion wird neben dem Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz auch der Anbau einheimischer Körnerleguminosen unterstützt.

Durch Anwendung von ^{15}N-Methoden soll in zukünftigen Analysen die symbiotische Stickstofffixierung der Winterackerbohne in den Ackerbohnenreinsaaten und in den Ackerbohnen-Winterroggen-Gemengen erfasst werden. Von besonderem Interesse in den Gemengen ist auch die Frage, wie viel symbiotisch fixierter Stickstoff während der Vegetationszeit der Winterackerbohne zum Winterroggen transferiert wird. Ein bedeutender Stickstofftransfer würde die Autarkie der Gemenge gerade unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus unterstreichen. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um den Anbau von Winterackerbohnen-Winterroggengemengen vor Mais zu optimieren und um noch besser auf dieses System abgestimmte Saatstärken und Erntetermine herauszufinden. Das empfohlene Zweikulturnutzungssystem sollte hinsichtlich des Trockensubstanzgehalts, der daraus resultierenden Siliereignung der Winterzwischenfrüchte und des Wasserverbrauchs und auf mehreren unterschiedlichen Standorten weiter geprüft werden.

6 Literaturverzeichnis

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, V. BODIROZA, W. ZOLLITSCH, J. BOXBERGER & E.M. PÖTSCH, 2006: Strategien zur nachhaltigen Biogaserzeugung aus Energiepflanzen durch standortangepasste Fruchtfolgesysteme, Sortenwahl und optimale Ernte. Fachkongress Biogas, Linz, 22.02.2006.

ANSPACH, V. & D. MÖLLER, 2009: Konzepte und Strategien der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau – Ergebnisse des Bio-Biogas-Monitoring 2007. Tagungsband der 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bd. 1, 390-393.

ANSPACH, V. & D. MÖLLER, 2008: Biogas and Organic Farming: Empirical evidence on production structure and economics in Germany. 16th IFOAM World Congress, Modena, 16.-20.06.2008.

ANSPACH, V. & D. MÖLLER, 2007: Strukturen landwirtschaftlicher Biogasproduktion im ökologischen Landbau in Deutschland. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Bd. 1.

ARBAOUI, M., C. BALKO & W. LINK, 2008: Study of faba bean (*Vicia faba* L.) winterhardiness and development of screening methods. Field Crops Res. 106, 60–67.

BayLfU 2007: Biogashandbuch Bayern-Materialienband. Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.). besucht am 10.25.2010 http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/index.htm

BECKMANN, U. & H. KOLBE, 2000: Maisanbau im ökologischen Landbau. Infodienst für Betratung und Schule der Sächsischen Agrarverwaltung, 04/00, 74-88.

BÖHM, H., 2009a: Körnerleguminsoen in Bedrängnis. Ökologie und Landbau 152 (4), 15-17.

BÖHM, H., 2009b: Körnerleguminsoen – Stand des Wissens sowie zukünftiger Forschungsbedarf aus Sicht des ökologischen Landbaus. Journal für Kulturpflanzen 61 (9), 324-331.

BÖHME, D. & M. V. MARK, 2010: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009. Daten des Bundesumweltministeriums zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

BÖHME, D., W. DÜRRSCHMIDT & M. V. MARK, 2009: Erneuerbare Energie in Zahlen. Nationale und Interantionale Entwicklung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

BOND, D.A. , 1987: Recent developments in breeding field beans (*Vicia faba* L.). Plant Breeding 99, 1-26.

BOND, D.A. , G.J. JELLIS, G.G. ROWLAND, J. LE GUEN, L.D. ROBERTSON, S.A. KHALIL & L. LI-JUAN, 1994: Present status and future strategy in breeding faba beans (*Vicia faba* L.) for resistance to biotic and abiotic stresses. Euphytica 73, 151-166.

BUNDESREGIERUNG, 2008: Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Für ein nachhaltiges Deutschland. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Bonifatiusdruck, Paderborn.

DKM, 2009: Bedeutung des Maisanbaus weltweit. http://www.maiskomitee.de/web/intranet/print.htm, besucht 5.1. 2010.

FUCHS, J., 2009: Öko-Effizienz im Zuckerrübenanbau – Ansatz zur Beschreibung einer nachhaltigen Entwicklung. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.

FUKUTA, N., M. ARAI, T. YUKAWA ET AL., 2001: Effect of dwarfing induced by uniconazole-P on snow tolerance of the faba bean (*Vicia faba* L.). Plant Production Sciences 4, 189-195.

GHAOUTI, L., 2007: Comparison of pure line cultivars with synthetic cultivars in local breeding of faba bean (*Vicia faba* L.) for organic farming. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen

GÖDEKE, K., A. NEHRING & A. VETTER, 2007: Energiepflanzen clever anbauen. forum.new power – Magazin für erneuerbare Rohstoffe und Energie 3/2007, 34-37.

GRASS, R. & K. SCHEFFER, 2005: Alternative Anbaumethoden: „Das Zweikulturnutzungssystem“. Natur und Landschaft 9/10, 435-439.

GRASS, R. & K. SCHEFFER, 2003: Alternativen im und zum Silomaisanbau im ökologischen Landbau. Abschlussbericht Bundesprogramm Ökologischer Landbau. ÖL-Bericht-ID 15662.

GRASS, R., 2003: Direkt und Spätsaat von Silomais – Ein neues Anbausystem zur Reduzierung von Umweltgefährdung und Anbauproblemen bei Optimierung der Erträge. Dissertation, Universität Kassel.

GRASS, R. & K. SCHEFFER, 2003b: Direkt- und Spätsaat von Silomais nach Wintererbsen-Vorfrucht – Erfahrungen aus Forschung und Praxis. Beitrag bei der 7. Wissenschaftstagung zum ökologischen Landbau „Ökologischer Landbau der Zukunft“, Wien, 24.-26.2.2003, 45-48.

HAUGGARD-NIELSEN, H., B. JORNSGAARD, J. KINANE & E.S. JENSEN, 2008: Grain-legume-cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. Renewable Agriculture and Food Systems 23 (1), 3-12.

HAUSER, S. & W. BÖHM, 1984: Erfahrungen und Ergebnisse mit dem Anbau von Winterackerbohnen. Kali-Briefe (Büntehof) 17, 39–52.

HERZOG, H., 1988: Winter hardiness in faba beans: Varietal differences and interrelations among selection criteria. Plant Breeding 101, 269-276.

HRBEK, R., B. FREYER, T. AMON & J.K. FRIEDEL, 2007: Sustainable crop rotations for organic energy crop production in Austria. 9. Wissenschaftstagung zum ökologischen Landbau, Bd. 1, 425-428.

HUB, M., 2007: Erneuerbare Energien – der Königsweg aus der Klimakatastrophe? Forum der Geiökologie 18 (2), 33-38.

KARPENSTEIN-MACHAN, M. & R. STÜLPNAGEL, 2000: Biomass and nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. Plant and Soil 218, 215-232.

LEWANDOWSKI, I., A. KICHERER & P. VONIER, 1995: CO_2-balances for the cultivation and combustion of Miscanthus. Biomass Bioenerg. 8, 81-90.

LINK, W. & M. ARBAOUI, 2005: NEUES von der Göttinger Winter-Ackerbohne. Bericht über die 56. Tagung 2005 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs HBLFA Raumberg – Gumpenstein. 22.- 24. November 2005.

LÜTKE ENTRUP, N. & P. ZERHUSEN, 1992: Mais und Umwelt, Dr. Kovac Verlag, Hamburg.

METAYER, N., 2004: Vicia faba breeding for sustainable production structure and economics in Germany, 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, 16.-20.06. 2008.

MÖLLER, K., 2003: Systemwirkungen einer „Biogaswirtschaft“ im ökologischen Landbau: Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf Spurengasemissionen, Biogas Journal 1, 20-29.

NEUBAUER , W. & R. KOHLS, 1994: Ergebnisse zur konservierenden Bodenbearbeitung bei Kartoffeln und Mais unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffs in Pflanze und Boden. Mitt. Gesellsch. Pflanzenbauwissensch. 7, 47-50.

POETSCH, J., 2007: Pflanzenbauliche Untersuchungen zum ökologischen Anbau von Körnerleguminosen an sommertrockenen Standorten Süddeutschlands. Dissertation, Universität Hohenheim.

RÜHL, G., A. BRAMM & J. GREEF, 2009: Aspekte des Anbaus von Körnerleguminosen. Journal für Kulturpflanzen 61 (9), 312-317.

SASS, O., 2009a: Marktsituation und züchterische Aktivitäten bei Ackerbohnen und Körnererbsen in der EU. Vortrag, JKI Braunschweig, 21./22.04.2009.

SASS, O., 2009b: Marktsituation und zücherische Aktivitäten bei Ackerbohnen und Körnererbsen in der EU. Journal für Kulturpflanzen 61 (9), 306-308.

SCHEFFER, K. & M. KARPENSTEIN-MACHAN, 2000: Ökologischer und ökonomischer Wert der Biodiversität am Beispiel der Nutzung von Energiepflanzen. Symposium der AG Ressourcen der Gesellschaft für Pflanzenzüchtung am 23./24. November 2000 in Witzenhausen. Schriftenreihe der Zentralstelle für Agrardokumenttion und -information, Informationszentrum Genetische Ressourcen (IGR), Band 16, S. 177 - 192

SCHMIDT, W. & H. BURGER, 2010: Sorten für den Ökolandbau. mais 1/2010, 2-5.

SPECHT, M., 2009: Anbau von Körnerleguminosen in Deutschland - Situation, limitierende Faktoren und Chancen. Journal für Kulturpflanzen 61 (9), 302-305.

STEMANN , G. & N. LÜTKE ENTRUP, 1990: Maisanbau mit Gras-Untersaaten. mais 2/1990, 27-32.

WILLE, J., 2010: Biogas. Von wegen Klimaschutz. Frankfurter Rundschau 11.5.2010. http://www.fr-online.de/in_und_ausland/wirtschaft/aktuell/1500859_Von-wegen-Klimaschutz.html, besucht am 11.5.2010.

Danksagung

Danken möchte ich Herrn Prof. Dr. R. Rauber für die Überlassung des Themas und die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Insbesondere die vertrauensvolle Zusammenarbeit und sein stets offenes Ohr für kleine und große Probleme habe ich schätzen gelernt.

Ein besonderes Wort des Dankes möchte an Prof. Dr. W. Link richten, ohne sein weitergegebenes Fachwissen, seine Ideen und Anregungen, seine konstruktive Kritik und sein persönliches Engagement wäre diese Arbeit sicherlich nicht so gut gelungen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen fleißigen und netten Helferinnen und Helfern auf dem Feld, in der Werkstatt, im Labor, im Gewächshaus und der Klimakammer und beim Korrekturlesen der Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich bei Regina Martsch bedanken. Ohne ihre großartige Unterstützung wäre dieses Projekt nicht zu bewältigen gewesen.

Herzlicher Dank geht an meine Kollegen Tobias Jesske, Nicole Wrage, Gunda Asselmeyer, Sabine von Witzke-Ehbrecht, Andreas Henn und Uwe Ammermann, die immer eine unkomplizierte abteilungsübergreifende Zusammenarbeit ermöglichten.

Ebenfalls bedanke ich mich für die Zusammenarbeit und Unterstützung bei der NPZ-Lembke KG, Hohenlieth, der KWS Saat AG, Einbeck und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

Meinen lieben Freunden Almut Beyes, Claus Christmann, Christian Ploke, Tobias Urbanczyk und Hauke Zeiser möchte ich für ihre persönliche Unterstützung und die fröhlichen gemeinsamen Stunden ein besonders herzliches Dankeschön sagen.

Schließlich gilt mein größter Dank meiner Familie.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Franziska Roth
Geburtsdatum	08. April 1980
Geburtsort	Heidelberg

Ausbildung

1990 – 1999	Eleonoren-Gymnasium Worms Abschluss: Abitur
04/2000 – 10/2003	Studium der Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim Abschluss: Bachelor of Science
10/2003 – 04/2005	Studium der Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen Abschluss: Master of Science

Beruflicher Werdegang

06/2005 – 04/2006	Leitende Mitarbeiterin der landwirtschaftlichen Betriebsgemeinschaft „ABS Groß Flöthe“, Landkreis Wolfenbüttel
04/2006 – 07/2006	Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Braunschweig, Goslar
09/2006 – 07/2010	Promotion an der Georg-August-Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilungen Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Arbeit weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits anderen Prüfungsbehörden vorgelegen hat.

Weiter erkläre ich, dass ich mich an keiner anderen Hochschule um einen Doktorgrad beworben habe.

Göttingen, den 27. Mai 2010

_____

(Franziska Roth)

Hiermit erkläre ich an eidesstatt, dass diese Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde.

Göttingen, den 27. Mai 2010

_____

(Franziska Roth)