Dachverband
Agrarforschung

DAF

agrar spectrum

Band 54

Klimaschutz mit Land- und Forstwirtschaft

DLG Verlag

agrarspectrum

Schriftenreihe

des Dachverbandes wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung, DAF e.V.

Band 54

Klimaschutz mit Land- und Forstwirtschaft

Wissenschaftliche Online-Tagung des
Dachverbandes Agrarforschung (DAF) e.V.

am 14. Oktober 2021

Herausgeber:
Dachverband Agrarforschung e.V.

DAF

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Schriftenreihe agrarspectrum wird vom Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung herausgegeben. Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für den Zweck der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muss über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren, Scannen der Abbildungen, einschließlich Speicherung, Veränderung, Manipulation im Computer und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

Alle Informationen und Hinweise ohne jede Gewähr und Haftung.

Redaktion: Silke Ausmeier, Odette Rebmann

DAF e.V., Eschborner Landstraße 122
60489 Frankfurt am Main
Telefon: (069) 247 88 322
Telefax: (069) 247 88 114
E-mail: S.Ausmeier@dlg.org
Internet: www.agrarforschung.de

© 2021 DLG-Verlag GmbH, Eschborner Landstraße 122
60489 Frankfurt am Main
Telefon: (069) 247 88 0
Telefax: (069) 247 88 484
E-mail: dlg-verlag@dlg.org
Internet: www.dlg-verlag.de

Inhalt Seite

Vorwort 4
Prof. Dr. Karl H. Mühling, Präsident des DAF, Kiel

Verbesserung der Stickstoffeffizienz in der Qualitätsweizen-produktion 5
Dr. Gerhard Rühl, Thomas Kämpfer, Dr. Doreen Gabriel und Prof. Dr. Jörg-Michael Greef, Julius Kühn-Institut, Braunschweig

Potential von Nitrifikations- und Ureasehemmstoffen zur Minderung gasförmiger N-Verluste aus landwirtschaftlich genutzten Böden 21
Dr. Reiner Ruser, Universität Hohenheim, Stuttgart

Klimaschutz durch Humusaufbau: Möglichkeiten und Grenzen 31
PD Dr. Axel Don und Prof. Dr. Heinz Flessa, Thünen-Institut, Braunschweig

Ansätze der Fütterung zur Minderung der Methanemission beim Wiederkäuer 38
Prof. Michael Kreuzer[1], Dr. Melissa Terranova[2], Prof. Marcus Clauss[3]
[1] ETH Zürich, [2] ETH Zürich/Lindau, [3] Klinik für Zoo-, Heim- und Wildtiere, Zürich

Klimaschonender Lebensmittelkonsum – wie reagieren Konsumenten und was kann verbessert werden? 53
Jun.-Prof. Dr. Ramona Weinrich, Universität Hohenheim, Stuttgart

Verzeichnis der Autoren 59

Vorwort

Prof. Dr. Karl H. Mühling, Präsident des DAF, Kiel

Die Landwirtschaft spielt im Vorgehen gegen den Klimawandel eine bedeutende Rolle und ist gefordert, einen umfangreichen und dauerhaften Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Im Jahr 2018 war im nationalen Emissionsinventar der Sektor Landwirtschaft für 7,4 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Rund zwei Drittel der deutschen Emissionen an reaktiven Stickstoffen stammen aus der Landwirtschaft.

Andererseits weist die Landwirtschaft im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren ein Potenzial auf, aktiv zum Klimaschutz durch Kohlenstoffspeicherung im Boden beizutragen. In Deutschland sind mehr als zwei Milliarden Tonnen Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden gespeichert, was rund der Hälfte des gesamten Kohlenstoffvorrats in wald- und landwirtschaftlichen Ökosystemen entspricht.

Die deutschen Wälder entlasten die Atmosphäre jährlich um rund 62 Millionen Tonnen Kohlendioxid, wie aus der Kohlenstoffinventur 2017 hervorgeht. Damit kompensieren sie etwa sieben Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland. Die Bindung von CO_2-Kohlenstoff in langlebigen Holzprodukten leistet einen weiteren Beitrag zum Klimaschutz.

Im Rahmen der Tagung werden in vier Teilgebieten Möglichkeiten zur Emissionsminderung mit Land- und Forstwirtschaft vorgestellt und diskutiert:

I. Emissionsminderung in der Pflanzenproduktion

II. CO_2-Emissionen mindern, Kohlenstoffsenken fördern

III. Emissionsminderung in der Nutztierhaltung

IV. Bedeutung des Verbraucherverhaltens und ganzheitliche Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen

Der DAF e.V. lädt Akteure aus Forschung, landwirtschaftlicher Praxis, Wirtschaft und Politik ein, die verschiedenen Möglichkeiten zum Klimaschutz mit Land- und Forstwirtschaft zu diskutieren.

Verbesserung der Stickstoffeffizienz in der Qualitätsweizenproduktion

Dr. Gerhard Rühl, Thomas Kämpfer, Dr. Doreen Gabriel und
Prof. Dr. Jörg-Michael Greef, Julius Kühn-Institut, Braunschweig

---

Stichworte: Backweizen, Rohprotein, Klebergehalt, Volumenausbeute, Qualität, Bewertung

Abkürzungen: Rohproteingehalt (RP), Feuchtklebergehalt (FK), Rapid-Mix-Test (RMT), Volumenausbeute (VA), Stickstoff (N), Düngeverordnung (DüV), hochmolekulare Untereinheiten der Glutenine (HMW), niedermolekulare Untereinheiten der Glutenine (LMW)

Einleitung und Problemstellung

Winterweizen ist in Deutschland sowohl hinsichtlich der Anbaufläche (langjähriges Mittel: 3,1 Mio. ha) als auch der Erntemenge (langjähriges Mittel: 23,4 Mio. t) die wichtigste Getreideart. Er zeichnet sich durch ein hohes und stabiles Ertragspotenzial und eine ausgezeichnete Marktleistung aus. Winterweizen ist die Getreideart mit den höchsten Bodenansprüchen und besitzt einen hohen Wasserverbrauch, bevorzugt daher tiefgründige Böden mit ausreichender Wasserversorgung.

Die deutsche Weizenernte wird vorwiegend als Futtermittel verwendet, dient jedoch zu etwa 30 % der menschlichen Ernährung, insbesondere im Brot- und Backwarenbereich, und auch als Bioenergielieferant und der Erzeugung von Industriegrundstoffen (BMEL, 2019). Ein weiterer Anteil von 7,5 Mio t wird exportiert (BLE 2021, Wirtschaftsjahr 2018/2019) und teilweise ebenfalls für die Nahrungsmittelproduktion herangezogen.

Winterweizen wird hinsichtlich seiner Eignung zur Herstellung von Backwaren in die Qualitätsgruppen E, A, B und C eingeteilt. Die Zuordnung zu den Qualitätsgruppen erfolgte 1995 auf Grundlage von definierten Mindestanforderungen. Wesentliche Kriterien sind derzeit die Volumenausbeute (VA) im sog. Rapid-Mix-Test (RMT) sowie die Beschreibung von Elastizität und Oberflächenbeschaffenheit des Teiges. Außerdem sind Mindestanforderungen für die Fallzahl als Indiz

für die Stärkequalität, den Sedimentationswert als Indiz für die Qualität des Klebers sowie Wasseraufnahme und Mehlausbeute (Typ 550) zu erfüllen. Bezüglich des RP wurde 2019 entschieden, diesen in der Beschreibenden Sortenliste nur noch als beschreibendes Merkmal aufzuführen, aber nicht mehr bei der Zuordnung der Sorten zu den Qualitätsgruppen zu berücksichtigen. Die Qualitätsanforderungen und Handelskriterien der deutschen Mühlen zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Qualitätsanforderungen und Handelskriterien der deutschen Mühlen pro Sortengruppe (Agravis 2018)

Qualitätsgruppe	Rohproteingehalt in %	Klebergehalt in %	Sedimentation in ml
E-Weizen	mind. 14 %	mind. 33 – 35 %	60 – 70
A-Weizen	mind. 13 %	mind. 28 – 30 %	45 – 50
B-Weizen	mind. 12 %	mind. 25 – 27 %	30 – 35
C-Weizen	max. 11,5 %	max. 20 – 23 %	–

Für die Mehlherstellung werden in Deutschland jährlich ca. 7,4 t Weizen verwendet. Dazu werden ca. 45 – 50 % B-Weizen (11,5 – 12,5 % RP), 40 – 45 % A-Weizen (13,0 – 13,5 % RP) und 10 – 15 % E-Weizen (14,0 – 15,0 % RP) eingesetzt (Agravis 2018). Darüber hinaus werden 1,8 Mio t/Jahr für industrielle Zwecke genutzt.

Die Bewertung der Qualität und damit auch die Bezahlung von Backweizen erfolgt zurzeit vorwiegend auf der Basis des RP, der mittels Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) zuverlässig und schnell bestimmt wird. Weitere für den Erfassungshandel wichtige Kriterien mit Bezug zur Backqualität sind die Fallzahl, das Hektolitergewicht für die Vermahlung, die Qualitätsgruppe (B, A bzw. E) und die Einhaltung von Hygienestandards sowie phytosanitärer Standards (Agravis 2018). Festzuhalten gilt jedoch, dass der RP aufgrund einer in früheren Jahren gegebenen engen Korrelation zur VA und der schnellen, zuverlässigen Bestimmbarkeit mittels NIRS das wesentliche Handelskriterium bei der Weizenerfassung darstellt. Der RP ist auch international (Export) und für die Qualität von Futtermitteln das entscheidende Merkmal.

Den vom Handel geforderten hohen RP versuchen die Landwirte durch eine Stickstoffspätdüngung, die sogenannte Qualitätsdüngung, zu erzielen. Die Wirksamkeit einer größeren N-Düngermenge zur Anhebung des RP belegen viele Studien und Versuche (Fuertes-Mendizábal et al. 2010; Garrido-Lestache et al. 2005; López-Bellido et al. 1998; Wieser und Seilmeier 1998). Um eine Überversorgung in frühen Entwicklungsstadien mit negativen Auswirkungen zu vermeiden, eine dem tatsächlichen Bedarf angepasste Applikation zu ermöglichen, mögliche N-Verluste zu vermindern und den RP zu steigern, wird die N-Düngung

in der Backweizenproduktion praxisüblich in zwei bis vier Teilgaben appliziert (Alcoz et al., 1993; Ercoli et al., 2013; Hamid 1972). Dabei zeigt sich, dass der RP durch die Verlagerung von N-Teilgaben in spätere Entwicklungsabschnitte erhöht werden kann (Blandino et al. 2015; Boese 2011; Wieser und Seilmeier 1998). Aktuelle Arbeiten liefern Indizien dafür, dass die Backqualität vorrangig durch die Sorte und nur nachrangig durch die N-Verteilung und zuletzt die N-Düngermenge determiniert wird (Ravier et al., 2018, Rossmann et al., 2020; Xue et al. 2016).

Bekannt ist jedoch auch, dass die Wirkung der Spätdüngung stark zwischen den Standorten und Jahren variiert und von vielen Faktoren wie Applikationsmenge, Zeitpunkt der Gabe, Düngerform, Ertragspotential oder dem aktuellen N-Versorgungszustand der Böden abhängt (Ayoub et al. 1994; Fuertes-Mendizábal et al. 2010; Garrido-Lestache et al. 2004, 2005; Schulz et al. 2015). Zum Zeitpunkt dieser N-Spätdüngung ist außerdem das erzielbare Ertragsniveau u. a. aufgrund der nicht bekannten Witterungs- und Bestandsentwicklung nur unzureichend abschätzbar, sodass die tatsächlich für Ertrag und Qualität erforderliche N-Menge im Voraus nicht zuverlässig geschätzt werden kann (Obenauf 2009). Wenn die N-Spätdüngung in länger anhaltende Trockenheits- oder Niederschlagsphasen fällt, ist ihre Wirksamkeit hinsichtlich der Anhebung des RP meist nicht gegeben. Damit verschlechtert die N-Spätdüngung besonders in ertragsschwächeren Jahren den N-Bilanzsaldo und kann zu unerwünschten N-Emissionen beitragen.

Die in den Jahren 2017 und 2020 novellierte Düngeverordnung (DüV) weist als Ziele einerseits eine dem Bedarf des Pflanzenbestands angepasste N-Bedarfsermittlung als Grundlage der Pflanzenproduktion aus, misst jedoch außerdem der Vermeidung von Nährstoffverlusten und dem Schutz der Gewässer einen hohen Stellenwert bei. Daher werden in diesem Beitrag die Hemmnisse für eine umwelt- und klimaschutzfreundliche Backweizenproduktion identifiziert sowie bestehende und zukünftige Lösungsmöglichkeiten und der aktuelle Forschungsbedarf aufgezeigt.

Bewertung des Backweizens

Derzeitig ist der schnell mittels NIRS bestimmbare RP das wichtigste Qualitätskriterium für den nationalen und internationalen Handel und dient daher bei der Erfassung als wesentliches Kriterium für die Bezahlung. Basis der Preisbildung nach Qualitätsgruppe ist das Erreichen der RP-Stufen 12 %, 13 % und 14 %: Die hohe Bedeutung des RP ist vorwiegend der Tatsache geschuldet, dass der aussagekräftigere RMT arbeits- und zeitaufwändig ist und daher im Zuge der

Erfassung nicht genutzt werden kann. Man geht außerdem davon aus, dass eine ausreichende Korrelation zum RP besteht.

Allerdings mehren sich seit vielen Jahren die Indizien dafür, dass bzgl. der Aussagekraft des RP als Indikator für die Backqualität große Unterschiede zwischen den Sorten bestehen (Johansson und Svensson 1998; Koppel und Ingver 2010; Pomeranz 1965; Seling, 2010; Weegels et al. 1996) und außerdem die Aussagekraft des RP als Indikator für die VA mit steigendem RP abnimmt (Gabriel et al. 2017). Ein Zusammenhang zwischen RP und VA ist oberhalb von 12 % RP kaum noch gegeben (Abb. 1). Außerdem zeigt die Praxis, dass auch Mehle mit geringeren RP ausreichende Backqualitäten liefern können, ein klares Indiz dafür, dass in erster Linie die Proteinqualität und nicht die Proteinmenge für die backtechnologischen Eigenschaften des Weizens verantwortlich ist (Linnemann et al. 2002; Rossmann et al. 2019; Weegels et al. 1996; Xue et al. 2016).

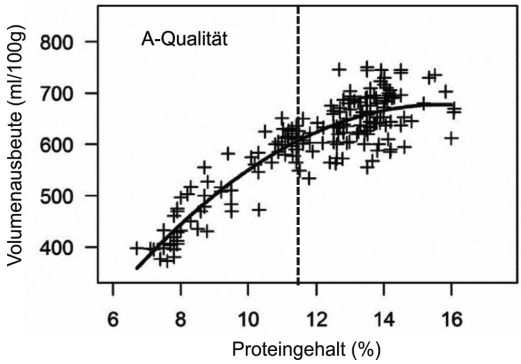


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Proteingehalt und Volumenausbeute (nach RMT) für A-Sorten (Gabriel et al. 2017).

Aufgrund dieser nicht immer zuverlässigen Bewertung auf Basis des RP wurde im Rahmen von Projekten (BackProg, N-DECREASE, Projektträger BLE) untersucht, ob eine direkte valide Ermittlung des BV mittels NIRS möglich ist. Als Referenzanalytik diente dabei der vom Detmolder Institut für Sicherheit und Qualität bei Getreide des Max Rubner-Instituts (MRI) durchgeführte RMT. Ergebnis ist eine bessere Prognose der VA im Vergleich zur indirekten Abschätzung über den RP und den im praxisüblichen Bereich des RP (> 12 %) wenig ausgeprägten Zusammenhang von RP und VA, die aber bisher mit einem RPD von 2,0 nur für eine „grobe Schätzung“ reicht (Abb. 2). Eine höhere Genauigkeit wird nicht zuletzt durch den methodenimmanenten Fehler des RMT von knapp 40 ml verhindert. Das Verfahren ist noch nicht praxisreif, insbesondere ein Testlauf in der Praxis steht noch aus.

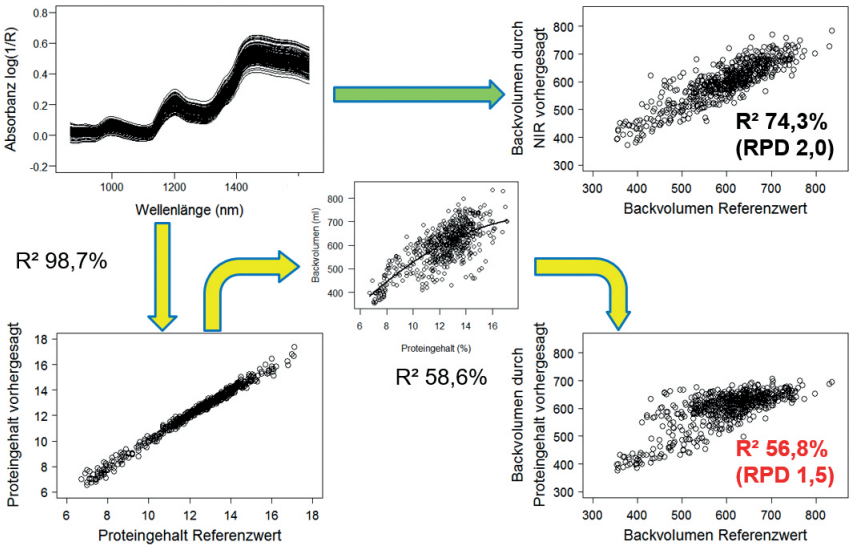


Abb. 2: Abschätzung des Proteingehaltes und des Backvolumens am Ganzkorn. a) NIR-Spektren werden im Handel aufgenommen und b) der Proteingehalt durch NIR geschätzt. Da c) der Proteingehalt nur 58,6 % der Variabilität im Backvolumen erklärt, würde d) die Vorhersage des Backvolumens durch den NIR-geschätzten Proteingehalt nur zu 56,8 % (entspricht einem RPD von 1,5) erklärt. e) die im Rahmen von BackProg entwickelten Kalibrationen sind zwar aus Sicht der NIR-Kalibration noch nicht zufriedenstellend, können aber bereits jetzt das Backvolumen besser abschätzen (alle Proben: R^2 74,3 % entspricht einem RPD von 2,0) als jede derzeitig in der Praxis genutzte, auf dem Indikator Proteingehalt basierende Kalibration (d). (Gabriel 2017).

Für den Bäcker als Adressaten der Mühlen ist eine ausreichende, im standardisierten Backversuch (RMT) erzielte VA bedeutsam. Da auch die Mühlen zumindest bei kleineren Chargen (z.B. Anlieferung per LKW) den Zeitaufwand des RMT scheuen, werden für die bereits vom Erfassungshandel vorgemischten Partien meist lediglich leicht zu bestimmende Parameter wie der RP und insbesondere der Feuchtklebergehalt (FK), der Sedimentationswert und die Fallzahl herangezogen. Im Rahmen des Vertragsanbaus einiger Mühlen wird als Alternative zum RP der FK zur Bewertung der Backqualität herangezogen.

Damit stellt sich generell die Frage, welches Kriterium/welche Kriterien für die Bewertung des Weizens entlang der Wertschöpfungskette genutzt werden sollten und können. Anlässlich eines Workshops im Jahr 2018 zum Thema „Backqualität bei Weizen“ im Bundesministerium für Ernährung und Landwirt-

schaft in Bonn wurden Sorteninformationen zu Verkleisterungs- und Teigeigenschaften sowie zur Proteinqualität, gemessen an der Menge und Qualität der Kleberproteine, in den Fokus gerückt. Auch die Vertreter der Mühlen äußerten Interesse an einer Erweiterung der Beschreibung der zugelassenen Sorten um Eigenschaften, welche die Proteinqualität und Teigrheologie betreffen. Sie wiesen in dem Zusammenhang auch auf die unterschiedlichen Anforderungen an den Backweizen je nach Verwendungszweck hin. Im Rahmen eines Vortrags beim Verband der Getreide-, Mühlen- und Stärkewirtschaft (VGMS e.V.) im Jahr 2018 tendierten dessen Mitglieder ebenfalls eher zum Klebergehalt als zur VA nach RMT. Der Klebergehalt ist dabei relativ einfach und schnell in 10-15 min mit guter Reproduzierbarkeit bestimmbar. Ob allerdings lediglich die Umstellung auf eine Erfassung nach Klebergehalt zu einer Veränderung der N-Düngung im Weizenanbau führen würde, ist fraglich, da der Klebergehalt in der Regel eng mit dem RP korreliert ist. Erfahrungen dazu können ggf. aus der Erfassung beim Wilhelm Fromme Landhandel gewonnen werden, dessen Erfassung national vorwiegend auf dem Klebergehalt basiert.

Zur Proteinqualität ist bekannt, dass nicht nur die Menge, sondern insbesondere die Zusammensetzung des Klebers bedeutsam ist (Thanhaeuser et al. 2014; Veraverbeke und Delcour 2002). Die Kleberproteine bestehen aus den Fraktionen der Gliadine und der Glutenine, entscheidend sei das Mengenverhältnis zueinander sowie die Gluteninqualität (Verhältnis der niedermolekularen (LMW) zu den hochmolekularen Untereinheiten (HMW), Gluteninmakropolymer-Fraktion). Zahlreiche Studien belegen, dass höhere N-Gaben die Backqualität durch Anhebung des Gliadin/Glutenin- und des LMW/HMW-Verhältnisses verbessern können (Fuertes-Mendizábal et al. 2010; Garrido-Lestache et al. 2004; Jia et al. 1996; Wieser und Seilmeier 1998; Zörb et al. 2010). Diese Merkmale der Backqualität sind stark vom Genotyp, der Umwelt, der Düngung und deren direkten und indirekten Interaktionen abhängig (Delcour et al. 2012; Osman et al. 2012; Shewry und Halford 2002).

Kämpfer et al. (2021) prüften, ob der GMP-Gehalt die VA besser erklären kann als der RP (Abb. 3). Während bei niedrigen N-Gaben der RP die VA besser erklärt, gilt dies bei praxisüblicher N-Gabe und höheren N-Mengen für die Menge an GMP. Alle vorgenannten Komponenten der Backqualität sind jedoch nur mit aufwändigen und zeitintensiven Verfahren bestimmbar und damit für die Qualitätsbestimmung im Zuge der Backweizenerfassung ungeeignet.

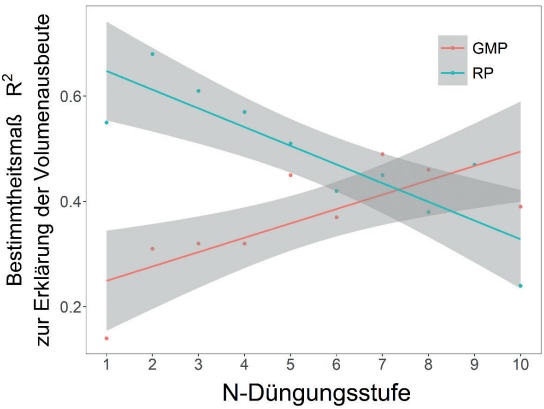


Abb. 3: Einfluss der N-Düngungsstufe auf den Zusammenhang von Gluteninmakropolymergehalt mit Volumenausbeute (Rot) sowie Rohproteingehalt mit Volumenausbeute (Grün) (12 Sorten, 2 Standorte, 3 Jahre, 10 N-Stufen von 60–315 kg N/ha; N_7 entspricht dabei dem praxisrelevanten Bereich).

Hemmnisse eines N-effizienten, umwelt- und klimafreundlichen Backweizenanbaus

Hauptproblem in der derzeitigen Praxis ist das Festhalten an der Bewertung und Bezahlung aller Erntepartien nach deren RP. Dies erscheint einerseits aus der Sicht der Erzeugung von Backwaren nicht angemessen und führt andererseits zu einer suboptimalen Zusammenlagerung von Sorten/Erntepartien, welche die im Feld erzeugten guten Qualitäten mindern kann. Gründe sind aus der Sicht der Erfasser eine limitierte Anzahl an Silos, die eine bessere Differenzierung nach Verwendungszweck ermöglichen würden, das Fehlen eines alternativen validen Schnellverfahrens und der auf den RP fokussierte internationale Weizenhandel. Zeitaufwändigere Verfahren, die mit einer chemischen Analytik oder aufwändigeren backtechnologischen Analysen verbunden sind, seien im Zuge der Ernteerfassung nicht möglich.

Um weiterhin die geforderten „Qualitäten“ erzeugen zu können, halten landwirtschaftliche Betriebe an der Praxis der Spätdüngung fest, schöpfen ihren Rahmen für die N-Düngermenge aus, um den RP als preisrelevante Größe zu maximieren, und riskieren damit weiterhin unnötige N-Emissionen sowie erhöhte N-Salden, insbesondere aufgrund schlechter N-Düngerverwertung zum Zeitpunkt der letzten N-Gabe. Dieses Festhalten am RP verhindert zusätzlich den Einzug von Sorten mit „neuer Genetik“, also guter Backeignung bei reduziertem

RP, in die landwirtschaftliche Praxis und motiviert die Weizenzüchtung damit auch nicht, diesen zukunftsträchtigen Weg weiterzuverfolgen.

Leider gibt es in dieser verfahrenen Situation auch kein Entgegenkommen seitens der Verarbeiter, sei es aus Unkenntnis über die mit der Erzeugung von proteinreichen Weizenpartien verbundenen Umweltprobleme oder aufgrund des aus wirtschaftlichen Gründen erfolgenden Festhaltens an etablierten Verfahren, bei denen ein mehr an Protein als „doppelter Boden" fungieren mag oder zu einer schnelleren Fertigung verhilft. Die Verfahren sind vorrangig an große, einheitliche und proteinreiche Partien angepasst; die nach Vormischung bei der Erfassung resultierenden Qualitäten reichen offensichtlich aus.

Letztlich bleibt fraglich, wie landwirtschaftliche Betriebe auf den Spagat zwischen den Vorgaben der DüV 2020 und den weiterhin unveränderten Anforderungen der Verarbeiter an den RP reagieren und ggf. in der Konsequenz auf E-Qualitäten zur Backwarenerzeugung oder A- und B-Qualitäten zur Verwertung als Tierfutter ausweichen.

Lösungsansätze für einen nachhaltigen Backweizenanbau

Das übergeordnete Ziel der DüV, welches im Interesse aller Akteure der Backweizenwertschöpfungskette liegen sollte, ist eine standortangepasste, ressourceneffiziente und -schonende Weizenproduktion. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte in Zukunft der Sortenwahl eine größere Bedeutung beigemessen werden. In den vergangenen Jahren wurden immer wieder Sorten mit „neuer Genetik" angemeldet, die bei reduziertem RP gute bis sehr gute Backergebnisse erzielen konnten und damit die verbreitete Annahme der engen Korrelation zwischen RP und Backqualität infrage stellen (Gabriel et al. 2017; Seling 2010) sowie eine N-Düngungsstrategie zur Steigerung des RP entbehrlich machen können (Koppel und Ingver 2010). Es gilt daher, dafür Sorge zu tragen, dass ihr Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis nicht an der auf den RP fokussierten Bezahlung bei der Erfassung bzw. den nicht an die neuen backtechnologischen Eigenschaften („neue Genetik") adaptierten Anforderungen der verarbeitenden Industrie scheitert. Eine Möglichkeit wäre z.B. die getrennte Erfassung und Vermarktung dieser Sorten. Besonders wünschenswert sind dabei Sorten, die sich bzgl. der Backqualität als weitgehend umweltstabil erweisen und Sorten, die besonders effizient im Hinblick auf das Kleberbildungsvermögen pro % RP sind, also ein kleberreiches RP bilden. Letztere bieten ein bislang kaum genutztes Potential, eine gute Backqualität bei limitierter N-Verfügbarkeit zu erreichen (Hüsken 2020).

Im Anbau gilt es, insbesondere die N-Düngung auf den Ertrag sowie die Protein- und Backqualität der jeweiligen Sorte am gegebenen Standort abzustimmen. Ziel muss die Minimierung von N-Emissionen durch Optimierung der N-Düngestrategie sein, bei welcher der zeitlichen Verteilung, der Präzision der Ausbringung und der Düngerart besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Zusätzlich sollte die generelle Eignung eines Standorts z.B. hinsichtlich der Bodengüte sowie der Lage des Schlages (Flächen mit erhöhter Nitratbelastung des Grundwasserkörpers („rote Gebiete"), Wasserschutz- und Trinkwassereinzugsgebiete) überdacht und ggf. ganz auf den Anbau von Backweizen verzichtet werden. Auch wenn die Ackerbaustrategie 2035 des BMEL (BMEL 2021) keine verpflichtenden Vorgaben vorsieht, gilt es trotzdem, alle genannten, zur Verfügung stehenden pflanzenbaulichen Möglichkeiten auf ihre Anwendbarkeit für eine umweltverträgliche Weizenproduktion am gegebenen Standort zu prüfen und einzusetzen.

Die Ergebnisse zu Ertrags- und Qualitätsparametern der Feldversuche des Projekts N-DECREASE mit variierter N-Düngung an unterschiedlichen Standorten wurden im Hinblick auf die Entwicklung angepasster N-Düngestrategien zur Modellierung eines Szenarios für rote Gebiete mit der maximal angedachten N-Reduktion von 20 % genutzt (Tab. 2, Beispiel A-Qualitäten). Ausgehend von einem Bedarfswert nach DüV 2020 ergab sich eine Abnahme aller ermittelten Qualitätsparameter, die relative Änderung unterschied sich jedoch stark zwischen den Bewertungsparametern. Am stärksten waren die gängigen Indikatoren RP, FK und Sedimentationswert betroffen; der Rückgang fiel beim E-Weizen aufgrund des nach DüV vorgegebenen höheren Bedarfswerts geringer aus. Die VA wies einen mittleren Rückgang von 5,0 (E) bis 6,4 % (A) auf. Positiv hervorzuheben ist die deutliche Entlastung der N-Bilanz für alle Qualitätsgruppen von 65,5 % bei E-Weizen (von 58 auf 20 kg N/ha) bis 74,4 % bei A-Weizen (von 39 auf 10 kg N/ha).

Tab. 2: Absolute und relative Änderungen verschiedener Qualitätsparameter bei einer Reduktion der N-Versorgung um 20 % von 230 auf 184 kg N/ha (A-Weizen) (Modellierung, Projekt N-DECREASE: 4 A-Sorten, 2 Standorte, 3 Jahre, 10 N-Stufen von 60 – 315 kg/ha)

	Bedarfswert (N-Düngung + Nmin)		Änderung	
Parameter	**230 kg N**	**184 kg N**	**Δ absolut**	**Δ relativ (%)**
Wasseraufnahme (%)	63	62	1	1,6
Verhältniszahl FK/RP	2,43	2,35	0,08	3,3
Fallzahl (s)	458	438	20	4,4
Dehnbarkeit (mm)	169	159	10	5,9
Volumenausbeute (ml/100 g)	659	617	42	6,4
GMP (%)	4,0	3,6	0,3	8,6
Rohproteingehalt (%)	14,8	13,5	1,4	9,1
Feuchtklebergehalt (%)	36,2	32,2	4,0	10,9
Sedimentationswert (ml)	57	50	7	12,3
Ertrag (dt/ha)	72	68	4	5,8
Proteinertrag (dt/ha)	9,1	7,9	1,2	13,2
N-Bilanz* (kg N)	39	10	29	74,4

*N-Flächenbilanz = N-Düngung – Korn-N

Wenn immer möglich sollte bei der Erfassung von Weizenpartien versucht werden, die im Feld produzierten Qualitäten zu erhalten. Ist eine sortenreine Erfassung und Lagerung nicht möglich, sollten Qualitätscluster angestrebt werden, die gezielt auf den Bedarf der Müller und Bäcker ausgerichtet sind. Dazu mangelt es jedoch weiterhin an einer alternativen Schnellmethode zur Qualitätsbestimmung und verlässlichen Informationen zur sachgerechten Zusammenlagerung unterschiedlicher Sorten. Dieser Ansatz wird zusätzlich durch die Vielzahl der angemeldeten Sorten und den schnellen Sortenwechsel beim Winterweizen erschwert. Trotzdem sollten mögliche Ansätze einer alternativen/zusätzlichen Bewertung für Backweizen innerhalb der Wertschöpfungskette abgestimmt und Möglichkeiten einer Umsetzung geprüft werden.

Ein vielversprechender Weg wird in dieser Hinsicht bereits erfolgreich mit dem Vertragsanbau einiger Mühlen wie der Hedwigsburger Okermühle oder der Dresdner Mühle beschritten. Dabei werden die Kriterien für den Anbau vorgegebener Sorten im Vorfeld mit allen beteiligten Marktpartnern abgestimmt, eine umweltverträgliche Erzeugung und ggf. besondere Produktqualität vereinbart und dem landwirtschaftlichen Betrieb eine Vermarktungssicherheit gewährt. Die Partien werden nach Sorte, Klebergehalt bzw. -qualität erfasst und entsprechend eigener Kenntnisse zur Kombinationseignung der Sorten gemischt.

Einen weiteren Ansatz vom Ende der Wertschöpfungskette her stellen Zusammenschlüsse kleinerer Bäckereien dar, welche die Notwendigkeit zur Nachhaltigkeit in der gesamten Wertschöpfungskette bereits erkannt und sich entsprechend organisiert haben. Die bayrische „Initiative Wasserschutzbrot“ wurde im Jahr 2020 mit dem Ziel etabliert, das Trinkwasser zu schützen und als gemeinsames Ziel landwirtschaftlicher Betriebe, Handwerksbäckereien und Wasserversorgungsunternehmen regionale Wirtschaftskreisläufe zu fördern (https://wasserschutzbrot.de). Dabei wird der angebaute „Wasserschutz-Weizen“ mit weniger N als sonst bei Backweizen üblich gedüngt. Die im Jahr 2011 gegründeten „Freien Bäcker e.V.“ sind ein Zusammenschluss von Bäckereien aus Deutschland, Österreich, Polen und Norditalien u.a. mit dem Ziel, in enger Zusammenarbeit mit der Landwirtschaft die Bodendegradierung und den Verlust der biologischen Vielfalt zu stoppen (https://www.die-freien-baecker.de). Auch Wasa/Barilla berücksichtigt die Auswirkungen der Lebensmittelproduktion auf die Umwelt. Dabei soll der ökologische Fußabdruck verbessert, aber trotzdem weiterhin auf hochwertige Produkte gesetzt werden.

Diese gemeinschaftlichen Ansätze zeigen, dass kein Akteur der Wertschöpfungskette allein in der Lage ist, eine nachhaltige Produktion von der Aussaat bis zum fertigen Backwerk zu gewährleisten. Alle Beteiligten der Backweizenwertschöpfungskette sollten sich kompromissbereit zeigen und aktiv an der Diskussion und der folgenden Umsetzung erforderlicher Änderungen beteiligen. Besonders wichtig ist es, die Gemeinschaft der Mühlen und der Bäcker für die ökologischen Konsequenzen ihrer Forderung nach weiterhin hohen RP für die natürlichen Ressourcen, insbesondere Boden und Gewässer, zu sensibilisieren und im Sinne der bereits bestehenden guten Ansätze mit ihnen gemeinsam nach einer allgemein anwendbaren Lösung zu suchen.

Selbst wenn eine Umstellung der Erfassung auf eine breitere Basis von Kriterien international derzeit schwierig zu realisieren sein dürfte, könnten damit die Forderung nach hohen RP zumindest im regionalen und nationalen Markt entkräftet und Weizenpartien mit niedrigerem RP aber hoher Backqualität der Weg in die Praxis eröffnet werden. Daher sollten die bereits laufenden Anstrengungen zur Definition der wesentlichen Qualitätskriterien und deren Nutzbarmachung verstärkt werden.

Forschungsbedarf

Im vorigen Kapitel wurde deutlich, dass insbesondere die derzeitige Bewertung von Backweizenpartien vorwiegend nach RP eine nachhaltige Backweizenproduktion erschwert. Ziel muss es daher sein, entlang der Wertschöpfungskette

ein Schnellverfahren zur Verfügung zu stellen, dass eine valide Ermittlung der Qualität von Partien hinsichtlich ihrer Backeignung, einschließlich der „neuen Genetik“, ermöglicht.

Weitere Impulse könnten auch neue Erkenntnisse zu den Grundlagen der technofunktionalen Eigenschaften der Weizenproteine liefern. Diese könnten einerseits den Züchtern neue Züchtungsansätze und Selektionsmöglichkeiten eröffnen, andererseits aber auch zu neuen oder zumindest ergänzenden Bewertungsparametern führen. Somit sollten in diese Richtung tendierende Untersuchungen intensiviert werden.

Um die regionale Vorzüglichkeit der Sorten beurteilen und im Anbau nutzen zu können, sind verlässliche Kenntnisse zur Umweltstabilität der erzielbaren Backqualitäten notwendig. Zusätzlich sind für alle Wirtschaftsbeteiligten zugängliche Kenntnisse über die mögliche Erhaltung oder sogar Steigerung der Backqualitäten bei Mischung unterschiedlicher Sorten erforderlich, um im Feld realisierte Qualitäten zu erhalten.

Schlussendlich sind die Bäcker gefragt, unter Einbeziehung der „neuen Genetik“ erneut die tatsächlich zwingend für die unterschiedlichen Backerzeugnisse erforderlichen Qualitätskriterien zu prüfen, damit der im Anbau notwendige Spielraum für eine Reduktion der N-Düngung, evtl. sogar den Verzicht auf die ökologisch fragwürdige Spätdüngung, geschaffen wird.

Schlussfolgerungen:

Derzeit erschwert insbesondere die Forderung nach hohen RP und die vorrangige Bewertung und Bezahlung von Weizenpartien nach RP eine nachhaltige Backweizenproduktion, da diese die Landwirte weiterhin dazu motiviert, den RP durch eine N-Spätgabe anzuheben, verbunden mit dem Risiko erhöhter N-Salden und unerwünschten N-Emissionen. Dies verhindert den Einzug von Sorten mit „neuer Genetik“ in die landwirtschaftliche Praxis, die aufgrund verbesserter Klebereigenschaften und damit guter Backeigenschaften bei reduziertem RP eine späte N-Gabe entbehrlich machen können. Zwingend erforderlich sind dafür alternative bzw. ergänzende Schnelltests der Backqualität, da der RP nicht bei allen Sorten eine enge Korrelation zur Backeignung aufweist. Hierzu könnten intensivierte Untersuchungen zur Ermittlung der Grundlagen der technofunktionalen Eigenschaften der Weizenproteine weiterhelfen.

Für den derzeitigen Backweizenanbau gewinnt dadurch die Auswahl regional angepasster, hinsichtlich der Backeignung möglichst umweltstabiler Sorten

immer mehr an Bedeutung. Die N-Düngung muss auf den Ertrag sowie die Protein- und Backqualität der jeweiligen Sorte am gegebenen Standort abgestimmt und dazu alle geeigneten pflanzenbaulichen Maßnahmen genutzt werden. Die generelle Eignung eines Standorts zur Backweizenerzeugung sollte aus dem Blickwinkel möglicher N-Emissionen und deren Folgen insbesondere für die Wasserwirtschaft überdacht werden.

Literatur

AGRAVIS (2018): Vortrag anlässlich eines Workshops zum Projekt N-DECREASE (Steigerung der Stickstoffdüngeeffizienz und Abbau der Stickstoffbilanzüberschüsse in der Backweizenerzeugung durch Nutzung neuer spezifischer Sorteneigenschaften), Braunschweig, 13. März 2018.

Alcoz, M.M., Hons, F.M., Haby, V.A. (1993): Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. Agron. J. 85, 1198–1203.

Ayoub, M., Guertin, S., Fregeau-Reid, J., Smith, D.L. (1994): Nitrogen fertilizer effect on breadmaking quality of hard red spring wheat in eastern Canada. Crop Sci. 34, 1346–1352.

Blandino, M., Vaccino, P., Reyneri, A. (2015): Late-season nitrogen increases improver common and durum wheat quality. Agron. J. 107, 680–690.

BMEL (2019): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2018. Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). – www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/EQB-1002000-2018.pdf, Zugriff: 04.10.2021.

BMEL (2021): Ackerbaustrategie 2035 – Perspektiven für einen produktiven und vielfältigen Pflanzenbau. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ackerbaustrategie2035.html;jsessionid=15765B4D07C560FD6E219F75B1784275.live842, Zugriff: 04.10.2021.

BLE (2021): Bericht zur Markt- und Versorgungslage – Getreide 2021. Hrg. BMEL, Bonn.

Boese, L. (2011): Optimale N-Düngung des Getreides auf Ertrag und Qualität – eine alte und immer wieder neue Herausforderung, Mitteilungen Agrarwissenschaften der Fördergesellschaft für Agrarwissenschaften e. V., Halle (Saale), 21, 38- 47.

Delcour, J.A., Joye, I.J., Pareyt, B., Wilderjans, E., Brijs, K., Lagrain, B. (2012): Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products. Ann. Rev. Food Sci. Technol. 3, 469–492.

Ercoli, L., Masoni, A., Pampana, S., Mariotti, M., Arduini, I. (2013): As durum wheat productivity is affected by nitrogen fertilisation management in Central Italy. Eur. J. Agron. 44, 38–45.

Fuertes-Mendizábal, T., Aizpurua, A., González-Moro, M.B., Estavillo, J.M. (2010). Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. Eur. J. Agron. 33, 52–61.

Gabriel, D., Pfitzner, C., Haase, N., Hüsken, A., Prüfer, H., Greef, J.-M., Rühl, G. (2017). New strategies for a reliable assessment of baking quality of wheat – rethinking the current indicator protein content. J. Cereal. Sci. 77, 126–134.

Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R.J., López-Bellido, L. (2004): Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. F. Crop. Res. 85, 213–236.

Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R.J., López-Bellido, L. (2005): Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. Eur. J. Agron. 23, 265–278.

Hamid, A. (1972): Efficiency of N uptake by wheat, as affected by time and rate of application, using N15-labelled ammonium sulphate and sodium nitrate. Plant Soil 37, 389–394.

Hüsken, A. (2020): Qualitätsweizenanbau in Deutschland: Zum Verhältnis des Rohprotein- und Feuchtklebergehaltes zur Volumenausbeute, Getreide, Mehl und Brot 2/2020, 57-58.

Jia, Y.Q., Fabre, J.L., Aussenac, T. (1996): Effects of growing location on response of protein polymerization to increased nitrogen fertilization for the common wheat cultivar Soissons: relationship with some aspects of the breadmaking quality. Cereal Chem. 73, 526–532.

Johansson, E., Svensson, G. (1998): Variation in bread-making quality: effects of weather parameters on protein concentration and quality in some Swedish wheat cultivars grown during the period 1975–1996. J. Sci. Food Agric. 78, 109–118.

Kämpfer, T.; Gabriel, D.; Rühl, G.; Greef, J.-M. (2021): Alternative Parameter zur Bewertung der Backweizenqualität – Ergebnisse aus dem Projekt N-DE-

CREASE –. : 63. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V.: CLOSING THE CYCLE: Pflanze und Tier im Agrarsystem; 28. bis 30. September 2021; Universität Rostock : Kurzfassungen der Vorträge und Poster (Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 32), 235-236.

Koppel, R., Ingver, A (2010): Stability and predictability of baking quality of winter wheat. Agron. Res. 8, 637–644.

Linnemann, L.; Leithold, G., Rauber, R. (2002): Kleberqualität als Bewertungskriterium der Backqualität von Weizen – Neue Erkenntnisse zu einem alten Thema. Getreide Mehl und Brot, 56 (3), S. 147-154 (http://orgprints.org/18838/, verifiziert am 27.09.2021).

López-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J.E., López-Garrido, F.J. (1998): Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions. F. Crop. Res. 57, 265–276.

Obenauf, U. (2009): Qualität neu bewerten. DLG-Mitteilungen 6/2009, 22-24.

Osman, A.M., Struik, P.C., Lammerts van Bueren, E.T. (2012): Perspectives to breed for improved baking quality wheat varieties adapted to organic growing conditions. J. Sci. Food Agric. 92, 207–215.

Pomeranz, Y. (1965): Dispersibility of wheat proteins in aqueous urea solutions – a new parameter to evaluate bread-making potentialities of wheat flours. J. Sci. Food Agric. 16, 586–593.

Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Cohan, J.-P., Meynard, J.-M. (2018): Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. Nutr Cycl Agroecosys 110, 117–134. https://doi.org/gcvw7p.

Rossmann, A., Buchner, P., Savill, G.P., Hawkerford M.J., Scherf, K.A., Mühling, K.H. (2018). Foliar N application at anthesis alters grain protein composition and enhances baking quality in winter wheat only under a low N fertilizer regimen. Europ. J. of Agronomy 109, 125909, https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.004.

Rossmann, A., Scherf, K.A., Rühl, G., Greef, J.M., Mühling, K.H. (2020). Effects of a late N fertiliser dose on storage protein composition and bread volume of two wheat varieties differing in quality. J Cereal Sci 93, 102944. https://doi.org/gjh8nr

Schulz, R., Makary, T., Hubert, S., Hartung, K., Gruber, S., Donath, S., Döhler, J., Weiss, K., Ehrhart, E., Claupein, W., Piepho, H.-P., Pekrun, C., Müller,

T. (2015): Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany. J. Agric. Sci. 153, 575–587.

Seling, S. (2010): Die Bedeutung des Proteingehaltes für Backweizen aus Sicht der Wissenschaft. Getreidetechnologie 64, 103-110.

Shewry, P.R., Halford, N.G. (2002): Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. J. Exp. Bot. 53, 947–958.

Thanhaeuser, S.M., Wieser, H., Koehler, P., 2014. Correlation of quality parameters with the baking performance of wheat flours. Cereal Chem. 91, 333-341.

Veraverbeke, W.S., Delcour, J.A. (2002): Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 3, 179–208.

Weegels, P.L., Hamer, R.J., Schofield, J.D. (1996): Functional properties of wheat glutenin. J. Cereal Sci. 23, 1–18.

Wieser, H., Seilmeier, W. (1998): The influence of nitrogen fertilisation on quantities and proportions of different protein types in wheat flour. J. Sci. Food Agric. 76, 49–55.

Xue, C., Schulte auf'm Erley, G., Rossmann, A., Schuster, R., Koehler, P. Mühling, K.-H. (2016). Split Nitrogen Application Improves Wheat Baking Quality by Influencing Protein Composition Rather Than Concentration. Frontiers in Plant Science 7, https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00738

Zörb, C., Grover, C., Steinfurth, D., Mühling, K.H. (2010): Quantitative proteome analysis of wheat gluten as influenced by N and S nutrition. Plant Soil 327, 225–234.

Potential von Nitrifikations- und Ureasehemmstoffen zur Minderung gasförmiger N-Verluste aus landwirtschaftlich genutzten Böden

Dr. Reiner Ruser, Universität Hohenheim

Mechanismus der Lachgasreduktion und Minderungspotential von Nitrifikationsinhibitoren

Nitrifikationsinhibitoren (NIs) werden schon seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts zur Reduktion der Nitratauswaschung auf leichten Böden eingesetzt. Der Einsatz von NIs wird derzeit auch als Maßnahme zur Minderung der Lachgasfreisetzung diskutiert. Das klimarelevante Spurengas Lachgas (N_2O) trägt zu 7,9 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei (Rogner et al., 2007). Die N-Düngung stellt die Substrate für die N_2O-bildenden Prozesse in landwirtschaftlich genutzten Böden die über die Hälfte der anthropogenen N_2O-Emissionen ausmachen (IPCC, 2013). Zudem ist N_2O am stratosphärischen Ozonabbau beteiligt (Crutzen, 1981). Die beiden maßgeblichen Prozesse der N_2O-Bildung in Böden sind die Nitrifikation unter aeroben Bedingungen sowie die mikrobielle Denitrifikation bei niedriger Sauerstoffverfügbarkeit (Bremner, 1997).

Kommerzielle NIs hemmen das erste Enzym der Nitrifikation, die Ammoniakmonooxygenase (AMO) und unterbinden so die N_2O-Produktion während der Hydroxylaminoxidation. Da Nitrat als Endprodukt der Nitrifikation auch gleichzeitig das Edukt für die Denitrifikation darstellt, wirken NIs auch indirekt mindernd auf die N_2O-Bildung während der Denitrifikation. In Deutschland sind mehrere NIs zugelassen, allerdings sind derzeit lediglich die drei folgenden Wirkstoffe am Markt: 3,4-Dimethylpyrazolphophat (DMPP), N-((3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl) methyl)acetamid (MPA) sowie 2-Chloro-6-(trichloromethyl)pyridin (Nitrapyrin). Sowohl für die beiden Pyrazolverbindungen wie auch für Nitrapyrin basiert die Hemmung der AMO überwiegend auf der Chelatisierung der Kupfer-Cofaktoren im aktiven Zentrum des Enzyms (Subbarao et al., 2006; Corrochano-Monsalve et al., 2020).

In einer Meta-Analyse ermittelten Akiyama et al. (2010) ein N_2O-Minderungspotential von 35 % über alle in die Studie einbezogenen NIs. Dabei standen 85 Datensätze aus weltweiten Untersuchungen zur Verfügung. Zum selben Er-

gebnis kamen Ruser und Schulz (2015), die den Datensatz von Akiyama et al. (2010) um 55 weitere Studien ergänzten (Abbildung 1). Dieses Minderungspotential ist als sehr hoch zu bewerten. In beiden Studien wurden die N_2O-Hintergrundemissionen einer ungedüngten Behandlung nicht berücksichtigt.

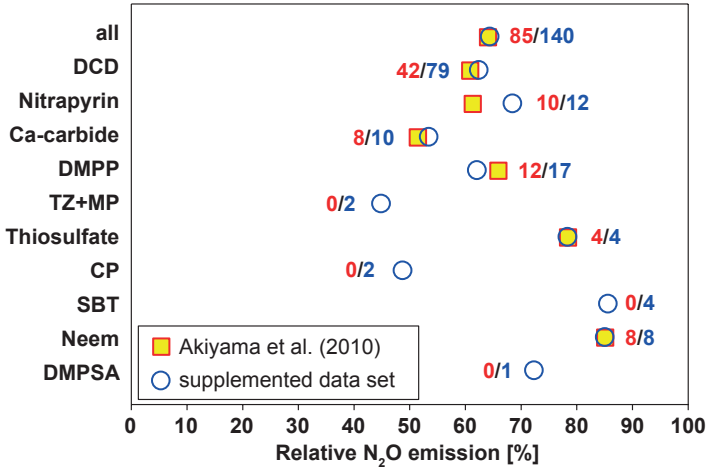


Abb. 1: Ungewichtete mittlere N_2O-Emission aus Böden mit NI Applikation relativ zur N_2O-Emission einer Kontrollvariante ohne NI. Gelbe Symbole symbolisieren die Daten aus Akiyama et al. (2010), blaue Kreise die von Ruser und Schulz (2015) ergänzten Daten. Zahlen geben die Anzahl an Untersuchungen wieder. DCD = Dicyandiamide, DMPP = 3,4-Dimethylpyrazolphosphate, TZ+MP = 1H-1,2,4-Triazol and 3-Methylpyrazol, CP = Nitrapyrin, SBT = S-Benzylisothiouronium, DMPSA = Dimethylpyrazolsuccinat.

Die Wirkung der einzelnen NIs schwankte sehr stark was auf die unterschiedlichen Versuchsstandorte und Witterungsbedingungen sowie auf unterschiedliche physikochemische Eigenschaften der Hemmstoffe zurückgeführt wurde. Ein weiterer Grund für die große Streuung der Hemmwirkung einzelner NIs dürfte zudem die unterschiedlich lange Messdauer der einzelnen Untersuchungen sein. Diese schwankte zwischen 60 und 365 Tagen. Unterschiede in der N_2O-Freisetzung zwischen einer Behandlung mit bzw. ohne NI sind direkt im Anschluss an die N-Düngung am größten. Im Jahresverlauf werden sie geringer, weil zusätzliche Ereignisse, wie beispielsweise Starkregen oder Tau im Winter vom Hemmstoff weitgehend unbeeinflusst sind. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen, sollte die Klimawirkung von NIs deshalb künftig möglichst einheitlich, auf Basis ganzjähriger Messungen, bewertet werden.

Mechanismus der Ammoniakreduktion und Minderungspotential von Ureasehemmstoffen

Die Harnstoffhydrolyse führt partiell zu einer starken Alkalisierung des Bodens in der direkten Umgebung der Düngergranulien wobei der pH-Wert um bis zu 3 pH-Einheiten ansteigen kann (Sen und Chalk, 1993). Gleichzeitig wird bei der Hydrolyse Ammonium (NH_4^+) freigesetzt. Aufgrund des hohen pH-Werts verschiebt sich das NH_4^+/Ammoniak (NH_3)-Gleichgewicht in Richtung NH_3, sodass dabei sehr hohe NH_3-Emissionen auftreten können.

95 % der NH_3-Emissionen in Deutschland stammen aus der Landwirtschaft, etwa 15 % stammen aus der Anwendung von mineralischen N-Düngern, dort vor allem aus der Ausbringung von Harnstoff (NIR, 2019). Ammoniak trägt zur Eutrophierung und Versauerung naturnaher Ökosysteme und Aquifere bei (EEA, 2013). Neben der humantoxischen Wirkung bei hohen NH_3-Konzentrationen ist NH_3 zudem eine Vorstufe von alveolengängigen, sekundären Aerosolen die zu einer Beeinträchtigung des Atmungstrakts führen können (Pozzer et al., 2017). Über den Eintrag in naturnahe Ökosysteme bewirkt NH_3 eine Düngung die somit zusätzliche N_2O-Emissionen induzieren. Aus diesem Grund wird NH_3 auch zu den indirekt klimawirksamen Spurengasen gerechnet.

Die Inhibierung der Harnstoffhydrolyse in Böden wurde bereits in den 1970er Jahre beschrieben (z.B. Bremner und Douglas, 1971; Fernando und Roberts, 1976). Zur Reduktion der NH_3-Emissionen wird in der aktuellen Fassung der Düngeverordnung (DüV, 2017) geregelt, dass Harnstoffdünger bei oberflächiger Applikation ohne unmittelbare Einarbeitung nur noch mit einem Ureaseinhibitor (UI) versetzt ausgebracht werden dürfen. Derzeit sind die folgenden drei Hemmstoffe am deutschen Markt: N-(2-Nitrophenyl)phosphorsäuretriamid (2-NPT), N-Butylthiophosphortriamid (NBPT) und N-Propylthiophosphortriamid (NPPT).

Die Enzymhemmung erfolgt über die Chelatisierung der Nickel-Kofaktoren in den aktiven Zentren der Urease (Domínguez et al., 2008). Während die Harnstoffhydrolyse ohne UI unmittelbar bei Bodenkontakt des Düngers beginnt, wird sie bei Anwendung von UIs um ca. eine Woche verzögert (Abbildung 2). In diesem Zeitfenster kann der Harnstoff in ein größeres Bodenvolumen eindiffundieren bzw. direkt von den Pflanzen aufgenommen werden. Ersteres bewirkt, dass eine größere Kontaktfläche von Harnstoff und Boden ein größeres Puffervolumen aufbaut, sodass der Anstieg des pH-Werts deutlich geringer ist, als bei alleiniger Harnstoffausbringung. Dies vergrößert auch den Kontakt mit Bodenaustauschern, sodass die NH_4^+-Konzentration in der Bodenlösung ebenso wie bei der Aufnahme von Harnstoff durch die Pflanzen, geringer wird. Die Kombination

beider Faktoren (niedrigerer pH-Wert und geringere NH_4^+-Konzentration in der Bodenlösung) führt zu deutlich niedrigeren NH_3-Emissionen.

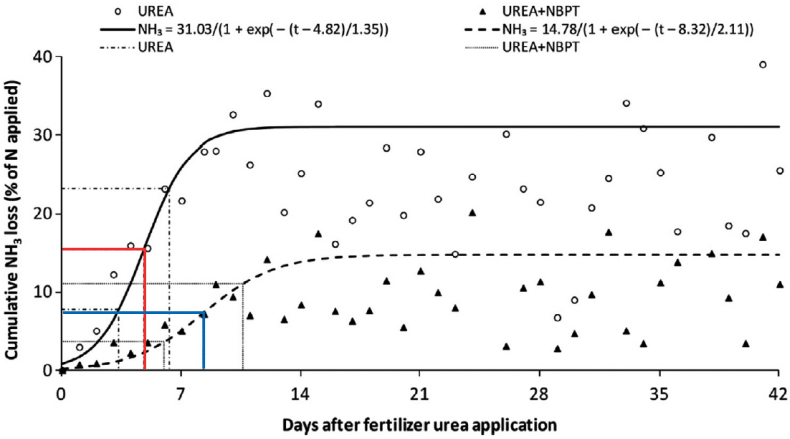


Abb. 2: Kumulative NH_3-Emission nach Applikation von Harnstoff und Harnstoff mit NBPT. Die roten Linien (Harnstoff) und blauen Linien (Harnstoff+NBPT) geben jeweils die halbmaximalen NH_3-Verluste wieder. Aus Silva et al. (2017)

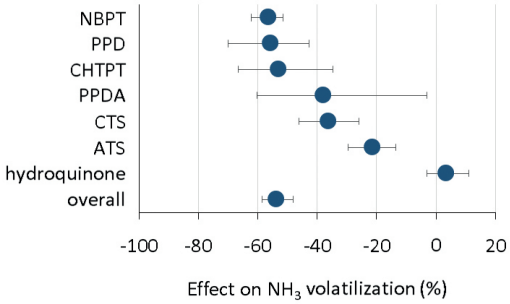


Abb. 3: Einfluss von UIs auf die NH_3-Freisetzung nach Harnstoffdüngung (Mittelwerte und 95 % Konfidenzinterval. Zahlen in Klammern geben die Anzahl an Untersuchungen wieder). Aus Pan et al. (2016)

In einer Metastudie mit weltweiten Untersuchungen berechneten Pan et al. (2016) einen NH_3-N-Verlust von 17,6 % bezogen auf die applizierte N-Menge über Harnstoff. Bei Anwendung von NBPT konnte die NH_3-Emission um ca. 55 % reduziert werden. Da es sich bei 2-NPT und NPPT um Strukturanaloga zu NBPT handelt, dürfte deren NH_3-Minderungspotential in derselben Größenordnung liegen.

Wechselwirkungen bei doppelt inhibierten Harnstoffdüngern

Neuerdings sind auch doppelt inhibierte Harnstoffprodukte auf dem deutschen Markt. Wie in Abbildung 4 zu sehen, konnte die N_2O-Emission aus einer Silomaisfläche durch den Einsatz eines Ammoniumsulfat-Harnstoffdüngers mit UI gegenüber dem Ammoniumsulfat-Harnstoff ohne UI über einen Messzeitraum von 180 Tagen um 15 % reduziert werden. Diese niedrigere N_2O-Freisetzung dürfte vor allem auf die verzögerte Harnstoffhydrolyse und damit auf ein geringeres Nmin-Angebot direkt nach Applikation zurückzuführen sein. Etwa 1 Woche nach der ersten N-Applikation waren die N_2O-Flussraten nach Starkregen bei der Behandlung ohne UI deutlich höher als bei den beiden Behandlungen mit Hemmstoffen (nicht dargestellt). Der Zusatz eines NIs führte zu einer weiteren N_2O-Minderung, sie war um 28 % geringer als in der Variante mit Ammoniumsulfat-Harnstoff ohne Hemmstoff. Die Fortführung dieser Untersuchungen wird zeigen, ob diese Unterschiede auch auf Basis ganzjähriger Messungen statistisch abgesichert werden können.

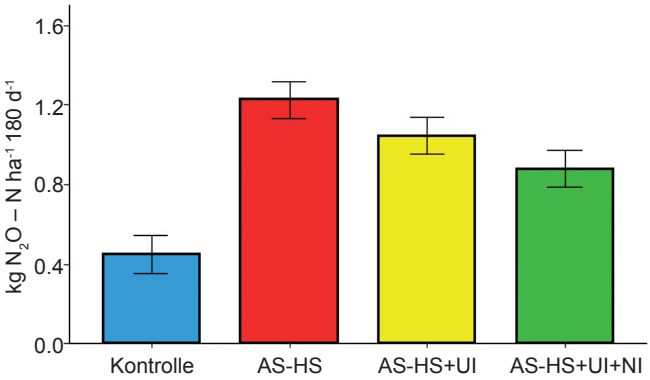


Abb. 4: Einfluss der N-Düngung von Ammoniumsulfat-Harnstoff (AS-HS), AS-HS mit UI sowie AS-HS mit UI und NI auf die kumulativen N_2O-Emissionen während der Vegetationsperiode (180 Tage) von Mais. (Klein, unveröffentlicht).

Doppelt inhibierte Harnstoffdünger können, im Vergleich zu mit UIs einfach inhibierten Düngern, die NH_3-Emissionen erhöhen (Soares et al., 2012; Abbildung 5). Grund dafür ist die Stabilisierung des NH_4^+-Pools. Während bei einfach (mit UI) inhibierten Düngern das aus dem Harnstoff freigesetzte NH_4^+ i.d.R. rasch nitrifiziert wird und somit (1) nicht mehr dem NH_4^+/NH_3-Gleichgewicht zur Verfügung steht und (2) gleichzeitig mit der NH_4^+-Oxidation eine pH-Wertabsenkung stattfindet, können die NH_3-Emissionen bei doppelter Inhibierung aufgrund eines höheren NH_4^+-Angebots sowie des höheren pH-Werts deutlich erhöht sein.

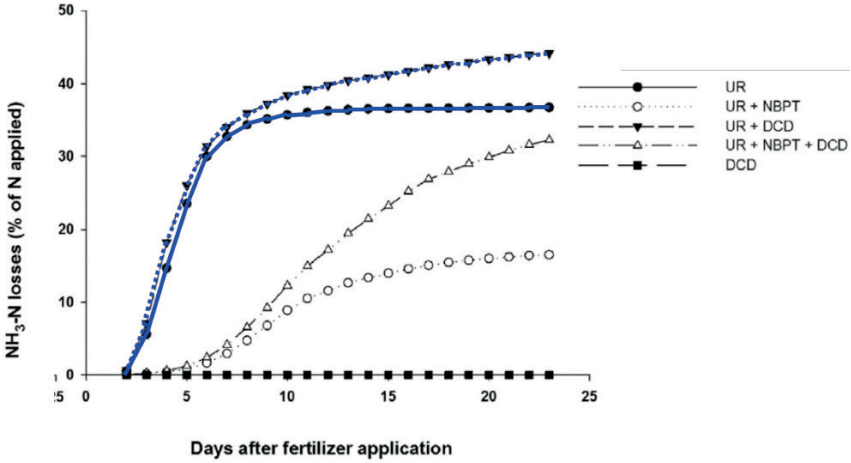


Abb. 5: Kumulative NH_3-Freisetzung nach oberflächiger Harnstoffapplikation mit und ohne UI (NBPT) sowie NI (DCD) (aus Soares et al., 2012).

Mögliche Ursachen für eine geringe NI-Wirkung

UIs wirken aufgrund der Tatsache, dass sie 1) direkt auf die Harnstoffgranulien aufgetragen sind und 2) die Harnstoffhydrolyse (und somit auch die NH_3-Emissionen) i.d.R. innerhalb von ca. drei Wochen vollständig abgelaufen ist, sehr zuverlässig. Im Gegensatz dazu treten N_2O-Emissionen ganzjährig auf und stark erhöhte Emissionen können beispielsweise ebenso nach Tau von gefrorenem Boden außerhalb der Vegetationsperiode auftreten (Flessa et al., 1995). Kesenheimer et al. (2021) untersuchten die N_2O-Freisetzung aus Winterraps nach Gärrestausbringung in Abhängigkeit eines NIs an fünf Standorten und in jeweils drei Versuchsjahren. Der Einsatz eines NIs reduzierte die N_2O-Emissionen während der Vegetationsperiode gegenüber der Variante ohne NI bei insgesamt sechs Datensätzen signifikant. Allerdings traten nach der Rapsernte aufgrund der hohen Rest-Nmin-Mengen hohe Nachernteemissionen auf, die den statistisch signifikanten Effekt des NIs an vier Standorten kompensierte, sodass der NI alleine an diesen Einzeldaten keine N_2O-Minderung auf Jahresbasis erbrachte.

Ein wesentlicher Punkt für eine geringe NI-Wirkung ist die räumliche Trennung (Entmischung) von Hemmstoff und Substrat. Linzmeier (2010) bestimmte die N_2O-Freisetzung nach Ausbringung von Ammonsulfatsalpeter mit DMPP jeweils flüssig bzw. granuliert. Über die ersten 6 Wochen nach der Düngung waren die N_2O-Flussraten aus der flüssig applizierten Behandlung gegenüber der Behand-

lung mit festem Granulat um bis zu 5-fach erhöht. Er führte dies vor allem auf eine räumliche Entmischung während der Ausbringung zurück. Dies konnte auch durch die Arbeit von Azam et al. (2001) bestätigt werden, die gegenüber dem Wirkstoff DMPP eine schnellere Diffusion von NH_4^+ in einem Boden mit schluffiger Textur nachwiesen.

Die Untersuchungen von Parkin und Hatfield (2010) sind ein Beispiel für die zeitliche Entmischung von Substrat und Hemmstoff. Sie brachten im Herbst wasserfreien NH_3 mit und ohne Nitrapyrin als NI aus. Der NI reduzierte zunächst die N_2O-Emissionen im Herbst. Im Frühjahr waren die NH_4^+-Konzentrationen der +NI-Behandlung größer und der Hemmstoff abgebaut. Damit standen in der Behandlung +NI nach Nitrifikation höhere NO_3^--Mengen für die Denitrifikation zur Verfügung was zu höheren N_2O-Emissionen als in der Behandlung -NI führte. Insgesamt unterschieden sich die annuellen N_2O-Emissionen der beiden Behandlungen nicht.

Weiterer Forschungsbedarf

Die Hemmwirkung, vor allem von NIs, hängt stark von Wirkstoff- und Standortseigenschaften ab. Deshalb sollte ihre Bewertung sowohl Wirkstoff- als auch standortsspezifisch, auf Basis ganzjähriger N_2O-Datensätze erfolgen. Die Bewertung der Treibhausgaswirkung von NIs muss zudem unter Berücksichtigung weiterer umweltrelevanter N-Verluste (v.a. Nitrat) und von N-Effizienzaspekten erfolgen und somit gesamtsystemar durchgeführt werden. So kann beispielsweise die Anzahl an Düngergaben bei Anwendung von Düngern mit NI reduziert werden. Durch eine Erhöhung der N-Effizienz muss u.a. die Einsparung von Emissionen bei der N-Düngerherstellung und -distribution mitberücksichtigt werden.

Weiterhin fehlen derzeit noch verlässliche Untersuchungen zum Austrag von Hemmstoffen in Aquifere (Austrag ins Grund-/Trinkwasser von Wirkstoffen und Metaboliten) sowie deren ökotoxikologische Wirkungen. Erste Untersuchungen hierzu bezogen sich auf 1,2,4-Triazol welches jedoch keine Verwendung mehr als NI findet.

Zusammenfassung

NIs haben ein vergleichsweise hohes Potential zur Minderung der N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden von ca. 35 %.

Entmischung (sowohl räumlich als auch zeitlich) oder zusätzliche N_2O-Hotspots können das N_2O-Reduktionspotential von NIs mindern oder auf ganzjähriger Basis zunichtemachen.

UIs verringern die NH_3-Emissionen nach Harnstoffapplikation um ca. 55 %.

Doppelt inhibierte N-Dünger vermindern die N_2O-Emission können aber gleichzeitig die NH_3-Freisetzung im Vergleich zu einfach inhibierten Düngern (nur UI) erhöhen.

Weitere Untersuchungen zum Umweltverhalten und zur Toxikologie der Hemmstoffe in Böden scheinen sinnvoll!

Literatur

Akiyama H., Yan X., Yagi K. (2010): Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N_2O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. Glob. Change Biol. 16, 1837–1846

Azam F., Benckiser G., Müller C., Ottow J. C. G. (2001) Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions. Biol. Fertil. Soils 34, 118-125

Bremner J.M., Douglas L.A. (1971) Inhibition of urease activity in soils. Soil Biol. Biochem. 3, 297-307

Bremner J.M. (1997) Sources of nitrous oxide in soils. Nutr. Cycl. Agroecosys. 49, 7–16

Corrochano-Monsalve M., González-Murua C., Bozal-Leorri A., Lezama L., Artetxe B. (2021) Mechanism of action of nitrification inhibitors based on dimethylpyrazole: A matter of chelation. Sci. The Total Environ. 752, 141885

Crutzen P.J., (1981) Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen including nitrous oxide. In: Delwiche, C.C. (Ed.), Denitrification, Nitrification and Atmospheric N_2O. Wiley, Chichester, pp. 17–44

Domínguez M.J., Sammartín C., Font M., Palop J.A., San Francisco S, Urrutia O., Houdusse F., Carcía-Mina J.M. (2008) Design, synthesis, and biological evaluation of phosphoramide derivates as urease inhibitors. J. Agric. Food Chem. 56, 3721-3731

DüV (2017) Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 (BGBl. I S. 1305)

EEA (2013) Environmental pressures from European consumption and production – A study in integrated environmental and economic analysis. European Environment Agency, technical report 2/13. Copenhagen, Denmark.

Fernando V., Roberts G.R. (1976) The partial inhibition of soil urease by naturally occurring polyphenols. Plant Soil 44, 81-86

Flessa H., Dörsch P., Beese F. (1995) Seasonal variation of N_2O and CH_4 fluxes in differently managed arable soils in southern Germany. J. Geophys. Res. 100, 115–124.

IPCC (2013) Summary for policymakers. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY USA, pp. 1–27.

Kesenheimer K., Augustin J., Hegewald H., Köbke S., Dittert K., Räbiger T., Suárez Quiñones T., Prochnow A., Hartung J., Fuss R., Stichnothe H., Flessa H., Ruser R. (2021) Nitrification inhibitors reduce N_2O emissions induced by application of biogas digestate to oilseed rape. Nutr. Cycl. Agroecosys. 120, 99-118

Linzmeier W. (2010) Verwertungseffizienz und gasförmige N-Verluste von 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP)-stabilisiertem Ammoniumdünger. Dissertation TU-München.

NIR (2019) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017. Climate Change 23/2019. Umweltbundesamt, Dessau

Pan B., Lama S.K., Mosier A., Luob Y., Chen D. (2016) Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. Agric. Ecosys. Environ. 232, 283-289

Parkin T.B., Hatfield J.L. (2010) Influence of nitrapyrin on N_2O losses from soil receiving fall-applied anhydrous ammonia. Agric. Ecosys. Environ. 136, 81-86

Pozzer A., Tsimpidi A.P., Karydis V.A., de Meij A., Lelieveld J. (2017) Impact of agricultural emission reductions on fine-particulate matter and public health. Atmos. Chem. Phys. 17, 12813-12826

Rogner H.-H., Zhou D., Bradley R., Crabbé P., Edenhofer O., Hare B., Kuijpers L., Yamaguchi M. (2007) Introduction. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ruser R., Schulz R. (2015) The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N_2O) release from agricultural soils–a review. J. Plant Nutr. Soil Sci. 178:171–188

Sen S., Chalk P.M. (1993) Chemical interactions between soil N and alkaline-hydrolysing N fertilizers. Fert. Res. 36, 239-248

Silva A.G.B., Sequeira C.H., Sermarini R.A., Otto R. (2017) Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis. Agron. J. 109, 1-13

Soares J, Cantarella H., Menegale M. (2012). Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. Soil Biol. Biochem. 52. 82–89.

Subbarao G. V., Ito O., Sahrawat K. L., Berry W. L., Nakahara K., Ishikawa T., Watanabe T., Suenaga K., Rondon M., Rao I.M. (2006) Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—challenges and opportunities. Crit. Rev. Plant Sci. 25, 303–335

Klimaschutz durch Humusaufbau: Möglichkeiten und Grenzen

PD Dr. Axel Don und Prof. Dr. Heinz Flessa, Thünen-Institut, Braunschweig

Vier Voraussetzungen für Zertifikate

Auf den ersten Blick sind freiwillige CO_2-Zertifikate für den Humusaufbau ein lukrativer Ansatz, um die Klimaschutzleistung der Landwirte zu honorieren. Beim zweiten Blick sind Axel Don und Heinz Flessa schon skeptischer. Denn die Bedingungen dafür sind schwerer zu erfüllen als gedacht. Nicht alle Zertifikate tragen zum Klimaschutz bei.

Es ist auf den ersten Blick eine richtig gute Idee: Landwirte bekommen »nebenbei« auch vergütet, was sie mit Humusaufbau für den Klimaschutz leisten. Firmen zertifizieren die Bindung von CO_2-Kohlenstoff durch Humusaufbau und verkaufen die Zertifikate an weitere Unternehmen, die damit ihre Produkte und Dienstleistungen werbewirksam als »klimafreundlich « oder sogar »klimaneutral« anbieten können. Über die freiwillige CO_2-Kompensation werden bereits jetzt unterschiedlichste Klimaschutzprojekte angeboten: Aufforstungen, Moorrenaturierung oder die Förderung emissionsarmer Technologien. Für die Anerkennung solcher Projekte am freiwilligen Markt gibt es international anerkannte klare Kriterien: Nachweis, Dauerhaftigkeit, Zusätzlichkeit und keine Verlagerungseffekte. Bewertet man vor diesem Hintergrund die CO_2-Zertifikate für Humusaufbau (auch Humuszertifikate genannt) in der Landwirtschaft, dann wird die »gute Idee« doch arg gerupft.

Foto: Indigo

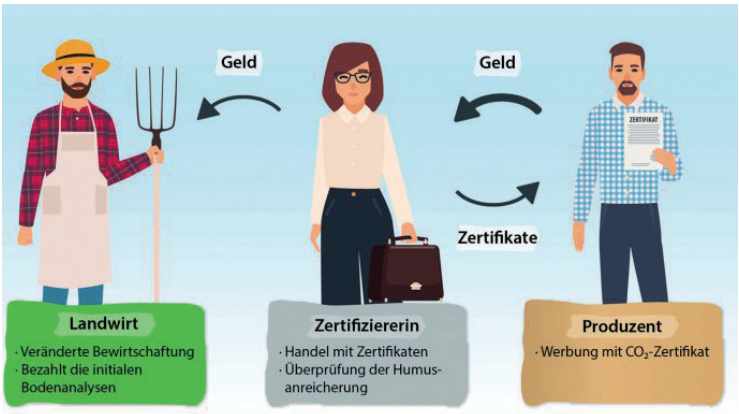
Abb. 1: Humus als neue Einkommensquelle beflügelt die Phantasie vieler Landwirte

1. Der Ausgangszustand und die erreichte Reduzierung von Treibhausgasemissionen oder Bindung von CO_2-Kohlenstoff sind mit Bodenuntersuchungen nachzuweisen.

Dies ist eine arbeitsaufwendige Herausforderung: Die Böden und ihre Humusgehalte sind sehr variabel. Maßnahmen zum Humusaufbau wirken abhängig von Standort- und Bodeneigenschaften unterschiedlich. Man muss also viele Bodenproben nehmen und analysieren, um sowohl den Ausgangszustand des Humusvorrats als auch den erreichten Humusaufbau nachzuweisen. Zudem verändern sich Humusvorräte langsam. Dies sei an ein paar Zahlen verdeutlicht. Im Durchschnitt sind in den Oberböden (0 – 30 cm Tiefe) deutscher Äcker 61 t Kohlenstoff gespeichert. Durch humusmehrende Fruchtfolgen mit mehrjährigen Kulturen können bei guten Bedingungen rund 0,3 t Kohlenstoff jährlich zusätzlich gespeichert werden. Dadurch hätte man nach zehn Jahren 3 t mehr Bodenkohlenstoff in Form von Humus. Bei der üblichen Nachweisunsicherheit von Humusänderungen (5 bis 10 %) käme man nach zehn Jahren erstmals in einen Bereich, in dem Änderungen nachweisbar wären.

Für die Ermittlung der Humusvorräte ist es außerdem nötig, neben den Humusgehalten auch den Steingehalt und die Lagerungsdichte des Bodens zu bestimmen. Oft muss zumindest die erste Humusbestandsaufnahme für ein CO_2-Zertifikat vollständig vom Landwirt bezahlt werden. CO_2-Zertifikate rentieren sich also erst einmal für die Bodenlabore, die die Messungen durchführen. Das Risiko, dass es zu keinem nachweisbaren Humusaufbau und damit zu keinem Erlös aus CO_2-Zertifikaten kommt, liegt beim Landwirt.

Berechnen statt messen? Eine kostengünstigere Möglichkeit ist der Nachweis mit Bodenkohlenstoffmodellen. Solche Modelle müssen ausreichend getestet und validiert sein und führen trotzdem im Vergleich zu direkten Messungen zu höheren Unsicherheiten im Humusnachweis. Gründe dafür sind erstens unsichere Informationen zum Humusausgangsvorrat und die Frage, ob sich dieser bereits im Gleichgewicht befindet und zweitens unsichere Annahmen zum Eintrag von organischem Kohlenstoff in den Boden, besonders über Wurzeln und Wurzelexudate.



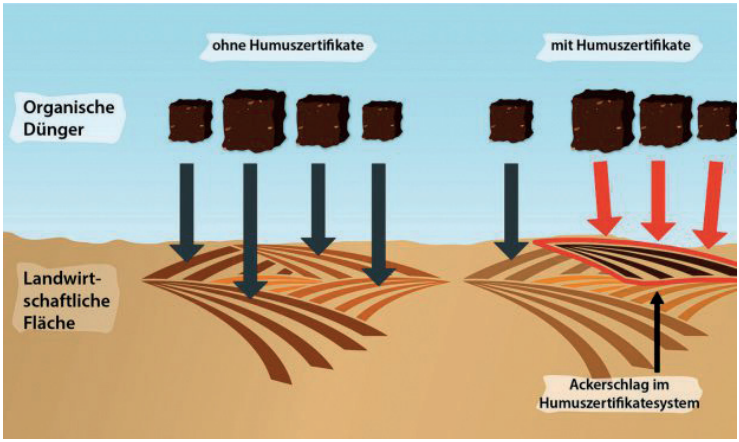
Darstellung: Thünen-Institut, Zech, modifiziert

Abb.2: Humusaufbau, Zertifikat, Einkommen – so läuft das Verfahren im Idealfall.

2. Die Emissionseinsparung oder Bindung von CO_2-Kohlenstoff muss dauerhaft sein.

Nur Humus, der dauerhaft zusätzlich im Boden gespeichert ist, kann als Klimaschutzleistung angerechnet werden. Wenn eine Maßnahme zum Humusaufbau beendet wird, geht der aufgebaute Humus auch wieder verloren und damit

die komplette Klimaschutzwirkung. Muss der Landwirt bei späterem Rückgang der Humusvorräte die erhaltenen Zahlungen wieder zurückzahlen? Wie können Klimaschutzprojekte sicherstellen, dass die in Rechnung gestellte Klimaschutzleistung wirklich dauerhaft (auch über zehn Jahre hinaus) erhalten bleibt? Die Umkehrbarkeit der Humusanreicherung stellt die Eignung von Humusaufbau zur CO_2-Kompensation generell infrage. Langfristig etablierte Maßnahmen wie die Anlage neuer Hecken oder zusätzlicher Gewässerrandstreifen sind viel besser als der Ackerbau geeignet, die Dauerhaftigkeit von Humusaufbau sicherzustellen.



Darstellung: Thünen-Institut, Zech

Abb. 3: Zertifikate können zur Umverteilung von organischen Düngern und damit von Humus führen, ohne über alle Böden hinweg zum Humusaufbau beizutragen.

Ein weiterer Umstand macht es schwer, den zusätzlichen Humus sicher im Boden zu halten: die Klimaerwärmung. Humus wird im Boden durch die Mikroorganismen abgebaut, und die sind besonders aktiv, wenn es warm ist. Nur zusätzliche Kohlenstoffspeicherung in stabiler Pflanzenkohle verhält sich anders. Deren Abbaubarkeit ist auch bei erhöhten Temperaturen sehr gering und auch weitgehend unbeeinflusst von der Bodenbewirtschaftung. Doch Pflanzenkohle ist derzeit noch sehr viel teurer als der Erlös durch Humuszertifikate und offene Fragen zu Schadstoffgehalten, geeigneten Substraten, ihrer ökologischen Gesamtbewertung sowie den rechtlichen Rahmenbedingungen für ihre Anwendung sind zu klären.

3. Die Vermeidung oder Kompensation von Emissionen muss zusätzlich sein und ist ohne die finanzielle Förderung durch das CO_2-Zertifikat nicht zu erzielen.

Ein nachhaltiges Humusmanagement und die gezielte Förderung der Humusreproduktion sind essentielle Bestandteile der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung und eine Voraussetzung für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. Ob im Rahmen der Humuszertifizierung Maßnahmen ergriffen werden, die jenseits der üblichen Humuswirtschaft zum Humusaufbau führen und damit das Kriterium der Zusätzlichkeit erfüllen, muss im Einzelfall geprüft werden. Das Kriterium gibt weiterhin vor, dass die zusätzlichen Einkünfte aus dem CO_2-Zertifikatehandel eine Voraussetzung für den erzielten Humusaufbau sein müssen. Die Maßnahmen müssen daher auch jenseits bestehender humuswirksamer Agrarförderprogramme gesetzt sein.

Im ökologischen Landbau werden z. B. im Mittel höhere Humusgehalte erreicht als im Durchschnitt der konventionell wirtschaftenden Landwirtschaft. Diese erhöhten Humusvorräte tragen zum Klimaschutz bei, dennoch erfüllen sie das Kriterium für Humuszertifikate nicht. Denn sie gelten als »systembedingt üblich«. Außerdem wird der ökologischen Landbau bereits gefördert und ohne Zusatzeinkünfte aus dem Zertifikatehandel realisiert.

Das Beispiel Öko-Landbau zeigt: Eine klare Trennung zwischen »üblichem« und »zusätzlichem« Humus ist schwierig und schränkt die Maßnahmen für die Ausweisung von Humuszertifikaten stark ein. Es offenbart aber auch ein generelles Problem: Einige Landwirte haben sich der Aufgabe Humusaufbau schon seit Langem gestellt, stärken Humusgehalte und Fruchtbarkeit ihrer Böden durch regelmäßige Einträge von organischem Material und haben damit über Jahrzehnte hinweg beträchtlichen Humusaufbau erreicht. Genau diese Landwirt werden von Humuszertifikaten am wenigsten profitieren: Da sie Maßnahmen zum Humusaufbau schon umgesetzt haben, können sie nur schwer weitere Humussteigerungen erzielen. Einfacher ist Humusaufbau auf Flächen zu erzielen, deren Humusvorräte vernachlässigt wurden und abgenommen haben. Mit solchen Flächen könnte man am meisten von Humuszertifikaten profitieren. Dies wirft die Frage auf, wie fair das Zertifizierungssystem ist und ob es immer zielführende Anreize setzt.

Anders ist die Situation, wenn stark degradierte und unfruchtbare Standorte, z. B. in Entwicklungsländern, durch meliorative Maßnahmen und Humusaufbau

wieder landwirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Hierfür sind in vielen Fällen Anschubinvestitionen erforderlich, bei denen Humuszertifikate unterstützend wirken könnten.

Foto: agrarfoto

Abb. 4: Der Klimaeffekt von Kompost ist gleich null, weil der Kohlenstoff an anderer Stelle gewonnen und abtransportiert wurde und dort damit verloren ging.

4. Die Verlagerung von Treibhausgasemissionen durch das Projekt auf andere Flächen oder Produkte ist zu vermeiden. Wenn sie auftritt, muss sie von der erzielten Emissionsminderung abgezogen werden.

Der einfachste Weg, schnell Humusvorräte aufzubauen, ist der Zukauf von organischem Dünger, am besten Kompost. Auf den meisten Flächen, die bisher an Projekten zur Humuszertifizierung teilnehmen, wird das so gemacht. Das führt jedoch dazu, dass der mit dem Kompost ausgebrachte organische Kohlenstoff an anderer Stelle nicht mehr für den Humuserhalt zur Verfügung steht. Auf der CO_2-zertifizierten Fläche steigen mit der Kompostausbringung die Humusvorräte, auf den Flächen, von denen organischer Kohlenstoff für die Komposther-stellung exportiert wurde, sinken sie. Es findet also nur eine Umverteilung von Humus statt. Netto kommt es zu keinem Humusaufbau und damit auch nicht zu Klimaschutz.

So etwas nennt man Leakage-Effekt. Er beschreibt die Verlagerung von Treibhausgasemissionen, wenn die Durchführung eines Klimaschutzprojekts an einer anderen Stelle Emissionen erhöht oder die Vorräte an organischem Kohlenstoff an einer anderen Stelle senkt. Beim Humusaufbau ist dies in der Regel der Fall, wenn er auf Einträgen organischer Materialien beruht, die auf anderen Flächen produziert wurden. Deshalb ist die Vorgabe für CO_2-Kompensationsprojekte klar: Solche Verlagerungseffekte müssen weitestgehend ausgeschlossen bzw. von den erzielten Klimaschutzeffekten abgezogen werden. Dies gilt auch für Verlagerungseffekte innerhalb eines landwirtschaftlichen Betriebs. Anders formuliert: Humusaufbau für den Klimaschutz muss auf der Produktivität des Standorts beruhen und darf nicht durch Importe organischer Materialien von anderen Flächen erfolgen, die dann Humus verlieren.

Fazit. Humuszertifikate für den Klimaschutz müssen die allgemein anerkannten Qualitätskriterien für CO_2-Kompensationsprojekte erfüllen. Alle Geschäftsmodelle und Projektinitiativen, die auf dem Verkauf von Humuszertifikaten basieren, müssen sich diesen Anforderungen stellen. Die Reversibilität der Humusanreicherung, Verlagerung von Humus mit organischen Düngern und das begrenzte Potential, Humusaufbau auf der Basis der Standortproduktivität zu erreichen, schränken die Möglichkeiten, über Humuszertifikate echte Klimaschutzbeiträge zu erzielen, sehr stark ein. Nicht alle Humuszertifikate, die mit dem Label Klimaschutz werben, tragen auch tatsächlich zum Klimaschutz bei.

Ansätze der Fütterung zur Minderung der Methanemission beim Wiederkäuer*

Prof. Michael Kreuzer[1], Dr. Melissa Terranova[2], Prof. Marcus Clauss[3]

[1] ETH Zürich, Institut für Agrarwissenschaften, Universitätsstraße 2, 8092, Zürich
[2] ETH Zürich, AgroVet-Strickhof, Eschikon 27, 8315 Lindau
[3] Klinik für Zoo-, Heim- und Wildtiere, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich, Winterthurerstraße 260, 8057 Zürich

Einleitung

Wiederkäuer sind hervorragend daran angepasst, für den Menschen kaum verwertbare pflanzlichen Produkte mittels mikrobieller Fermentation zu nutzen. So verwandeln sie nicht-essbare Biomasse in qualitativ hochwertige Lebensmittel. Ungünstigerweise besteht diese mikrobielle Fermentation aus einer Kaskade, bei der Wasserstoff (H^+ Ionen) freigesetzt wird, der entfernt werden muss. Dies geschieht in einem völlig natürlichen, im Verlauf der Evolution entstandenen Prozess durch die Verbindung von Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan (CH_4). Die Methanproduktion ermöglicht es den Wiederkäuern damit, sich perfekt an ihre ökologische Nische der Nutzung faserhaltigen Pflanzenmaterials anzupassen.

Die global immer weiter steigende Zahl an landwirtschaftlich genutzten Wiederkäuern hat allerdings diesen natürlichen Prozess in ein Umweltproblem verwandelt, welches bekannt ist, seit das Methan als ein bedeutendes Treibhausgas erkannt wurde. Nachdem global keine substanzielle Reduktion der Tierzahl zu erwarten ist, werden tatsächlich Fütterungsmaßnahmen zur Senkung des Methanausstosses in Szenarios mit Fokus auf die Bekämpfung der globalen Erwärmung sehr wichtig. Für Produktionssysteme mit Rindern wird geschätzt, dass das Senkungspotential bei ca. 30 % liegt, was 775 Millionen Tonnen an CO_2 Äquivalenten (Methan = 23 CO_2 Äquivalente) entspricht (Gerber et al. 2013). Fütterungsmaßnahmen bleiben auch dann wichtig, wenn es künftig effiziente Maßnahmen zur Selektion von niedrig emittierenden Wiederkäuern geben würde (dazu siehe auch Beitrag von Prof. Swalve an dieser Tagung), weil diese

* Dies ist eine freie Übersetzung des Beitrags “Controlling methane emissions by feeding» von Michael Kreuzer, Melissa Terranova und Marcus Clauss präsentiert am 18. März 2021 an der Tagung der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie und erschienen in den «Proceedings of the Society of Nutrition Physiology» 30: 154-158, 2021.

zwei Ansätze additiv wirken können. Im Folgenden wird ein Überblick über den Kenntnisstand zu effizienten Fütterungsmaßnahmen zur Methansenkung gegeben, also so zu sagen ein Werkzeugkasten für die sofortige Anwendung.

Allgemeine Aspekte zum Methan im Zusammenhang mit der Beeinflussung der Produktionseffizienz

Flachowsky und Brade zogen 2007 den Schluss, dass „die Erhöhung der tierischen Leistung und eine damit mögliche Reduktion der Anzahl der Wiederkäuer die (gegenwärtig) effektivste Maßnahme sein sollte, eine verminderte Methanemission zu erzielen." Zusätzlich zu der Überlegung, dass es dann theoretisch weniger Tiere für die Erzeugung derselben Menge an Milch und Fleisch braucht, wird dabei ein Teil der gut verdaulichen Faser in qualitativ hochwertigen Grundfutterrationen durch Stärke aus dem Kraftfutter ersetzt, und als Ausgleich wird oft Grundfutter schlechterer Qualität eingesetzt. Das sieht sehr attraktiv aus, aber der Zusammenhang ist weniger einfach, als er erscheint. Im großen Ganzen ist die Reduktion der Tierzahl im Fall einer erhöhten Leistung alles andere als garantiert. Im Gegenteil, und im Gegensatz zu den allgemeinen Annahmen, wird mit dem Jevons Paradoxon (Bauer und Papp 2009) ein Anstieg der Nachfrage in einer Situation, in der die Leistung steigt, vorhergesagt. Das Paradoxon besagt, dass in der Geschichte der menschlichen Ökonomie ein Anstieg in der Produktionseffizienz für ein Produkt oder einer Ware kaum je zu einer Reduktion im Ressourcenverbrauch führte, weil der Anstieg typischerweise mit einer höheren Zahl an Produkten oder Waren verbunden ist, die von der Menschheit genutzt wird. Im vorliegenden Zusammenhang bedeutet dies, dass die freiwerdenden Stallplätze zumeist mit anderen Tieren besetzt werden. Weiterhin gibt es Probleme, die dem Produktionssystem selbst eigen sind. So öffnet z.B. die Erzeugung derselben Menge an Milch mit weniger Kühen eine Lücke in der Rindfleischversorgung, welche typischerweise durch eine zusätzliche Mutterkuhhaltung kompensiert wird (Zehetmeier et al. 2012). Obwohl das Mutterkuhsystem sehr nah am natürlichen Verhalten und der natürlichen Ernährungsweise der Tiere ist, ist es auch ein System, das aufgrund des doppelten Transformationsverlustes von Kuh zu Milch zu Kalbfleisch eine sehr schlechte Effizienz der Erzeugung von essbarem Protein ergibt. Als Konsequenz ergibt sich daraus, dass die gesamten Treibhausgasemissionen aus dem Milch-Fleisch-System mit steigender Milchleistung wegen des Koppelproduktes Fleisch sogar noch ansteigen (Zehetmeier et al. 2012). In diesem Zusammenhang konnten Probst et al. (2019) berechnen, dass die Anwendung von Spermasexing die Systemeffizienz verbessern könnte, weil es mit dieser Technik möglich ist, Masttiere mit einem höheren Wachstumspotential als dasjenige der reinrassigen Milchrassenkälber zu erzeugen.

Faser oder Stärke – oder die grundlegendsten Fütterungssystemoptionen und die Unterschiede in ihrem Methanemissionspotenzial

Wie oben ausgeführt wird mit erhöhtem Kraftfutteranteil in der Ration erwartet, dass weniger Methan als mit grundfutterbetonten oder reinen Grundfutterrationen entstehen wird. Die Umsetzung einer solchen Strategie ist jedoch konträr zur generellen Berechtigung der Haltung von Wiederkäuern, nämlich dass sie für den Menschen nicht essbare Biomasse in wertvolle Nahrungsmittel verwandeln. Zudem sei angemerkt, dass nur sehr hohe Kraftfutteranteile im Futter eine wirklich hohe Effizienz gegen die Methanemissionen aufweisen. Dies erfolgt vor allem wegen des starken Rückgangs des pH-Wertes im Pansen bis zu unphysiologisch tiefen Niveaus, und weniger wegen des Austausches von Faser durch Stärke. Bei moderatem Kraftfuttereinsatz ist auch die Methansenkung eher gering (Grandl et al. 2016). Dies berücksichtigt auch das IPCC in dem es in der Methanleistung Y_m nur zwischen Rationen mit weniger oder mehr als 90 % Kraftfutter (6.5 oder 3.5 % der Bruttoenergieaufnahme) unterscheidet. Zudem ist mit höheren Kraftfutteranteilen ein Anstieg der Methanemission aus der Gülle zu beachten, was oft in der Methanbilanz übersehen wird. Der Grund dafür ist, dass die Methanogenen in der Gülle bei kraftfutterreichen Rationen mit mehr unverdauter Futterfaser versorgt werden, was die erzielbare Nettoemissionsminderung weiter verringert (Hindrichsen et al. 2006). In einem umfassenderen Systemansatz müssen auch weitere Treibhausgase berücksichtigt werden. Lorenz et al. (2019) berechneten, dass sich die Produktionssysteme «Weide», «Stallhaltung» und «gemischte Systeme» mit angenommenen mittleren Kraftfutteranteilen von 7 %, 35 % und 25 % im Futter nur wenig im Kohlenstofffußabdruck unterschieden.

Steigerung der Futterverwertung als Schlüssel zu niedrigen Methanemissionen

Das Dilemma, das oben ausgeführt wurde, hat aber doch eine Komponente, die den Weg zu einer wirklichen Schlüsselgröße für Systemoptionen mit niedriger Methan- oder totalen Treibhausgasoptionen weist. Solche Optionen müssen auf einer insgesamt möglichst hohen Futterverwertung aufbauen. Das kann entweder direkt über die Steigerung der Grundfutterqualität erreicht werden, aber auch durch gesündere Tiere und Zucht von Tieren mit einer höheren Futterverwertung (eine schwierige, aber intensiv diskutierte Aufgabe). Eine andere Option zur Verbesserung der Futterverwertung im Produktionssystem besteht darin, auf langlebige Tiere zu setzen. Die Voraussetzung dafür, dass diese Option nun als solche erkannt wurde, ist die Erkenntnis, dass ältere Kühe weniger Methan je

Einheit Futter produzieren als Kühe in ihrer dritten oder vierten Laktation (Grandl et al. 2016). Quantitativ noch viel bedeutsamer ist aber in diesem Zusammenhang, dass die Emissionen an Methan und den gesamten Treibhausgasen aus der nichtproduktiven Aufzuchtphase, bis endlich Milch erzeugt wird, mit längerer Lebenszeit proportional immer weniger ins Gewicht fallen (Grandl et al. 2019). Daher könnte die Milchleistung pro Lebenstag ein besseres Maß für die Systemeffizienz als die aktuelle Milchleistung pro Tag oder Laktation darstellen. Auch diese Strategie ist allerdings nur dann erfolgreich in der Methansenkung, wenn der Anstieg in der Langlebigkeit der Kühe bei einer konstanten und nicht bei einer wachsenden Tierzahl erreicht wird.

Methansenkung durch strategischen Einsatz von nicht-Stärke-nicht-Faser Nährstoffen

Fette, Öle und fettreiche Futtermittel. Die Verfütterung von Lipiden ist der Klassiker unter den methansenkenden Strategien. Es gibt eine grundsätzliche, enge Dosis-Wirkungsbeziehung, aber einige Fettsäuren haben besonders starke antimethanogene Eigenschaften. Diese wurden zuerst von Machmüller und Kreuzer im Jahr 1999 für Kokosfett nachgewiesen. Dieses Fett ist reich an Laurin- und Myristinsäure (beides mittellangkettige, gesättigte Fettsäuren). Dabei wurde die Methanemission von Schafen um bis zu 73 % gegenüber einer Kontrollration gesenkt. Mit nachfolgenden Studien konnte gezeigt werden, dass die Effizienz dieses Fettes (und wahrscheinlich anderer Lipide) geringer ausfällt, wenn grundfutterreiche Rationen verfüttert werden (Umhüllung der Faser mit Lipiden) und wenn die Ration mit extra viel Calcium supplementiert wird (Seifenbildung mit Calcium) (Machmüller et al. 2003). Neben diesen Fettsäuren, die aus Sicht der Humangesundheit als problematisch anzusehen sind, haben ungesättigte und speziell mehrfach ungesättigte Fettsäuren eine besonders hohe Wirksamkeit gegen die Methanogenen. Daher gab es in den letzten Dekaden eine intensive Suche nach Lipidquellen, die nachhaltig produziert werden können und möglichst auch noch andere vorteilhafte Wirkungen auf das Tier haben. So eignen sich Ölsaaten zur Methansenkung. Diese müssen aber geschrotet oder extrudiert sein müssen, um wirken zu können. Speziell vollfette Leinsamen weckten das Interesse, weil sie auch reich an α-Linolsäure sind, eine der wertvollen Omega-3-Fettsäuren. Leinsamenfütterung erhöht den Anteil an dieser Fettsäure am Milchfett, und auch denjenigen der konjugierten Linolsäuren (Poteko et al. 2020). Andere interessante Ölsaaten sind Raps, etwas weniger Sonnenblumenkerne und vollfette Sojabohnen (beide sind reich an Omega-6-Fettsäuren). Deutlich weniger bekannt sind Ölsaaten von Färberdistel (*Carthamus tinctorius*), Mohn (*Papaver somniferum*), Leindotter (*Camelina sativa*) und Hanf (*Cannabis*

sativa). Speziell die ersten beiden Saaten zeigten eine klare Methansenkung *in vitro*, und beide sind, wie der Leindotter, gute Quellen von Omega-3-Fettsäuren (Wang et al. 2017). Hanfsamen sind in der Schweiz übrigens ausser in den Verkehrsmilch produzierenden Systemen zur Verfütterung an Nutztiere in der Schweiz zugelassen.

Zucker. Zucker repräsentiert eine andere Nährstoffgruppe, deren Gehalt in Wiederkäuerrationen normalerweise niedrig ist. «Zucker» ist hier definiert als die gesamte Gruppe der wasserlöslichen Kohlenhydrate. Es könnte sein, dass auch Zucker auch effizient gegen Methan wirkt. Wenn nämlich Zucker einen Teil der Faser im Futter ersetzt, könnte er die Methanbildung deshalb erniedrigen, weil aus Zucker weniger Wasserstoff, das Substrat der Methanogenen, freigesetzt wird als aus Faser. Beispiele für Wiederkäuerfutter mit erhöhtem Zuckergehalt sind Futterrüben, «zuckerreiche» Gräsersorten und Molke aus der Käseherstellung. In Weihenstephan wurde bereits in den 1990er Jahren Respirationsversuche mit Milchkühen durchgeführt, die eine große Menge Futterrüben anstelle von Körnermais erhalten hatten. Dieser Austausch (Müller et al. 1994), wie auch der Einsatz von 5 kg reinem Zucker pro Kuh und Tag (Kirchgeßner et al. 1994), senkte jedoch die Methanbildung nicht. Gleichermaßen wirkte auch der Einsatz einer «zuckerreichen» Gräsersorte mit 19 % statt 10 % wasserlöslichen Kohlenhydraten in einem Kontrollheu nicht methansenkend (Staerfl et al. 2012b). Diese drei Studien hatten gemein, dass keine Faser durch Zucker ersetzt wurde. Dies war anders im Experiment von Dufey et al., die 2019 an der GfE-Konferenz berichteten, dass flüssige, laktosereiche Molke die Methanemissionen um fast 40 % erniedrigte, wenn sie Färsen zur freien Aufnahme vorgelegt wurde. In dieser Studie verzehrten die Färsen täglich 2.3 kg Molke und 6.4 kg Gras (auf Basis Trockenmasse). Es braucht weitere Studien, um dies zu bestätigen und zu kontrollieren, ob bei diesen großen Mengen Laktose ein beträchtlicher Teil davon im Enddarm fermentiert wird und dort Methan freisetzt. Die Autoren wandten die SF6-Methode an, bei der das Methan aus dem Enddarm nicht vollständig erfasst wird. In all diesen Studien mit großen Zuckermengen wurden keine Fälle von Pansenazidose berichtet, obwohl alle Rationen an Wiederkäuern mit voll ausgebildetem Pansen verfüttert wurden.

Zusammenfassend scheinen Fett und Zucker vielversprechend als Nährstoffe und als Methansuppressoren zu sein. Jedoch muss immer berücksichtigt werden, dass diese Nährstoffe im natürlichen Wiederkäuerfutter nur in kleinen Anteilen vorkommen und man daher vorsichtig sein muss, wenn man auf eine beträchtliche Methansenkung mit diesen Nährstoffen abzielt. Zudem stellen sie oft Ressourcen dar, die auch für die menschliche Ernährung genutzt werden könnten.

Methansenkung durch Supplementierung mit natürlichen Futterkomponenten

Futterzusätze aus natürlichen Quellen, welche effektive sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe (SPI) enthalten, werden zurzeit intensiv im Hinblick auf ihre Eignung zur nutritiven Methansenkung erforscht. Die Zahl potenziell effektiver Pflanzen und SPI ist immens und es wurde bereits eine Reihe von *in vitro*-Screenings durchgeführt. Ein bekanntes großes, abgeschlossenes Screening ist das «Rumen Up»-Project (www.abdn.ac.uk/research/rumen-up). Vielversprechende pflanzliche Zusätze müssen aber *in vivo*, d.h. im Tier, hinsichtlich der folgenden Schlüsseleigenschaften untersucht werden: 1) Effizienz der Methansenkung im Tier, 2) ausreichende Schmackhaftigkeit und 3) Abwesenheit möglicher antinutritive Effekte wie etwa eine reduzierte Verdaulichkeit. Die letzten beiden Eigenschaften bestimmen ihre Nützlichkeit in der Fütterungspraxis, wo auch die Kosten-Nutzen-Effizienz eine große Rolle spielt. Wenn jedoch die Anwendung von bestimmten effizienten SPI-Quellen allgemeine Praxis werden sollte, könnten die Kosten aufgrund der Skalierungseffekte der Produktion deutlich geringer werden.

Tannine. Die am besten untersuchte SPI-Klasse ist diejenige der Tannine. Tannine sind große und komplexe Moleküle. Eine Metaanalyse demonstrierte eine klare Dosis-Wirkungsbeziehung, aber auch, dass niedrige, kostengünstige Dosierungen (weniger als 2 % im Futter) im Tier keine verlässliche Wirkung gegen das Methan haben (Jayanegara et al. 2012). Wie bei den Lipidquellen gibt es Unterschiede zwischen den Tanninquellen in der Effizienz der Methansenkung, der Schmackhaftigkeit und den Wirkungen auf die Verdaulichkeit. Deshalb kann die Grenze in der Dosierung, ab der die ungünstigen Effekte die günstigen kompensieren, nicht generalisiert werden. Eine Quelle, die sich häufig, aber nicht immer als effizient erwiesen hat, ist ein Tanninextrakt aus der Rinde einer Akazienart (*Acacia mearnsii*). Dieser Extrakt wird in großen Mengen für die Lederindustrie produziert. Der erste Wirkungsnachweis erfolgte in Lämmern im Jahr 2005 (Carulla et al. 2005). Ein neuerer Durchbruch war der Nachweis der Langzeitwirkung des Extraktes (> 6 Monate) in Mastbullen (Staerfl et al. 2012a), eine wichtige Eigenschaft, die nicht auf alle der zur Methansenkung diskutierten Zusätze gelten dürfte. Kürzlich konnte sogar belegt werden, dass die *A. mearnsii* Tannine eine unmittelbare antimethanogene Wirkung bereits am ersten Tag der Fütterung entfalten (Denninger et al. 2020). Die sofortige und über lange Zeit anhaltende Wirkung, sowie der geringe Einfluss auf die tierische Leistung machen diesen Zusatz besonders attraktiv. Dennoch gibt es auch einen Nachteil, nämlich, dass dieser Zusatz aus tropischen Regionen importiert werden muss. Ressourcen, die auf dem heimischen Betrieb erzeugt werden könnten, wären

zu bevorzugen. Tanninreiche Futtermittel, die auf Ackerflächen in gemäßigtem Klima angebaut werden können, sind z.B. die Leguminosen Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) und Hornklee (*Lotus corniculatus*). Aber obwohl beide effizient die Ammoniakemissionen aus der Gülle vermindern, konnte *in vitro* für diese, wie auch für eine Reihe anderer Tanninquellen keine methansenkende Wirkung nachgewiesen werden (Große Brinkhaus et al. 2017). Potenzielle effiziente Tanninquellen könnten auch in Europäischen Kräutern, Sträuchern und Bäumen zu finden sein. Ein kürzliches Screening mit dem Hohenheimer Futterwerttest identifizierte sechs besonders vielversprechenden Pflanzen (Terranova et al. 2018), wovon vier auch für Kühe sehr schmackhaft waren (Terranova et al. 2020). Dies waren die Blätter des Haselstrauchs (*Corylus avellana*), der grünen Weinrebe (*Vitis vinifera*) und die Kräuter Schmalblättriges Weidenröschen (*Epilobium angustifolium*) und Nelkenwurz (*Geum urbanum*). Mit den Haselblättern wurde eine Methansenkung bei Schafen bis zu 35 % gefunden, so viel allerdings nur mit einer Ration, die zur Hälfte aus diesen Blättern bestand (Wang et al. 2018). Niedrigere Dosierungen der Haselblätter waren aber auch wirksam, und in Milchkühen wurde kürzlich eine enge Dosis-Wirkungsbeziehung nachgewiesen (Terranova et al. 2021).

Saponine. Eine andere Gruppe von interessanten Verbindungen ist die der Saponine. Saponinreiche Extrakte werden aus einer Reihe von Pflanzen hergestellt, insbesondere aus tropischen Pflanzen, und ihre Wirksamkeit konnte in einigen Fällen nachgewiesen werden (z.B. Hess et al. 2004). Saponine können in höheren Mengen aber auch toxisch wirken, und das Gleichgewicht zwischen einer substanziellen Methansenkung und dem Auftreten von ungünstigen Nebenwirkungen ist hierbei schwierig zu finden, was ihre praktische Anwendung erschwert.

Ätherische Öle. Viele Forscher fokussieren sich auf eine andere Gruppe von SPI, nämlich die ätherischen Ölen oder Pflanzen, die reich daran sind. Für die ätherischen Öle von Thymian, Oregano und Zimt, sowie die Extrakte bestehend aus ätherischen Ölen von diesen Pflanzen wurde eine grundsätzliche methansenkende Wirkung nachgewiesen, aber bislang sind Produkte mit hoher Effizienz gegen Methan selten und die Kenntnis über ihre aktiven Verbindungen und die effizienten Dosierungen ist noch begrenzt (Cobelis et al. 2016).

Schwefelhaltige Verbindungen. Diese Verbindungen wurden ebenfalls genauer beleuchtet. Speziell Knoblauch enthält solche Verbindungen (dies zusätzlich zu seinen ätherischen Ölen), und diese schwefelhaltigen Verbindungen sind auch für den spezifischen Knoblauchgeruch verantwortlich. Knoblauchöl vermochte *in vitro* mit dem Rusitec-System eine Methanreduktion um 91 % gegenüber einer Kontrolle auszulösen (Soliva et al. 2004). Allerdings war die Wirkung

von Knoblauchöl in Schafen viel geringer (Klevenhusen et al. 2011a), und 3 % Knoblauchknollen hatten keine signifikante Wirkung gegen Methan in Mastbullen (Staerfl et al. 2012a). Eine weitere Einschränkung ist, dass Futtermittel auf Basis von Knoblauch in der Milchkuhfütterung nicht erlaubt sind, zumindest nicht in der Schweiz.

Bromoform. Seit kurzem erhält ein unkonventionelles methansenkendes Futtermittel viel Beachtung: eine bestimmte rote Makroalge (*Asparagopsis taxiformis*; ein Seegras) zeigte drastische Wirkungen gegen das Methan, nämlich eine Reduktion um 99 % gegenüber einer Kontrolle *in vitro* (Machado et al. 2016) und um 80 %, wenn sie zu 3 % dem Futter von Schafen zugesetzt wurde (Li et al. 2018). Die Wirkung scheint auf einer speziellen halogenierten Verbindung zu beruhen, dem Bromoform, welches in relevanten Konzentrationen in diesen Algen vorkommt. Bromoform reagiert mit einem Vitamin B12-Kofaktor, der für die Methanogenen essenziell ist. Die Sicherheit des Einsatzes in lebensmittelproduzierenden Tieren ist jedoch noch unklar und braucht weitere Untersuchungen.

Eine abschließende Bemerkung zu den antimethanogenen Maßnahmen basierend auf den SPI: Diese Quellen sind Naturprodukte mit oft unterschätzter natürlicher Variation. Dies bedeutet, dass das Auftreten einer bestimmten Wirkung nur begrenzt verlässlich erfolgt, und dass manchmal auch gar keine Wirkung auftritt. Dennoch ist die Kenntnis einer mittleren Wirksamkeit hilfreich für die Entscheidung über ihren Einsatz auf dem Betrieb und für jegliche finanziellen oder Treibhausgas kompensierenden Maßnahmenpakete.

Methansenkung durch Supplementierung von synthetischen Futterkomponenten

Methaninhibitoren sind reine Chemikalien. Sie sind oft Methananaloge, die einen negativen Rückkopplungseffekt auf die Methanbildung ausüben. Einige sind seit langem bekannt und vermögen die Methanbildung bis fast auf null zu senken (z.B. um 85 % mit Bromchlormethan; Dittmann et al. 2016), aber sie sind nicht für den landwirtschaftlichen Betrieb geeignet. Bestimmte Fütterungsantibiotika (in der EU nicht zugelassen), insbesondere das Monensin, haben einen guten Ruf hinsichtlich antimethanogener Eigenschaften. Das Senkungspotential ist aber viel kleiner als bei den echten Inhibitoren (Vyas et al. 2018) und die Wirkung scheint nicht anhaltend zu sein. Um das Stigma eines chemischen Futterzusatzes zu umgehen, konzentriert sich die Suche nun auf Verbindungen, die auch in der Natur vorkommen, die aber auch chemisch synthetisiert werden können. Eine solche Verbindung, die Fumarsäure, hat eine große Effizienz ge-

genüber Methan aufgezeigt (Reduktion um 76 % relativ zu einer Kontrolle, wenn die Fumarsäure verkapselt war) (Wood et al. 2009), aber dieses Produkt ist zurzeit sehr teuer. Auch Allylisothiocyanat (Soliva et al. 2004) und Diallyldisulphid (Klevenhusen et al. 2011a,b), zwei schwefelhaltige Knoblauchverbindungen, zeigten *in vitro* eine große Effizienz (Reduktion um 68 % gegenüber der jeweiligen Kontrolle), wenn sie als Reinsubstanzen zugegeben wurden; die Effizienz dieser Verbindungen hinsichtlich der Methansenkung war im Schaf jedoch gering. Eine andere, natürlich vorkommende Verbindung, das 3-Nitrooxypropanol (3-NOP) führte zu einer großen Zahl von Experimenten nach ihrer Entdeckung. Es wird gegenwärtig als sehr vielversprechend angesehen, denn seine Effizienz gegen Methan ist eine der höchsten unter den üblichen Futterzusätzen (um 10 bis 40 % weniger Methan im Vergleich zur Kontrolle; z.B. Vyas et al. 2018 und van Gastelen et al. 2020). Diese Verbindung interagiert mit der Methylcoenzym M-Reduktase, einem Schlüsselenzym im methanbildenden Stoffwechselweg der Methanogenen (van Gastelen et al. 2020). Seine Zulassung als Futterzusatz wurde zwischenzeitlich vom Hersteller in der EU und in den USA beantragt.

Selbe Ration, selbe Methanemissionen?

Ein letztes Kapitel soll dem kürzlich entdeckten Phänomen einer Genotyp × Ernährungsinteraktion – oder dem Fehlen einer solchen Interaktion – in der Methanbildung gewidmet werden. Auf einer größeren Skala gibt es zwischen ganz unterschiedlichen Wiederkäuerarten eine erstaunlich ähnliche Methanproduktion pro Einheit verdautes Futter, wenn auf Basis desselben Futters verglichen wird; dasselbe gilt für die Methanbildung einer Vielzahl von nicht-wiederkäuenden Herbivoren (letztere bilden ca. ein Viertel der Methanmenge wie die Wiederkäuer) (Clauss et al. 2020). Auf einer feineren Skala scheint es jedoch individuelle, eventuell genetisch bedingte Unterschiede zwischen Tieren zu geben. Dies ergibt sich, wenn die Methanemission pro Einheit verdauter Faser mit steigender Faserverdaulichkeit verglichen wird. Dies wurde zum ersten Mal in einem Datensatz aus einem Experiment gefunden, welches sich mit der Methanemission von Kühen unterschiedlichen Alters befasste (Grandl et al. 2018). Mit diesem Datensatz konnte gezeigt werden, dass weniger Methan je Einheit verdauter Faser bei gleichem Futter gebildet wurde, je besser das Tier die Faser verdaute, und dies, obwohl die Verweildauer des Futters im Verdauungstrakt dabei ebenfalls höher war. Eine Analyse von Daten aus einer größeren Zahl an Versuchen bestätigte diese inverse Beziehung zwischen Faserverdaulichkeit und Methanbildung je Einheit verdaute Faser (Terranova et al. 2019). Es braucht jedoch weitere Studien, um die Ursachen für dieses Phänomen herauszufinden und zu bestimmen, wie diese Erkenntnisse in ein Methansenkungswerkzeug verwandelt werden könnten.

Schlussfolgerungen

Die Liste der möglichen Maßnahmen, die in eine «Werkzeugkiste» für nutritive Methansenkung aufgenommen werden können, ist lang. Effizienz, Preis und Nebenwirkungen speziell auf die tierische Leistung variieren stark. Es gibt wahrscheinlich nicht die *eine* Maßnahme, die sich für alle Betriebe in der ganzen Welt eignet. Es braucht daher den Ansatz, nach maßgeschneiderten Lösungen für einzelne Länder, Regionen oder sogar Betriebe zu suchen. Die einzelnen Senkungsmaßnahmen müssen zudem auf ihre Effekte bezüglich anderer Arten von Emissionen wie Lachgas, Ammoniak oder Nitrat geprüft werden. Es gibt einige Maßnahmen, die gegen mehr als einen Emissionstyp wirken (z.B. Tannine), andere wirken hingegen nur gegen das Methan (z.B. Lipide). Zusätzlich muss in Szenarien hinsichtlich ihrer Nützlichkeit jeder Kohlenstoff-Fußabdruck, der mit der Produktion und Verteilung der gegen das Methan konzipierten Futterzusätze assoziiert ist, berücksichtigt werden. Gegenwärtig ist es nicht realistisch, einen substanziellen Anstieg in der Produktionseffizienz für Milch oder Fleisch zusammen mit einer Methansenkung zu erwarten – im Gegenteil: Es wird typischerweise schon als Erfolg angesehen, wenn eine Senkungsmaßnahme die Produktionseffizienz nicht reduziert. Wegen des Missverhältnisses zwischen den Kosten für die Einführung einer effizienten Maßnahme für den einzelnen Betrieb und dem allgemeinen Gut der globalen Umwelt ist es schwierig, sich vorzustellen, dass nutritive Maßnahmen eine weite Verbreitung finden, es sei denn, sie sind mit einer Anreizpolitik verbunden. Solche Anreize könnten in Kompensationsmaßnahmen, Strafen («Methansteuer») oder Vermarktungsstrategien mit hochpreisigen Lebensmitteln bei Erfüllung von Methansenkungszielen bestehen. In der Debatte, wie man der Klimaerwärmung am besten entgegenwirkt, sollten solche Anreize berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang ist es vorteilhaft, dass sich Maßnahmen im Bereich von Tierhaltungssystemen durch die Möglichkeit der schnellen Implementierung und einen raschen Effekt auf das Klima auszeichnen, denn das Methan hat eine viel kürzere Halbwertszeit in der Atmosphäre als das Kohlendioxid.

Literatur

Bauer, D., Papp, K. (2009): John Polimeni, Kozo Mayumi, Mario Giampietro & Blake Alcott, the Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements. Sustainability: Science, Practice, & Policy doi:10.1080/15487733.2009.11908028

Carulla, J.E., Kreuzer, M., Machmüller, A., Hess, H.-D. (2005): Supplementation of Acacia mearnsii tannins decreases methanogenensis and urinary nitrogen in forage-fed sheep. Australian Journal of Agricultural Research 56: 961-970

Clauss, M., Dittmann, M.T., Vendl, C, Hagen, K.B., Frei, S., Ortmann, S., Müller, D.W.H., Hammer, S., Munn, A.J., Schwarm, A., Kreuzer, M. (2020): Comparative methane production in mammalian herbivores. Animal 14: 113-123

Cobelis, G., Trabalza-Marinucci, M., Yu, Z. (2016): Critical evaluation of essential oils as rumen modifiers in ruminant nutrition: A review. Science of the Total Environment 545-546: 556-568

Denninger, T.M., Schwarm, A., Birkinshaw, A., Terranova, M., Dohme-Meier, F., Münger, A., Eggerschwiler, L., Babst, B., Wegmann, S., Clauss, M., Kreuzer, M. (2020): Immediate effect of Acacia mearnsii tannins on methane emissions and milk fatty acid profiles of dairy cows. Animal Feed Science and Technology 261: 1-13

Dittmann, M.T., Hammond, K.J., Kirton, P., Humphries, D.J., Crompton, L.A., Ortmann, S., Misselbrook, T.H., Südekum, K.-H., Schwarm, A., Kreuzer, M., Reynolds, C.K., Clauss, M. (2016): Influence of ruminal methane on digesta retention and digestive physiology in non-lactating dairy cattle. British Journal of Nutrition 116: 763-773

Dufey, P.A., Oberson, J.L., Martin, C., Silacci, P., Hess, H.-D., Dohme-Meier, F. (2019): Effect of feeding fresh whey on feed intake and ruminal methane emission of grazing beef cattle. Proceedings of the Society of Nutrition Physiology 28: 55

Flachowsky, G., Brade, W. (2007): Potenziale zur Reduzierung der Methan-Emissionen bei Wiederkäuern. Züchtungskunde 79: 417-465

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falucci, A., Tempio, G. (2013): Tackling climate change through livstock. A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), www.fao.org/docrep/018/i3437e/i3437e.pdf

Grandl, F., Amelchanka, S.L., Furger, M., Clauss, M., Zeitz, J.O., Kreuzer, M., Schwarm, A. (2016): Biological implications of longevity in dairy cows: 2. Changes in methane emissions and feed efficiency with age. Journal of Dairy Science 99: 3472-3485

Grandl, F., Schwarm, A., Ortmann, S., Kreuzer, M., Clauss, M. (2018): Kinetics of solutes and particles of different size in the digestive tract of cattle of 0.5 to 10 years of age, and relationships with methane production. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 102: 639-651

Grandl, F., Furger, M., Kreuzer, M., Zehetmeier, M. (2019): Impact of longevity on greenhouse gas emissions and profitability of individual dairy cows analysed with different system boundaries. Animal 13: 198-208

Grosse Brinkhaus, A., Wyss, U., Arrigo, Y., Girard, M., Bee, G., Zeitz, J.O., Kreuzer, M., Dohme-Meier, F. (2017): In vitro ruminal fermentation characteristics and utilisable CP supply of sainfoin and birdsfoot trefoil silages and their mixtures with other legumes. Animal 11: 580-590

Hess, H.-D., Beuret, R., Lötscher, M., Hindrichsen, I.K., Machmüller, A., Carulla, J.E., Lascano, C.E., Kreuzer, M. (2004): Ruminal fermentation, methanogenesis and nitrogen utilisation of sheep receiving tropical grass hay-concentrate diets offered with Sapindus saponaria fruits and Cratylia argentea foliage. Animal Science 79: 177-189

Hindrichsen, I.K., Wettstein, H.-R., Machmüller, A., Kreuzer, M. (2006): Methane emission, nutrient degradation and nitrogen turnover in dairy cows and their slurry at different milk production scenarios with and without concentrate supplementation. Agriculture, Ecosystems & Environment 113: 150-161

Jayanegara, A., Leiber, F., Kreuzer, M. (2012): Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 96: 365-375

Kirchgssner, M., Müller, H.L., Birkenmaier, F., Schwarz, F.J. (1994): Eneregetische Verwertung von Saccharose durch laktierende Milchkühe und Konsequenzen für die Energiebewertung von Zucker. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 71: 247-260

Klevenhusen, F., Zeitz, J.O., Duval, S.M., Kreuzer, M., Soliva, C.R. (2011a): Garlic oil and its principal component diallyl disulfide fail to mitigate methane, but improve digestibility in sheep. Animal Feed Science and Technology 166-167: 356-363

Klevenhusen, F., Duval, S.M., Zeitz, J.O., Kreuzer, M., Soliva, C.R. (2011b): Diallyl disulphide and lovastatin: effects on energy and protein utilisation in, as well as methane emission from, sheep. Archives of Animal Nutrition 65: 255-266

Li, X., Norman, H.C., Kinley, R.D, Laurence, M., Wilmot, M., Bender, H., de Nys, R., Tomkins, N. (2018): Asparagopsis taxiformis decreases enteric methane production from sheep. Animal Production Science 58: 681-688

Lorenz, H., Reinsch. T., Hess, S., Taube, F. (2019): Is low-input dairy farming more climate friendly? A meta-analysis of the carbon footprints of different production systems. Journal of Cleaner Production 211: 161-170

Machado, L., Magnusson, M., Paul, N.A., Kinley, R., de Nys, R., Tomkins, N. (2016): Dose-response effects of Asparagopsis taxiformis and Oedogonium sp. on in vitro fermentation and methane production. Journal of Applied Phycology 28: 1443-1452

Machmüller, A., Kreuzer, M. (1999): Methane suppression by coconut oil and associated effects on nutrient and energy balance in sheep. Canadian Journal of Animal Science 79: 65-72

Machmüller, A., Soliva, C.R., Kreuzer, M. (2003): Methane-suppressing effect of myristic acid in sheep as affected by dietary calcium and forage proportion. British Journal of Nutrition 90: 529-540

Müller, H.L., Birkenmaier, F., Schwarz, F.J., Kirchgessner, M. (1994): Energetische Verwertung von Futterrüben durch Milchkühe. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 71: 234-246

Poteko, J., Schrade, S., Zeyer, K., Mohn, J., Zaehner, M., Zeitz, J.O., Kreuzer, M., Schwarm, A. (2020): Methane emissions and milk fatty acid profiles in dairy cows fed linseed, measured at the group level in a naturally ventilated housing and individually in respiration chambers. Animals 10: 1091, doi:10.3390/ani10061091

Probst, S., Wasem, D., Kobel, D., Zehetmeier, M., Flury, C. (2019): Treibhausgasemissionen aus der gekoppelten Milch- und Fleischproduktion in der Schweiz. Agrarforschung Schweiz 10: 440-445

Soliva, C.R., Meile, L., Cieślak, A., Kreuzer, M., Machmüller, A. (2004): Rumen simulation technique study on the interactions of dietary lauric and myristic acid supplementation in suppressing ruminal methanogenesis. British Journal of Nutrition 92: 689-700

Staerfl, S.M., Zeitz, J.O., Kreuzer, M., Soliva, C.R. (2012a): Methane conversion rate of bulls fattened on grass or maize silage as compared with the IPCC default values, and the long-term methane mitigation efficiency of adding acacia tannin, garlic, maca and lupine. Agriculture, Ecosystem & Environment 148: 111-120

Staerfl, S.M., Amelchanka, S.L., Kälber, T., Soliva, C.R., Kreuzer, M., Zeitz, J.O. (2012b): Effect of feeding dried high-sugar ryegrass ('AberMagic') on methane and urinary nitrogen emissions of primiparous cows. Livestock Science 150: 293-301

Terranova, M., Kreuzer, M., Braun, U., Schwarm, A. (2018): In vitro screening of temperate climate forages from a variety of woody plants for their potential to mitigate ruminal methane and ammonia formation. Journal of Agricultural Science 156: 929-941

Terranova, M., Kreuzer, M., Clauss, M. (2019): Do methane emissions per unit of digested fibre vary with fibre digestibility? Advances in Animal Biosciences 10: 528

Terranova, M., Wang, S., Eggerschwiler, L., Braun, U., Kreuzer, M., Schwarm, A. (2020): Dose-response effects of woody and herbaceous forage plants on in vitro ruminal methane and ammonia formation, and their short-term palatability in lactating cows. Animal 14: 538-548

Terranova, M., Eggerschwiler, L., Ortmann, S., Clauss, M., Kreuzer, M., Schwarm, A. (2021): Increasing the proportion of hazel leaves in the diet of dairy cows reduced methane yield and excretion of nitrogen in volatile form, but not milk yield. Animal Feed Science and Technology 276: 114790

van Gastelen, S., Dijkstra, J., Binnendijk, G., Duval, S.M., Heck, J.M.L., Kindermann, M., Zandstra, T., Bannink, A. (2020): 3-Nitrooxypropanol decreases methane emissions and increases hydrogen emissions of early lactation dairy cows, with associated changes in nutrient digestibility and energy metabolism. Journal of Dairy Science 103: 8074-8093

Vyas, D., Alemu, A.W., McGinn, S.M., Duval, S.M., Kindermann, M., Beauchemin, K.A. (2018): The combined effects of supplementing monensin and 3-nitrooxypropanol on methane emissions, growth rate, and feed conversion efficiency in beef cattle fed high-forage and high-grain diets. Journal of Animal Science 96: 2923-2938

Wang, S., Kreuzer, M., Braun, U., Schwarm, A. (2017): Effect of unconventional oilseeds (safflower, poppy, hemp, camelina) on in vitro ruminal methane production and fermentation. Journal of the Science of Food and Agriculture 97: 3864-3870

Wang, S., Terranova, M., Kreuzer, M., Marquardt, S., Eggerschwiler, L., Schwarm, A. (2018): Supplementation of pelleted hazel (Corylus avellana) leaves

decreases methane and urinary nitrogen emissions by sheep at unchanged forage intake. Scientific Reports 8: 5427, doi:10.1038/s41598-018-23572-3

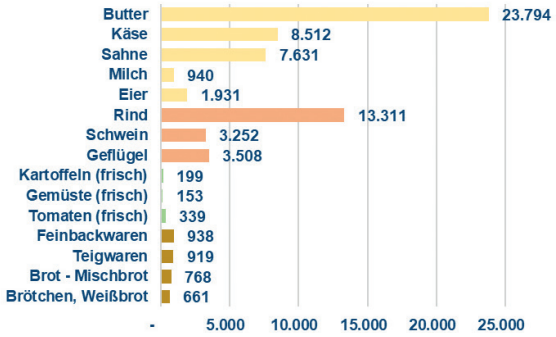
Wood, T.A., Wallace, R.J., Rowe, A., Price, J., Yáñez-Ruiz, D.R., Murray, P., Newbold, C.J. (2009): Encapsulated fumaric acid as a feed ingredient to decrease ruminal methane emissions. Animal Feed Science and Technology 152: 62-71

Zehetmeier, M., Baudracco, J., Hoffmann, H., Heissenhuber, A. (2012): Does increasing milk yield per cow reduce greenhouse gas emissions? A system approach. Animal 6: 154-166

Klimaschonender Lebensmittelkonsum – wie reagieren Konsumenten und was kann verbessert werden?

Jun.-Prof. Dr. Ramona Weinrich, Universität Hohenheim

Die negativen Auswirkungen des Klimawandels sind ausreichend bekannt und nehmen in der Intensität zu. So markiert der Erdüberlastungstag den Tag im jeweils laufenden Kalenderjahr, an dem der menschliche Verbrauch nach erneuerbaren Ressourcen die Regenerationsfähigkeit der Erde übersteigt. Lag dieser Tag in 1970 noch auf dem 29. Dezember, so war es in 2021 der 29. Juli (Earth Overshoot Day; Global Footprint Network o. J.). Derzeit sind 15 % der globalen Treibhausgasemissionen durch die menschliche Ernährung versucht (UBA 2020). Damit ist eine Möglichkeit, klimaschädliche Emissionen zu vermindern, den Konsum tierischer Lebensmittel zu reduzieren. Das zeigen auch Studien, die den CO_2-Fußabdruck unterschiedlicher Ernährungsgewohnheiten vergleichen (bspw. van Dooren et al. 2014). Während eine omnivore Ernährung[1] bspw. 1.730 kg jährliche CO_2-Emission verursacht, sind es bei einer vegetarischen Ernährung 1.280 kg und bei einer veganen Ernährung nur 1.040 kg CO_2-Emissionen (Statista Berechnungen nach UBA 2020). Abbildung 1 legt vergleichend die Klimabilanz einzelner Produkte sortiert nach Produktgruppen dar.

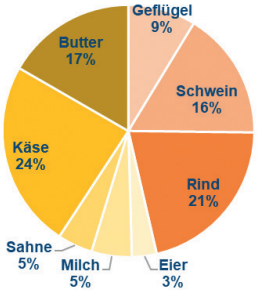


Quelle: eigene Darstellung, Statista Berechnungen nach GEMIS o. J.

Abb. 1: Weltweite CO_2-Äquivalente in Gramm pro Kilogramm des hergestellten Produktes

[1] Berechnung basiert auf einer männlichen Person im Alter von 30 bis 59 Jahren. Alle Ernährungsformen basieren zum Teil auf regionalen, saisonalen und biologisch erzeugten Lebensmitteln, gelegentliche Nutzung von Tiefkühlprodukten.

Da der Vergleich der Produktgruppen noch nichts über den absoluten Verbrauch des jeweiligen Lebensmittels aussagt, sind in Abbildung 2 die CO_2-Äquivalente pro Kopf des jeweiligen Konsums in Deutschland gewichtet.



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung auf Grundlage von Statista Berechnungen auf Basis von GEMIS und BLE

Abbildung 2: CO_2-Äquivalente gewichtet (pro Kopf Konsum in D)

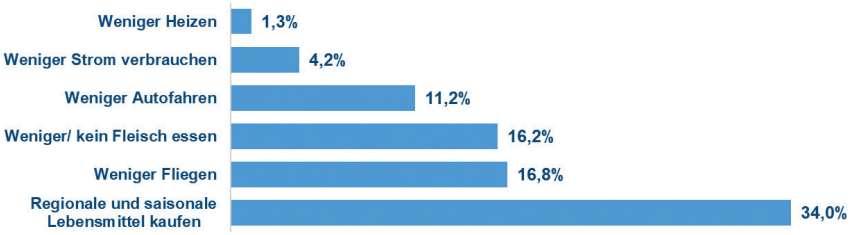
Anhand dieser Berechnungen wird deutlich, dass Käse und Rind mit 24 % und 21 % die beiden größten Auswirkungen gemessen in CO_2-Äquivalenten am Konsum ausmachen. Danach folgen Schwein, Butter und Geflügel mit 16 %, 17 % und 9 %. Sahne, Milch und Eier machen jeweils einen kleinen einprozentigen Anteil aus.

Doch welche Menge des Konsums an tierischen und nicht-tierischen Lebensmitteln ist nachhaltig und zugleich gesund? Bisher gab es keinen globalen Konsens, was eine gesunde Ernährung und eine nachhaltige Lebensmittelproduktion ausmacht. Die EAT-Lancet-Kommission hat in 2019 zum ersten Mal eine „Planetary Healthy Diet“ vorgestellt, die konkrete Berechnungen darlegt, wie eine gesunde und gleichzeitig nachhaltige Ernährung aussehen sollte. Dabei liegen neben dem Ziel der gesunden Ernährung auch verbesserte Lebensmittelpraktiken sowie weniger Lebensmittelabfälle und -verluste zu Grund. Danach sollte der Fleischkonsum pro Kopf bei 15 kg pro Jahr liegen (Willet et al. 2019). Derzeit liegt der Verzehr in Deutschland bei 60 kg. Das würde für den deutschen Durchschnittsverbraucher eine Reduktion von 75 % seines Fleischkonsums ergeben. Aber auch der Konsum anderer tierischer Proteine ist in Deutschland weit von den Zielen, die die EAT-Lancet-Kommission darlegt, entfernt. Zugleich müsste der Verzehr an Vollkornprodukten, pflanzlichen Proteinen, ungesättigten pflanzlichen Ölen zunehmen. Der Konsum an Obst, Gemüse und Nüssen müsste sich sogar verdoppeln (ibid.). Abbildung 3 gibt die Ernährungsempfehlungen der EAT-Lancet-Kommission grafisch wieder.

Quelle: Willet et al. 2019

Abbildung 3: Empfohlene Verzehrsmengen der EAT-Lancet-Kommission

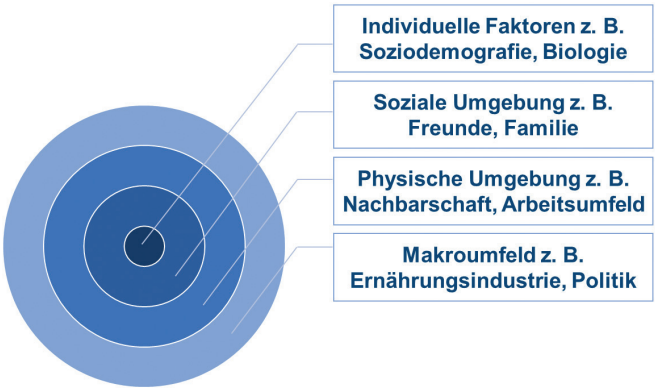
Die Bereitschaft der deutschen Verbraucher*innen, ihr Konsumverhalten hin zu einer nachhaltigen und gesunden Lebensweise zu verändern, ist bei vielen vorhanden. So ergibt beispielsweise eine repräsentative Befragung von FOCUS Online (5.002 Befragte, 2019), dass 34 % aller Verbraucher regionale und saisonale Lebensmittel kaufen würden und 16,2 % weniger oder gar kein Fleisch essen würden. Hingegen würden nur 1,3 % der Befragten weniger heizen und 4,2 % weniger Strom verbrauchen. Abbildung 4 zeigt die Befragungsergebnisse auf.



Quelle: FOCUS online 2019

Abbildung 4: „Zu welchen Klimaschutzmaßnahmen sind Sie bereit?“

Nur ändert sich das Verhalten sehr langsam und schlägt sich bisher in den Statistiken kaum nieder. Woran liegt das? Wir wissen aus Studien, dass das Essen stark habitualisiert ist und Gewohnheiten sich nur schwer ändern lassen. Verbreitete Barrieren zur Verhaltensänderung sind fehlendes Wissen, wie fleischfreie Gerichte zuzubereiten sind, oder verbreitetes Fehlwissen, dass eine fleischarme oder fleischfreie Ernährung zu wenig Protein für eine gesunde Ernährung liefere. Aber auch ganz klar der „gute Geschmack von Fleisch" sind ein Grund, Fleischkonsum nicht oder nur sehr wenig zu reduzieren (Weinrich 2018, Weinrich & Elshiewy 2019). Dabei ist die Ernährungsumgebung ein wesentlicher Einflussfaktor für die Lebensmittelwahl. Nach Story et al. (2008) kann die Ernährungsumgebung in vier Ebenen unterteilt werden. Zunächst bestimmen individuelle Faktoren die Ernährung wie bspw. Soziodemografie oder das persönliche Einkommen. Auf der zweiten Ebene findet sich die soziale Umgebung als Einflussfaktor (Freunde, Familie, Peer Group). Die physische Umgebung wie Nachbarschaft, Einkaufsstätten oder das Arbeitsumfeld haben auf der dritten Ebene einen Einfluss. Auf der äußersten Umgebung findet sich zuletzt das Makroumfeld wie bspw. das Lebensmittelmarketing, die Ernährungsindustrie oder das politische Umfeld. Abbildung 5 zeigt die Ernährungsumgebung im schematischen Überblick.



Quelle: Eigene Darstellung nach Story et al. (2008)

Abbildung 5: Ernährungsumgebung

Die Entscheidungsgrundlage für Verbraucher*innen am Point of Sale wird neben einem habitualisierten Einkaufsverhalten auch durch Informationsvermittlung geprägt. Hier können unterschiedliche Ansätze helfen, das Ess- und Kaufverhalten nachhaltig zu verändern. Schwerpunktartig wird im Folgenden auf die Lebensmittelkennzeichnung in Form von Labelling eingegangen. Abbildung

6 zeigt übersichtlich die verschiedenen Labelsysteme mit Beispielen und den jeweiligen Skalen.

Label System	Detaillierte textliche Informationen	Binäre Label	Mehrstufige Label	Metrische Label
Beispiele	Information über Anbaumethoden	Bio-Label Fairtrade -Label	Zweistufiges Tierwohllabel Hotel Klassifizierung	CO_2-Äquivalente von einem Produkt Energie in kcal
Skala	Nominal	Dichotom	Ordinal	Metrisch

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 6: Labellingsysteme

Während eine textliche Darstellung viel Aufmerksamkeit der Verbraucher*innen benötigt und zugleich viel Platz auf der Lebensmittelverpackung einnimmt, so stellen binäre Label eine dichotome Möglichkeit dar, Informationen über eine positive Besonderheit eines Produktes zu liefern. Der Nachteil eines binäre Labelsystems ist, dass es Informationen zwar vereinfacht darstellt, aber oft nicht die Realität wiederspiegelt, weil es neben einem schwarz-weißen Schema oft noch viele Grauabstufungen gibt. Ein mehrstufiges Label hingegen kann diese Abstufungen für Verbraucher*innen vereinfacht darstellen und somit den sog. „Information Overload“ verhindern. Sehr gute Beispiele für mehrstufige Label, die bereits etabliert sind, sind die Hotelklassifizierung anhand von einem (einfache Unterkunft) bis zu fünf Sternen (Luxushotel) oder die Energieklassenkennzeichnung elektronischer Geräte. Metrische Label wie die Nährwertkennzeichnung geben den Verbraucher*innen zwar mehr Informationen, allerdings fehlt ihnen dann ein Referenzwert um bspw. die Höhe der CO_2-Äquivalente einordnen zu können (Weinrich 2015).

Letztendlich werden Änderungen im Konsumentenverhalten nur langsam und schrittweise stattfinden, wie es derzeit am Fleischverzehr zu beobachten ist. Daher ist es wichtig, zu vermitteln, dass auch kleine Veränderungen im Einkaufs- und Konsumverhalten einen Beitrag zu einer nachhaltigen und gesunden Ernährungsweise jedes Einzelnen beitragen und zusätzliche vereinfachte Informationen am Point of Sale bereitgestellt werden.

Literatur

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2018). Bundesinformationszentrum Landwirtschaft: bzl-datenzentrum.de. https://bzl-datenzentrum.de/versorgung/versorgungsbilanz-fleisch-grafik.

FOCUS online (2019). „Wozu wären Sie, um einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, am ehesten bereit?“ https://www.focus.de/perspektiven/nachhaltigkeit/civey-umfrage-vegetarier-werden-weniger-fliegen-das-wuerden-die-deutschen-fuers-klima-aendern_id_11161513.html.

Global Footprint Network (o. J.). Earth Overshoot Day. https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/

Statista Berechnungen nach GEMIS (Globale Emissions-Modell integrierter Systeme) (2016). https://www.umweltbundesamt.at/angebot/leistungen/angebot-cfp/gemis

Umweltbundesamt (UBA) (2020). Konsum und Umwelt: Zentrale Handlungsfelder. https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/konsum-umwelt-zentrale-handlungsfelder#bedarfsfelder

Van Dooren, C., Marinussen, M., Blonk, H., Aiking, H., Vellinga, P., 2014. Exploring dietary guidelines based on ecological and nutritional values: a comparison of six dietary patterns. Food Policy 44, 36–46Statista Berechnungen nach UBA 2020

Weinrich, R. (2015). Labelling Policies for Food. http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-0028-8654-F.

Weinrich, R. (2018). Cross-cultural comparison between German, French and Dutch consumer preferences for meat substitutes. Sustainability. 10 (6), 1819. https://doi.org/10.3390/su10061819.

Weinrich, R., Elshiewy, O. (2019). Preference and willingness-to-pay for meat substitutes based on algae. Appetite. 142, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.104353.

Willet, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., et al., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet 393, 447–492.https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Autoren (korrespondierend)

PD Dr. Axel Don und Prof. Dr. Heinz Flessa	Thünen-Institut Institut für Agrarklimaschutz Bundesallee 68 38116 Braunschweig
Prof. Dr. Michael Kreuzer[1] und Dr. Melissa Terranova[2], Prof. Marcus Clauss[3]	[1] ETH Zürich Institut für Agrarwissenschaften, Universitätsstraße 2, 8092, Zürich [2] ETH Zürich, AgroVet-Strickhof, Eschikon 27, 8315 Lindau [3] Klinik für Zoo-, Heim- und Wildtiere, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich, Winterthurerstraße 260, 8057 Zürich
Prof. Dr. Karl Hermann Mühling	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät Hermann-Rodewald-Strasse 2 24118 Kiel
Dr. Gerald Rühl, Thomas Kämpfer, Dr. Doreen Gabriel und Prof. Dr. Jörg-Michael Greef	Julius Kühn-Institut Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde Bundesallee 58 38116 Braunschweig
Dr. Reiner Ruser	Universität Hohenheim Fg. Düngung und Bodenstoffhaushalt (340) Fruwirthstraße 20 70599 Stuttgart
Jun.-Prof. Dr. Ramona Weinrich	Universität Hohenheim Institut für Agrarpolitik und Landwirtschaftliche Marktlehre Wollgrasweg 49 70599 Stuttgart

Referenten ohne Autorenbeiträge:

Bernhard Osterburg, Thünen-Institut
Klimaschutz mit Land- und Forstwirtschaft

Prof. Dr. Klaus Dittert, Georg-August-Universität Göttingen
Die Rolle von Fruchtfolgen und Zwischenfrüchten für den Klimaschutz
-kein Beitrag-

Dr. Annette Freibauer, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising
Klimaschutz durch Moorbodenschutz

Prof. Dr. Jürgen Bauhus, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Erhalt der CO_2-C Senkenfunktion der Waldökosysteme in Deutschland

Prof. Dr. Eva Gallmann, Universität Hohenheim
Emissionsminderung Tierhaltung durch verfahrenstechnische Ansätze

Prof. Dr. Hermann H. Swalve, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Züchterische Ansätze zur Emissionsminderung in der Nutztierhaltung
-kein Beitrag-

Dr. Gérard Gaillard, Agroscope, Zürich
Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft

In der Schriftenreihe *agrarspectrum* sind noch folgende Bände erhältlich:

Band 46
Klimawandel und Extremwetterereignisse: ein Problem für die Landwirtschaft?
2013; 162 Seiten, Broschüre, € 19,90

Band 47
Trends in der Landwirtschaft – quo vadis Agrarwissenschaften?
2015; 98 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 48
Bioökonomie: Welche Bedeutung haben die Agrar- und Forstwissenschaften?
2016; 122 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 49
Nutztierhaltung: Herausforderungen und Implikationen für die Forschung
2017; 126 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 50
Zukunft des Pflanzenschutzes
2018; 98 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 51
Lebensmittelsicherheit:
Fakten aus der Wissenschaft
2018; 92 Seiten, Broschüre, € 12,90

Band 52
Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss
2019; 84 Seiten, Broschüre

Band 53
Ökologisierung der Landwirtschaft
2021; 50 Seiten, Broschüre