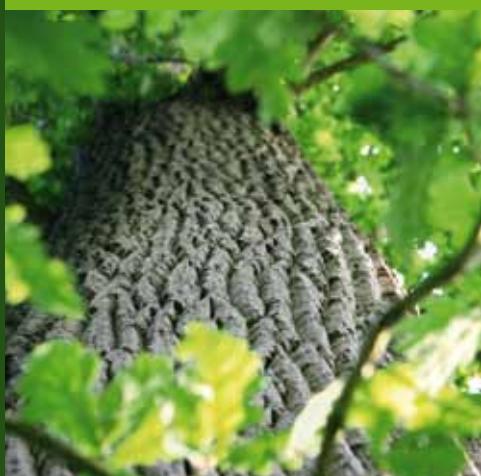


Landbauforschung

Applied Agricultural and Forestry Research

Vol. 63
No. 2 · 06.2013



Landbauforschung

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* ist eine wissenschaftliche Zeitschrift, in der Forschungsergebnisse zu gesellschaftlich relevanten Themen veröffentlicht werden, die einen Bezug zur Landwirtschaft, zur Forstwirtschaft und zur ländlichen Entwicklung aufweisen. Die Zeitschrift ist damit explizit disziplinenübergreifend ausgerichtet.

Erwünscht sind insbesondere anwendungsorientierte wissenschaftliche Beiträge, die interdisziplinär angelegt sind oder die ausgeprägte Bezugspunkte zu anderen Fachdisziplinen aufweisen.

Der geographische Fokus der Zeitschrift liegt auf Deutschland und Europa.

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* wird vom Thünen-Institut herausgegeben und erscheint vierteljährlich. Die Beiträge unterliegen einer doppelt-anonymen Begutachtung (double blind peer review). Sie können in Englisch oder Deutsch verfasst sein.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren/Autorinnen verantwortlich. Eine Haftungsübernahme durch die Redaktion erfolgt nicht.

Mit der Einsendung von Manuskripten geben die Verfasser/Verfasserinnen ihre Einwilligung zur Veröffentlichung. Die von den Autoren/Autorinnen zu beachtenden Richtlinien zur Einreichung der Beiträge sind unter www.ti.bund.de/landbauforschung oder bei der Geschäftsführung erhältlich.

Indexiert in: CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents – Agriculture, Biology & Environmental Sciences, Scopus, Web of Science.

Herausgeber
Johann Heinrich von Thünen-Institut

Schriftleitung
Prof. Dr. Andreas Bolte,
Prof. Dr. Peter Weingarten

Geschäftsführung
Dr. Matthias Rütze
Tel. +49 (0) 40 - 73962 247
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg, Germany
landbauforschung@ti.bund.de
www.ti.bund.de

Grafikdesign und Satz
Karin Tamoschat-Depolt, Thünen-Institut

Fotos Umschlagseite
Katja Seifert, Thünen-Institut (2),
Michael Welling, Thünen-Institut (1)

ISSN 0458-6859

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

Alle Rechte vorbehalten.

Applied Agricultural and Forestry Research

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* is a scientific journal, concerning about the latest research results of socially relevant issues related to agriculture, forestry and rural development. The journal is targeted explicitly to interdisciplinary topics.

Particularly welcome are application-oriented scientific contributions with an interdisciplinary approach or have a close connection with other research areas.

The geographical focus of the journal is Germany and Europe.

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* is published by the Thünen Institute and appears quarterly. Contributions are subject to a double blind peer review. Articles may be written in English or German.

Authors are responsible for the content of their articles. The publishers are not liable for the content.

With the submission of a manuscript, the authors grant permission for publication. The guidelines for the submission of manuscripts can be found under www.ti.bund.de/landbauforschung or obtained from the publishers.

Indexed in: CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents – Agriculture, Biology & Environmental Sciences, Scopus, Web of Science.

Publisher
Johann Heinrich von Thünen Institute

Editor in Chief
Prof. Dr. Andreas Bolte,
Prof. Dr. Peter Weingarten

Managing Editor
Dr. Matthias Rütze
Phone +49 40 - 73962 247
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg, Germany
landbauforschung@ti.bund.de
www.ti.bund.de

Graphic Design and Typesetting
Karin Tamoschat-Depolt, Thünen Institute

Photos cover pages
Katja Seifert, Thünen Institute (2),
Michael Welling, Thünen Institute (1)

ISSN 0458-6859

Printed on FSC-certified paper

All rights reserved.

Inhalt

Content

- Sascha A. Weber, Petra Salamon und Heiko Hansen
**Volatile Weltmarktpreise von Milchprodukten und ihr Einfluss auf die nationale Preisbildung:
Der deutsche Käsemarkt**
Volatile world market prices for dairy products and their influence on domestic price formation:
The German cheese market
103
- Karsten Mohr und Ulrich Dämmgen
**Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung
von Tierhaltungsanlagen Teil 1. Bestimmung und Bewertung von Dosis-Größen**
Ammonia and ammonium loads to forests in Northwest Niedersachsen in the vicinity of animal houses
115 Part 1. Assessment and validation of doses
- Karsten Mohr und Ulrich Dämmgen
**Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung
von Tierhaltungsanlagen Teil 2. Wirkungen auf Böden und Vegetation**
Ammonia and ammonium loads to forests in Northwest Niedersachsen in the vicinity of animal houses
129 Part 2. Effects on soils and vegetation
- Inka-Donata Niehoff, Liane Hüther, Peter Lebzien and Gerhard Flachowsky
**The effect of a Niacin supplementation to different diets on ruminal fermentation and flow of nutrients
to the duodenum of dairy cows**
Der Einfluss einer Niacin Zulage zu unterschiedlichen Rationen auf die Pansenfermentation und den
Nährstofffluss am Duodenum von Milchkühen
143
- Sandra Rose-Meierhöfer, Ulrich Ströbel, Andy Bauermeister, Christin Jaroszynski, Christian Ammon und Reiner Brunsch
**Einfluss von Drosselventilquerschnittsfläche und Durchflussmenge auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze
bei viertelgetrennten Melksystemen**
Effects of cross-sectional area in a vacuum control valve and flow rate on the teat-end vacuum in individual quarter
milking systems
155
- Elena Ilișiu, Stelian Dărăban, Răducu Radu, Ioan Pădeanu, Vasile-Călin Ilișiu, Constantin Pascal and Gerold Rahmann
The Romanian Tsigai sheep breed, their potential and the challenges for research
Die rumänische Schafrasse Tsigai, ihr Potenzial und die Herausforderungen für die Forschung
161
- Rainer Duttmann, Joachim Brunotte und Michaela Bach
**Evaluierung der schlaginternen Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen
für den Praktiker**
Evaluation of soil stress due to field traffic and development of a decision support tool
171
- Bekete Eshetu, Kai-Uwe Eckhardt and Peter Leinweber
**Soil organic matter alterations by short-term composted coffee pulp waste: evidence from pyrolysis-field
ionisation mass spectrometry**
Einfluß kompostierter Kaffeebrühe-Abfälle auf die organische Bodensubstanz: Untersuchungen mit
Pyrolyse-Feldionisation Massenspektrometrie
191

Volatile Weltmarktpreise von Milchprodukten und ihr Einfluss auf die nationale Preisbildung: Der deutsche Käsemarkt

Sascha A. Weber*, Petra Salamon* und Heiko Hansen**

Zusammenfassung

Aufgrund der schrittweisen Senkung der Interventionspreise und der Aussetzung von Exporterstattungen der Europäischen Union wurde die weitgehende Abkopplung des EU-Binnenmarktes für Milchprodukte vom Weltmarkt deutlich abgeschwächt. Preisschwankungen des Weltmarktes können so auf allen Ebenen des Binnenmarktes wirken. In bisherigen Studien zur Preistransmission von Milch und Milchprodukten standen die Beziehungen zwischen Einzelhandel und Erzeuger bzw. Erzeuger und Weltmarkt im Vordergrund. Eine vollständige Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette fand nicht statt.

Das Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die Entwicklung der Milchpreise über die gesamte Kette hinweg – vom Milcherzeuger bis zum Einzelhandel/Verbraucher bzw. Weltmarkt – zu untersuchen. Für die Analyse werden monatliche Daten des Zeitraums Januar 1997 bis Oktober 2011 verwendet. Durch Anwendung verschiedener Spezifikationen von Fehlerkorrekturmodellen werden Asymmetrien analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass enthaltene Saisoneffekte durch die Preispolitik des Einzelhandels ausgeglichen werden. Allerdings gewinnt die Saisonalität auch bei den internationalen Preisen an Bedeutung. Dies lässt sich auf einen höheren Anteil der graslandbasierten Milchproduktion im internationalen Handel zurückzuführen. Zu sehen ist auch, dass sich Zeitverzögerungen, mit denen Preisänderungen zwischen den Marktstufen der Wertschöpfungskette weitergegeben werden, unterscheiden. Es liegen also Asymmetrien vor.

Schlüsselworte: Preistransmission, Milchmarkt, Wertschöpfungskette, Stützungsabbau

Abstract

Volatile world market prices for dairy products and their influence on domestic price formation: The German cheese market

The foreclosure of the internal milk market has been significantly reduced with the stepwise reduction of intervention prices and the suspension of export refunds of the European Union. Thus, price developments of the world market could now affect all levels of supply chain.

Previous studies on price transmission of milk and milk products refer to the relationship between retail and producers or producers and world markets. Therefore, the objective of this paper is to analyse price transmission along the total supply chain. With a focus on the German cheese market. For the analysis monthly data is used ranging from January 1997 to October 2011. Applying different error correction model specifications asymmetries are analysed.

The results indicate that retailers balance seasonal variations of producers' and wholesalers' prices. In addition, it can be noted that seasonality is becoming increasingly important for international prices due to higher shares of grassland based milk production. It can also be shown that the time lags in which price changes are passed on between the different levels differ. Thus, within the supply chain of milk and milk products there exist price asymmetries.

Keywords: price transmission, dairy market, supply chain, producer support

* Thünen-Institut für Marktanalyse, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

** Thünen-Institut für Betriebswirtschaft, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Kontakt: sascha.weber@ti.bund.de

1 Einleitung

Der Markt für Milch gehört zu einem der bedeutendsten Agrarmärkte in Deutschland. Gemessen am Produktionswert der landwirtschaftlichen Erzeugung insgesamt hat Milch 2010 einen Anteil von etwa 20 % (BMELV 2011, S. 164). In der Europäischen Union (EU) wies der Milchsektor in der Vergangenheit ein hohes Außenschutz- sowie internes Unterstützungs niveau durch die Gemeinsame Marktordnung auf, während zeitgleich das Milchangebot durch eine Quotenregelung beschränkt wurde. Aufgrund der relativ hohen Importzölle war der europäische Milchmarkt vom Weltmarkt abgeschottet. Exporte wurden mittels Exporterstattungen soweit verbilligt, dass sie mit Angeboten aus Drittländern konkurrieren konnten. Beginnend mit der Agenda 2000, gefolgt von den Luxemburger Beschlüssen 2003 und dem Gesundheitscheck 2007, wurde die Marktstützung auch im Milchsektor neu strukturiert. Grundsätzlich wurde die gekoppelte Marktpreisstützung in Form von Interventionspreisen für Butter und Magermilchpulver zugunsten entkoppelter Zahlungen an die Milcherzeuger schrittweise reduziert. Die erste Senkung der Interventionspreise fand 2005 statt. Zusätzlich wurden die Mengen für Interventionsankäufe beschränkt und der Ausstieg aus der Milchquotenregelung für 2014/15 bekanntgegeben. Dabei soll der Ausstieg aus der Milchquote als „sanfte Landung“ stattfinden. Dies wird durch eine jährliche einprozentige Erhöhung der nationalen Quotenmengen¹ erreicht, welche einen kontinuierlich abnehmenden Milchquotenpreis induzieren soll.

Obwohl in der Vergangenheit Exportsubventionen für europäische Milcherzeugnisse gezahlt wurden, um den Binnenmarkt von überschüssigen Mengen zu entlasten, führte dies nur zeitweise zu einem gestiegenen EU-Anteil im internationalen Handel mit Milchprodukten. Denn während die EU-Binnenmarktnachfrage stieg, war für die milchverarbeitenden Unternehmen² das Ausgangsprodukt Rohmilch durch das Milchquotenregime begrenzt. In anderen für den internationalen Handel bedeutenden Produktionsregionen bestanden solche Restriktionen nicht, so dass der Handelsanteil vor allem der Erzeugerländer mit graslandbasierten Produktionssystemen wie Neuseeland, Australien, Ländern in Südamerika, aber auch der Vereinigten Staaten von Amerika gestiegen ist. Daneben führten das globale Wirtschaftswachstum und die damit vor allem in Schwellenländern gestiegene Nachfrage nach Milchprodukten zu steigenden Weltmarktpreisen. Diese gestiegene Nachfrage wurde überwiegend durch die graslandbasierte Milchproduktion befriedigt, welche jedoch sehr anfällig gegenüber sich verändernden Wetterverhältnissen ist. Aus diesem Grund weisen internationale Preise für Milch und Milchprodukte hohe Preisschwankungen auf, die sich auf die nationalen Märkte der EU übertragen.

Das geringere Stützungs niveau für Interventionsprodukte hat auf dem deutschen Markt für Milch und Milchprodukte zu einer Verschiebung von Produktionstrends geführt. Unter dem umfassenden Interventionssystem für Butter und Magermilchpulver wurden Milchüberschüsse in der Regel zu diesen beiden Interventionsprodukten verarbeitet. Mit dem Abbau der internen Stützungsmaßnahmen haben sich die Verarbeitungsstrukturen zugunsten einer stabil wachsenden Käseproduktion verschoben, in deren Rahmen auch in gewissem Umfang zusätzliche Milchmengen verarbeitet werden. In Deutschland wird diese Entwicklung durch eine hohe heimische Nachfrage nach Käse und durch eine relative saisonale Knappheit des Rohmilchangebots im Herbst/Winter gestützt. Daher wird dem Verlauf des Käsepreises immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Es ist festzustellen, dass mittlerweile mehr als ein Drittel des Rohmilchangebots zu Käse weiterverarbeitet wird. Die Preisbildung für Käse hat somit einen dauerhaften Einfluss auf die Erzeugerpreise für Rohmilch.

Es ist daneben festzustellen, dass die Großhandelspreise für Käse stärker schwanken als in der Vergangenheit. Wenn die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet wird, zeigt sich, dass Einzelhandelspreise weniger volatil sind als Milcherzeugerpreise. Der deutsche Lebensmitteleinzelhandel (LEH) ist durch eine hohe Konzentrationsrate und durch eine vorherrschende Stellung der Discounter gekennzeichnet. Letztere haben in den Preisverhandlungen mit den Molkereien bzw. Großhändlern eine Verhandlungsführerschaft. Daraus wird abgeleitet, dass der LEH das Preisniveau der Molkereien beeinflusst. Letztgenannte wiederum geben Preisentwicklungen an die Milcherzeuger weiter. Diese Beobachtung verleitet zu der Annahme, dass Einzelhändler sinkende Erzeugerpreise nicht vollständig an Verbraucher weitergeben und umgekehrt. Es liegt also scheinbar eine Preisasymmetrie vor (Kinnucan und Forker, 1987; Azzam, 1999; Serra und Goodwin, 2002). Darauf aufbauend leiten sich Diskussionen über Marktmacht, Handelsspannen und die Preistransmission in Wertschöpfungsketten ab. So wurden beispielsweise in Deutschland Anhörungen durch den Bundestag (Deutscher Bundestag, 2010) bzw. in Australien durch den Senat (Senate, 2010) zu diesem Thema abgehalten.

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass volatile Weltmarktpreise vor allem das Preisniveau auf den unteren Stufen der Wertschöpfungskette negativ beeinflussen. Es kann nicht nur zu den beschriebenen Preisasymmetrien zwischen den einzelnen Marktstufen kommen, sondern es sind auch Unterschiede im Zeitrahmen denkbar, mit denen Preisänderungen an nach- bzw. vorgelagerte Stufen weitergegeben werden.

Die Preistransmission für Milch und Milchprodukte wurde bereits in zahlreichen Studien analysiert, wobei die meisten dieser Studien die Ebene des LEH bzw. der Verbraucher berücksichtigen und einen speziellen Fokus auf Vollmilch³ legen. Diese Studien abstrahieren von Effekten weiterer in

¹ Für Italien wurde dies in einem einzigen Schritt durchgeführt.

² Zur Vereinfachung werden im weiteren Verlauf des Beitrags die milchverarbeitenden Unternehmen als Molkereien bezeichnet.

³ Beispielsweise in Kinnucan und Forker (1987), Serra und Goodwin (2002) oder Capps und Sherwell (2005).

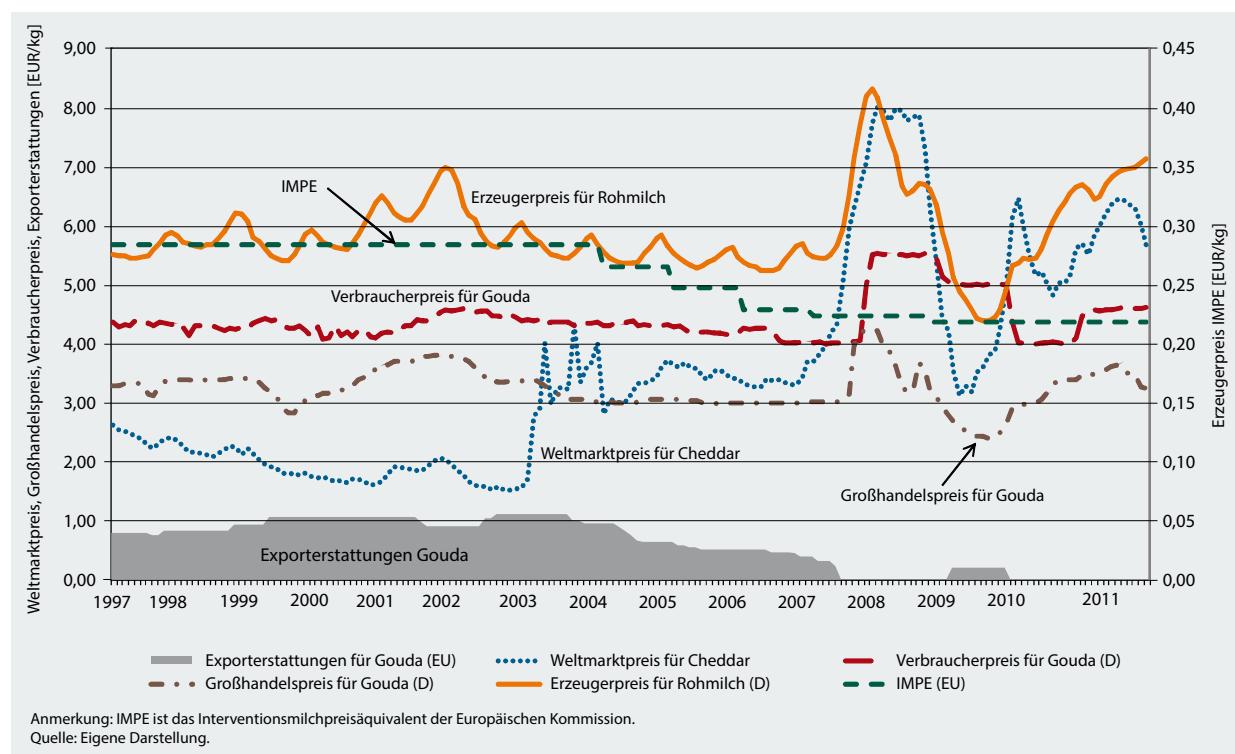


Abbildung 1

Entwicklung der Preise für Käse auf verschiedenen Marktstufen und der Erzeugerpreise Rohmilch zwischen 1997 und 2011

der Wertschöpfungskette beteiligter Marktstufen (Großhandel und Weltmarkt). Das Ziel dieses Beitrags ist es daher, die Preistransmission für Milch bzw. Milchprodukte von der Erzeugung bis hin zum LEH zu analysieren und eventuell vorhandene Asymmetrien zu identifizieren. Dabei wird insbesondere der Zeitrahmen für die Weitergabe von Preisänderungen zwischen den Marktstufen untersucht. Zudem soll die Wirkung schwankender Weltmarktpreise auf die deutsche Wertschöpfungskette Milch analysiert werden.

2 Preise für den deutschen Käsemarkt

Da in dem vorliegenden Beitrag Beziehungen und Korrelationen zwischen monatlichen Preisen von Milch und Milchprodukten verschiedener Marktstufen betrachtet werden, wird die Analyse zur Vereinfachung auf ein Produkt konzentriert – Käse. Nachfolgend werden die Preisentwicklungen auf dem Weltmarkt sowie dem deutschen Markt für Käse dargestellt und die für die Schätzungen verwendeten Daten kurz beschrieben.

Die Entwicklung des Weltmarktpreises für Käse sowie des deutschen Erzeugerpreises für Rohmilch ist in Abbildung 1 dargestellt. Des Weiteren werden EU-Exporterstattungen und das Interventionsmilchpreisäquivalent⁴ (IMPE) der EU-

Kommission betrachtet. Zusätzlich zu internationalen Preisen werden die Stufe des Großhandels und der Verbraucher in die Analyse einbezogen, um die maßgeblichen Marktstufen der Wertschöpfungskette Käse abzubilden. Die Beobachtungsperiode erstreckt sich von Januar 1997 bis Oktober 2011.

Die verwendeten Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen, die im Folgenden beschrieben werden. Zeitreihendaten für Käsepreise auf Ebene des Weltmarktes, welche zugleich ausreichende Handelsmengen über einen längeren Zeitraum repräsentieren, stehen nur für Cheddar aus Ozeanien⁵ zur Verfügung. Diese internationalen Preise sind jedoch für einen exportwilligen deutschen Milchverarbeiter weniger relevant, da sie nicht dem tatsächlich relevanten Weltmarktpreis für den Export entsprechen. Die Binnenmarktpreise der EU sind vom Weltmarkt isoliert, da Importzölle Milcherzeugnisse aus Drittländern verteuern und Exporterstattungen, sofern sie gezahlt wurden, für EU-Exporte eine Anhebung des niedrigeren Weltmarktpreisniveaus bedingen. Um Weltmarktpreise zu erhalten, die mit dem Preisniveau in Deutschland bzw. der EU vergleichbar sind, werden dem Preis für Cheddar die Exporterstattungen der EU für Käse⁶ hinzugefügt. Dies würde dem Preis der EU-Exporteure entsprechen, den diese im Export theoretisch erzielen könnten. Bei

⁴ Dieses setzt sich zusammen aus dem Ankaufspreis für Butter in die Intervention (Interventionspreis x 0,9) und dem Interventionspreis für Magermilchpulver. Für die Berechnung werden außerdem Herstellungskosten und Herstellungsgewinne berücksichtigt.

⁵ Die Preise werden von Gould, University of Madison, beobachtet und über die Interseite „Understanding Dairy Markets“ (<http://future.aee.wisc.edu/>) zur Verfügung gestellt.

⁶ Historische Zeitreihen für Exporterstattungen sind z. B. in CAP monitor (2011) erhältlich.

Käse war und ist die EU, insbesondere Deutschland, ein Nettoexporteur; daher sind Exportpreise bestehend aus Weltmarktpreisen zuzüglich Exporterstattungen für die Analyse der Preisbeziehungen relevant.

In Deutschland ist die Handelsmenge von Cheddar jedoch gering und es findet keine amtliche Preisnotierung statt. Neben Emmentaler hat in Deutschland vor allem Gouda einen hohen Anteil in der Käseerzeugung und dem Käsekonsum. Für beide Käsesorten werden die Produktpreise amtlich notiert. Jedoch weist die Zeitreihe für Emmentaler 2004 einen Bruch auf. Ab diesem Zeitpunkt wird die Zeitreihe getrennt für „Emmentaler am Stück“ und für „Emmentaler an der Bedientheke“ ausgewiesen. Die Werte beider Reihen korrespondieren nicht mit früheren Werten. Daneben wird Emmentaler als ein typischer Hartkäse eher in der industriellen Weiterverarbeitung verwendet als zum direkten Konsum. Gouda ist dagegen als ein typischer halbfester Käse bei den Verbrauchern zum direkten Verzehr sehr gefragt. Aus diesen Gründen wurde Gouda für die Untersuchung der Käsepreise in Deutschland auf Ebene des Großhandels und der Verbraucher ausgewählt. Für den Großhandel werden Goudapreise an der offiziellen Käsebörse in Kempten⁷ festgestellt. Verbraucherpreise für Gouda und Erzeugerpreise für Rohmilch werden durch ZMP bzw. AMI veröffentlicht. Alle Preise sind auf einer monatlichen Basis in Euro pro Kilogramm dargestellt oder wurden mit dem offiziellen monatlichen Wechselkurs in Euro umgerechnet.

Seit 2005 haben wesentliche strukturelle Veränderungen in der Europäischen Union den Verlauf der Preisreihen beeinflusst, die im Folgenden erläutert werden (s. auch Abbildung 1). Daher spiegelt der Verlauf des Großhandels-, des Verbraucher- und des Erzeugerpreises neben anderen Faktoren⁸ die Anpassungen in der EU-Milchmarktregulierung wider. So führten 2003 z. B. die Luxemburger Beschlüsse zu erheblichen Änderungen in der Marktordnung für Milch in Form verminderter Marktstützungsmaßnahmen, wie die Senkung der Interventionspreise für Butter und Magermilchpulver. Zusätzlich wurde die Menge für die Intervention reduziert und der Ausstieg aus der Milchquotenregelung beschlossen. Die Folgen eines auslaufenden Milchquotenregimes sollen durch eine stufenweise jährliche Erhöhung der nationalen Quotenmengen⁹ abgemildert werden, um eine schrittweise Annäherung an die Situation ohne Quote zu ermöglichen. Für die Milcherzeuger wurde als Ausgleich für den Abbau der Marktstützung die Milchprämie eingeführt, welche anschließend in die entkoppelten Direktzahlungen integriert wurde.

⁷ Aufgrund einer Neuordnung der amtlichen Notierung im Dezember 2011 für Käse erfolgt die Preisfeststellung für Gouda und Edamer durch die Amtliche Preisnotierungskommission für Butter und Käse in Hannover und die der übrigen amtlich notierten Käsepreise an der Süddeutschen Butter- und Käsebörse in Kempten.

⁸ Andere Faktoren sind z. B. die Entwicklung der Anzahl Betriebe mit Milchkühen, der Anzahl Milchkühe pro Betrieb, der Anzahl milchverarbeitender Unternehmen etc.

⁹ Dies wird als „soft landing“ bezeichnet. Für Italien wurde 2007 eine Sonderregelung beschlossen. Hier wurde die Erhöhung in einem einzigen Schritt durchgeführt.

Während in der Periode vor 2004 keine hohen Preisschwankungen beobachtbar waren, auch nicht auf Weltmarktebene, hat sich die Situation nach 2004 grundlegend geändert. Aufgrund der Senkung des Unterstützungs niveaus in der EU sind der Weltmarkt und der EU-Markt stärker miteinander verbunden, so dass heimische Preise nun stärker variieren können. Jedoch hatte die Preishausse aus dem Jahr 2007 ihren Ursprung weniger in den Änderungen der EU-Politiken als eher in einem ungenügenden weltweiten Milchangebot. Ursächlich für die Versorgungslücke waren eine verminderte Milchproduktion in Ozeanien und Südamerika aufgrund ungünstiger Witterungsbedingungen bei gleichzeitig niedrigen Lagerbeständen von Butter und Magermilchpulver in der Welt bzw. insbesondere in der EU. Verstärkt wurde diese Knappheit durch eine vor allem in Schwellenländern erhöhte Nachfrage nach Milch und Milchprodukten. Durch das weltweite ökonomische Wachstum entwickelte sich gerade in diesen Ländern eine aufstrebende Mittelschicht, die nach neuen Produkten und einer größeren Produktvielfalt verlangte. Daher stand ein niedrigeres Milchangebot einer steigenden Nachfrage nach Milch und Milchprodukten gegenüber und führte so zu den beobachteten Preissteigerungen. Die entstandene Versorgungslücke zwischen Angebot und Nachfrage konnte aufgrund fehlender Lagerbestände nicht ausgeglichen werden. Das niedrigere Schutzniveau des EU-Marktes erlaubte, dass diese Preissteigerungen nun direkteren Einfluss auf die heimischen Preise in der EU nehmen konnten und dort ebenfalls zu stark ansteigenden Preisen führten. Im Zeitablauf erholte sich das Milchangebot und die Nachfrage nach Milch und Milchprodukten ging nicht nur wegen der höheren Preise, sondern auch durch die Folgen der Finanz- und Wirtschaftskrise, zurück. So kam es 2009 zu der Preisbaisse. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, haben bis 2007 Veränderungen auf Ebene des Weltmarktes nicht wirklich zu den theoretisch erwarteten Anpassungen auf den nachgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette geführt. In der sich anschließenden Periode bis 2011 wurde die Nachfrage nach Milch und Milchprodukten erneut durch einerseits niedrige Produktpreise und andererseits durch die sich erholende Weltwirtschaft stimuliert. Die Nachfrage nach Milch und Milchprodukten ist dabei besonders in den Schwellenländern wieder erstarkt.

3 Methoden und Theorie

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Analyseschritte und deren zugrundeliegende Theorie kurz diskutiert.

Bevor die eigentliche Analyse durchgeführt werden kann, müssen einige vorbereitende Schritte im Zusammenhang mit den Zeitreihendaten vorgenommen werden.

3.1 Saisonalität

Preisreihen, die nicht auf jährlicher Basis vorliegen, enthalten oftmals eine saisonale Komponente, um die sie bereinigt werden müssen. In der vorliegenden Analyse kann angenommen werden, dass der Erzeugerpreis für Rohmilch eine

starke saisonale Preisbewegung aufweist. Diese Preisbewegung wird maßgeblich durch den Produktionsverlauf bedingt. Auf Saisonalität wird mittels des Census X-12-ARIMA Verfahrens getestet und gegebenenfalls mit diesem diese auch entfernt. Entwickelt wurde es von der US-amerikanischen Statistikbehörde (U.S. Census Bureau) und wird von einer großen Zahl nationaler Behörden verwendet. Durch die Anwendung gleitender Durchschnittsfilter werden die zentralen Komponenten einer Zeitreihe (Trend und Saisonalität) geschätzt (Findley und Hood, 1999). Die saisonale Komponente wird dann aus den ursprünglichen Daten entfernt.

Für die beobachteten Preisreihen wird eine multiplikative Struktur angenommen. Das bedeutet, dass sich die Größenordnung der saisonalen Bewegung proportional mit dem Niveau der Reihe ändert (U.S. Census Bureau, 2011: 193). Folglich werden der Trend (T_t), die saisonale Komponenten (S_t) und der Rest (R_t) durch die folgende multiplikative Funktion repräsentiert¹⁰:

$$X_t = T_t \cdot S_t \cdot R_t \quad (1)$$

Der Rest (R_t) kann in weitere Unterkomponenten aufgeteilt werden:

- i) Änderungen in der Anzahl von Handelstagen pro Monat sowie von Feiertagen (Kalendereffekte) (P_t) und
- ii) dem übrigen Rest (I_t), der durch alle anderen Faktoren hervorgerufen wird (CBS, o.J.):

$$R_t = I_t \cdot P_t \quad (2)$$

Daraus folgt,

$$X_t = T_t \cdot S_t \cdot I_t \cdot P_t \quad (3)$$

Um die Qualität der Anpassungen des Verfahrens beurteilen zu können, wurde eine Teststatistik Q entwickelt. In ihr fließen Ergebnisse aus 11 einzelnen Teststatistiken zusammen. Jede Statistik wird mit einem Faktor gewichtet, der in Abhängigkeit ihrer relativen Bedeutung für die Gesamtgüte der Anpassung gewählt ist. Wenn der Q Werte größer als eins annimmt, ist die Anpassung als „nicht akzeptabel“ anzusehen. Dies gilt auch, wenn der Test auf identifizierbare Saisonalität versagt (Lothian und Morry, 1978). Daraus ist zu folgern, dass im jeweils vorliegenden Datensatz keine signifikant messbare Saisonalität vorhanden ist.

3.2 Stationarität

Oftmals enthalten Preisreihen nicht nur eine saisonale Komponente, sondern weisen auch einen Trend auf. In diesem Fall wird die Reihe als nicht-stationär bezeichnet und kann nicht für ökonomische Vergleiche verwendet werden (Green, 2008: 739). Denn mögliche Beziehungen zwischen zwei Reihen können in einer solchen Situation nicht genau identifiziert werden und zudem besteht die Gefahr der Identifikation von Scheinkorrelationen.

¹⁰ Details zur Methode werden in Shiskin et al. (1967) präsentiert.

Eine Zeitreihe wird als stationär bezeichnet, wenn deren Mittelwert und Autokovarianzen nicht von der Zeit abhängen, d. h. die Korrelation zwischen einer Zeitreihe und verzögerten Werten dieser Reihe hängen einzig von Länge der Zeitverzögerung ab und nicht davon, wann die Zeitreihe beginnt (Ramanathan, 2002: 472). Daraus folgt, dass der Prozess, der eine stationäre Zeitreihe hervorruft, zeitunabhängig ist. Eine stationäre Zeitreihe wird als integriert mit der Ordnung Null bzw. $I(0)$ bezeichnet. Eine nicht-stationäre Zeitreihe kann mittels Differenzieren in eine stationäre Reihe transformiert werden. Wenn eine Reihe nach Bildung von d Differenzen stationär ist, dann ist die Ursprungsreihe integriert vom Grad d bzw. $I(d)$. Ein einfaches Beispiel einer nicht-stationären Reihe ist der „random walk“ (siehe Cuthbertson et al., 1992: 3):

$$X_t = X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4)$$

mit ε_t als einen stationären zufälligen Störterm. Diese Art Reihe ist eindeutig $I(1)$. Der Grad der Integration entspricht immer der Anzahl der Einheitswurzeln, die in der Zeitreihe enthalten sind bzw. der Anzahl an Differenzierungen, die erforderlich sind, um eine Reihe stationär zu machen (Green, 2008: 740). Die formale Methode, um die Stationarität einer Zeitreihe zu überprüfen, ist der Einheitswurzeltest. Dickey und Fuller (1979) haben als erste einen Test präsentiert, der auf $AR(1)$ Prozesse anwendbar war. Dieser Test kann auf Zeitreihen mit Drift

$$\Delta X_t = \alpha + \delta X_t + \varepsilon_t \quad (5)$$

und auf Zeitreihen mit Drift und einem zusätzlichen linearen deterministischen Trend angewendet werden:

$$\Delta X_t = \alpha + \beta_t + \delta X_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

Der Vorteil des erweiterten Dickey-Fuller Tests ist, dass dieser im Gegensatz zum Standard-Dickey-Fuller-Test mit autoregressiven Prozessen höherer Ordnung in ε_t umgehen kann (Greene, 2008: 751). Die dazugehörige Regressionsgleichung nimmt die kanonische Form

$$\Delta X_t = \alpha + \beta_t + \delta X_t + \sum_{j=1}^p \delta_j \Delta X_{t-j} + \varepsilon_t \quad (7)$$

an, wobei p der vorher gewählten Anzahl an Verzögerungen der Residuen entspricht¹¹. Da hierbei die t-Verteilung der t-Statistik nicht zulässig ist, haben Engle und Granger (1987) entsprechende kritische Werte abgeleitet.

3.3 Kointegration

Im Allgemeinen entwickeln sich ökonomische Zeitreihen nicht unabhängig voneinander. Mit Hilfe des Konzepts der Kointegration können die Beziehungen zwischen ökonomischen Reihen veranschaulicht werden. Dieses Konzept ist

¹¹ Für tiefergehende Details zur Theorie dieses Testverfahrens siehe Dickey und Fuller (1979).

dabei eng mit dem der Stationarität verbunden. Zum einen, wenn in beiden Zeitreihen ein Trend vorhanden ist, besteht die Gefahr der Identifikation von Scheinkorrelationen. Zum anderen müssen Zeitreihen die gleiche Integrationsordnung aufweisen, damit der Test auf Kointegration durchgeführt werden kann.

Zwei nicht-stationäre Zeitreihen können eine bestimmte Linearkombination aufweisen, die stationär ist:

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + \varepsilon_t \quad (8)$$

Nach Umformung wird deutlich, dass der zufällige Störterm ε_t eine Linearkombination der beiden integrierten und nicht-stationären Reihen Y_t und X_t ist:

$$\varepsilon_t = Y_t - \alpha - \beta X_t \quad (9)$$

Aus Gleichung 9 wird deutlich, dass ε_t ebenfalls integriert ist. Wenn jedoch Parameter von α und β existieren, so dass ε_t stationär ist, dann werden beide Reihen als kointegriert bezeichnet (Engle und Granger, 1987). Kurzfristig sind Abweichungen vom Gleichgewicht möglich, langfristig werden die kointegrierten Reihen nicht zu weit auseinander driften. Die kurzfristigen Abweichungen von der beobachtbaren langfristigen Beziehung kann mit Fehlerkorrekturmodellen modelliert werden (Kraft und Schneider, 2004: 1548).

Johansen (1988) entwickelte ein Testverfahren, um Zeitreihen auf Kointegration zu überprüfen¹². Die Basis dieses Tests bildet das multivariate vektorautoregressive Modell – VAR-Modell (Johansen, 1988: 234).

3.4 Kausalität nach Granger

Ausgehend von einem Nachweis von Kointegration zwischen zwei Zeitreihen kann nicht geschlossen werden, wie sich die beiden Reihen kausal beeinflussen. Granger (1969) war einer der ersten, der versuchte, einen Test für die Richtung der Kausalität zu entwickeln. Es folgten eine Reihe von Alternativen zu diesem Ansatz¹³. Granger fragte, ob die Reihe X die Reihe Y bedingt und wie viel des aktuellen Y durch vergangene Werte von X erklärt werden können und ob der Einbezug verzögter Werte von X die Erklärungsgüte erhöht. Wenn X zu der Vorhersage von Y beiträgt, dann wird gesagt, dass Y im Sinne von Granger durch X kausal bedingt wird. Es ist wichtig zu beachten, dass oftmals Kausalität in beide Richtungen vorliegt: X bedingt Y im Sinne von Granger und umgekehrt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Y das Ergebnis von X ist.

Im Normalfall wird folgende bivariate Regression für alle Paare von (X, Y) Reihen durchgeführt,

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_{t-1} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} + \beta_1 X_{t-1} + \dots + \beta_q X_{t-q} + \varepsilon_t \quad (10)$$

$$X_t = \alpha_0 + \alpha_1 X_{t-1} + \dots + \alpha_q X_{t-q} + \beta_1 Y_{t-1} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \mu_t \quad (11)$$

mit ε_t und μ_t als weißes Rauschen sowie p und q als Anzahl Zeitverzögerungen für X bzw. Y. Die Nullhypothese lautet, dass Y nicht durch X kausal beeinflusst wird, so dass $\beta_j = 0$ für $j = 1, 2, \dots, p$. Das beschränkte Modell (restricted model) lautet daher:

$$Y_t = \sum_{j=1}^p \alpha_j Y_{t-j} + \vartheta_t \quad (12)$$

Als Teststatistik dient die Standard Wald F-Statistik:

$$F_c = \frac{[(ESSR - ESSU)/q]}{[ESSU / (n-p-q)]} \quad (13)$$

mit n als der Anzahl Beobachtungen, die im unrestricted model in Gleichung (10) verwendet wurden, ESSU ist die Fehlerquadratsumme der Gleichung (10) und ESSR ist die Fehlerquadratsumme des restricted model aus Gleichung (12) (Ramanathan, 2002: 476). Die Länge der Zeitverzögerung kann beliebig gewählt werden, sollte jedoch ausreichend groß gewählt werden. Nichtsdestoweniger sollte die Länge der Zeitverzögerung auf soliden Annahmen beruhen. Es gilt zu überlegen, was die längste Zeitspanne sein könnte, in der eine der Variablen dazu beitragen kann, eine andere vorherzusagen. Alternativ kann die Länge der Zeitverzögerung mittels des Lagrangeschen Multiplikator Tests bestimmt werden.

4 Empirische Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden zuerst ausgewählte deskriptive Ergebnisse des verwendeten Datensatzes vorgestellt, bevor im Anschluss die Testergebnisse für Saisonalität, Stationarität sowie Kausalität diskutiert werden.

Um einen allgemeinen Eindruck über die zugrundeliegenden Marktbeziehungen in der Periode 1997 bis 2011 zu erhalten, empfiehlt sich eine Korrelationsanalyse zwischen Weltmarktpreisen zuzüglich Exporterstattungen (sofern diese gewährt wurden) Großhandels-, Verbraucher- und Erzeugerpreisen. Bereits diese Analyse verdeutlicht einige interessante Aspekte (Tabelle 1).

Erstens ist die Korrelation zwischen Weltmarktpreis zuzüglich Exporterstattungen und dem Großhandelspreis geringer als die Korrelation zwischen Weltmarktpreis zuzüglich Exporterstattungen und Verbraucher- bzw. Erzeugerpreis. Dies stellt insofern ein bemerkenswertes Ergebnis dar, als

¹² Für weitere Details siehe Johansen (1988) sowie Johansen und Juselius (1990).

¹³ Zum Beispiel von Pierce und Haugh (1977), Sims (1980) oder Geweke et al. (1983).

Tabelle 1

Korrelationsmatrix logarithmierter Preisreihen (1997 bis 2011)

	Weltmarktpreis für Cheddar	Großhandelspreis für Gouda (Deutschland)	Verbraucherpreis für Gouda (Deutschland)	Erzeugerpreis für Rohmilch (Deutschland)
Weltmarktpreis für Cheddar	1,00			
Großhandelspreis für Gouda (D)	0,04	1,00		
Verbraucherpreis für Gouda (D)	0,38	0,14	1,00	
Erzeugerpreis für Rohmilch (D)	0,39	0,83	0,25	1,00

Quelle: Eigene Berechnungen.

dass aufgrund der Exportorientierung der deutschen Milchwirtschaft eigentlich zu erwarten ist, dass der Weltmarktpreis den Großhandelspreis stärker beeinflusst als den Verbraucherpreis. Diese Beobachtung kann mit

- i) der hohen Marktabschottung durch die EU-Milchmarktordnung,
- ii) der (teilweisen) Fixierung der Exporterstattungen, um heimische Preisschwankungen auszugleichen und zusätzlich mit
- iii) dem hohen Anteil des intra-EU Handels mit Milchprodukten erklärt werden.

Die Aspekte i) und ii) bedingen, dass Großhandelspreise nicht jeder Bewegung der Weltmarktpreise folgen und iii) impliziert eine relative Unabhängigkeit des EU-Binnenmarktpreises (und damit auch des deutschen Milchpreises) vom Weltmarktpreis.

Zweitens sind Großhandelspreise stärker mit Rohmilcherzeugerpreisen korreliert als mit Verbraucherpreisen. Dieses Ergebnis hängt maßgeblich von dem Preisfindungsmodell für Rohmilch ab, welches die meisten deutschen Molkereien anwenden. Bei diesem Modell wird der endgültige Auszahlungspreis für die angelieferte Rohmilch erst bestimmt, nachdem verarbeitete Milch und Milchprodukte verkauft worden sind. Dieses Preismodell wird überwiegend in genossenschaftlich organisierten Molkereien angewendet. Etwa 70 % der in Deutschland angelieferten Rohmilch wird von genossenschaftlichen Molkereien verarbeitet (Bundeskartellamt, 2009: 31). Daher hängt der Erzeugerpreis für etwa

drei Viertel der deutschen Rohmilcherzeugung von der Verwendung der Rohmilch in den jeweiligen Betriebsstätten und den erzielten Preisen für Verarbeitungsprodukte auf nachgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette ab. Dieses Preismodell bedingt, dass die eigentliche Preisfeststellung für die angelieferte Rohmilch erst im Nachhinein erfolgt.

Basierend auf der Reform der Gemeinsamen Marktordnung für Milch in der EU und den daraus abzuleitenden Beobachtungen in der Marktentwicklung während des Beobachtungszeitraums erscheint die Aufteilung des Datensatzes in zwei Stichproben sinnvoll. Die erste Teilstichprobe erstreckt sich über den Zeitraum Januar 1997 bis Dezember 2004 und die zweite Stichprobe von Januar 2005 bis Oktober 2011.

4.1 Saisonalität

Die wichtigsten Ergebnisse des Tests auf Saisonalität mit dem Census-X-12 Verfahren sind in Tabelle 2 dargestellt. Während der Beobachtungsperiode liegt signifikante Saisonalität nur für Großhandels- und Erzeugerpreise vor. Demgegenüber kann für die Weltmarktpreise nur für den Zeitraum 2005 bis 2011 eine signifikante saisonale Komponente nachgewiesen werden. Weltmarktpreise zwischen 1997 und 2004 sowie Verbraucherpreise generell enthalten kein signifikant saisonales Muster. Dass Weltmarktpreise nur ab 2005 einen signifikanten saisonalen Verlauf aufweisen, lässt sich mit der zugenommenen Bedeutung des Milchan-

Tabelle 2

Zusammenfassung ausgewählter Testergebnisse auf Saisonalität

Periode	Weltmarktpreis für Cheddar		Großhandelspreis für Gouda (Deutschland)		Verbraucherpreis für Gouda (Deutschland)		Erzeugerpreis für Rohmilch (Deutschland)	
	1997 - 2004	2005 - 2011	1997 - 2004	2005 - 2011	1997 - 2004	2005 - 2011	1997 - 2004	2005 - 2011
n	96	82	96	82	96	82	96	82
Stabile Saisonalität [†]	0,564	5,712***	24,194***	7,983***	1,515	1,182	472,2***	56,090***
Variable Saisonalität [†]	4,310**	3,966**	3,742**	7,673**	3,577**	3,005*	2,354*	5,836**
Q-Wert	1,20	0,73	0,41	0,53	1,18	1,12	0,12	0,28

[†] F-Wert. Signifikant auf dem *** 99,9%, ** 99% und * 95% Niveau.

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 3
Zusammenfassung des erweiterten Dickey-Fuller Tests auf Stationarität

Periode	Weltmarktpreis für Cheddar		Großhandelspreis für Gouda (Deutschland)		Verbraucherpreis für Gouda (Deutschland)		Erzeugerpreis für Rohmilch (Deutschland)	
	1997 - 2004	2005 - 2011	1997 - 2004	2005 - 2011	1997 - 2004	2005 - 2011	1997 - 2004	2005 - 2011
n	96	82	96	82	96	82	96	82
Einheitswurzel	I (1)	I (1)	I (1)	I (1)	I (1)	I (1)	I (1)	I (1)
F-Wert	-12,75***	-3,80*	-4,37**	-5,78***	-10,31***	-5,49*	-3,53*	-3,25(*)

Signifikant auf dem *** 99,9 %, ** 99 %, * 95 % und (*) 90 % Niveau.
Quelle: Eigene Berechnungen.

gebots bzw. verarbeiteter Milchprodukte aus Regionen mit vorwiegend graslandbasierter Milchproduktion erklären.

Zeitreihen mit signifikanter Saisonalität werden um diese bereinigt. Zusätzliche Tests auf Handelstageeffekte zeigen, dass diese nur für die Erzeugerpreise in der Periode 2005 bis 2011 von Bedeutung sind. Diese wurden ebenso bereinigt.

4.2 Stationarität

Nachdem die Zeitreihen, soweit erforderlich, um saisonale Komponenten bereinigt wurden, erfolgte der Test auf Stationarität (Tabelle 3). Dazu wurde der erweiterte Dickey-Fuller Test verwendet. Dieser lässt im Gegensatz zum normalen Dickey-Fuller Test autoregressive Prozesse höherer Ordnung im Störterm zu. In die Testgleichung sind eine Konstante sowie ein linearer Trend als exogene Variable aufgenommen worden. Zusätzliche Überprüfungen mit dem KPSS-Test¹⁴ bestätigten die gefundenen Ergebnisse. Alle betrachteten Zeitreihen sind nicht-stationär und weisen somit einen Trend auf. Die Reihen haben die Integrationsordnung I(1) mit einem Signifikanzniveau von mindestens 90 Prozent. D. h., durch die Bildung der ersten Differenz kann Stationarität erreicht werden.

Nachdem die Grundanforderungen für die Analyse von Zeitreihen überprüft bzw. hergestellt wurden, wird in einem nächsten Arbeitsschritt analysiert, ob die nicht-stationären Zeitreihen Gemeinsamkeiten in ihrer Entwicklung über die Zeit aufweisen. Dieser Fragestellung wird mit Hilfe des Tests auf Kointegration nach Johansen nachgegangen. Die Ergebnisse dieses Testverfahrens sind in Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt.

Im Zeitraum von 1997 bis 2004 kann nur zwischen den folgenden Paarungen eine signifikante Linearkombination ermittelt werden: Großhandelspreis und Verbraucherpreis, Großhandelspreis und Erzeugerpreis sowie zwischen Verbraucher- und Erzeugerpreis. Zwischen dem Weltmarktpreis und den anderen Preisreihen kann kein kointegriertes Verhalten nachgewiesen werden. Das ist ein nachvollziehbares Ergebnis. Denn die Marktordnung der EU für Milch bzw. der darin formulierten Instrumente (z. B. Importzölle, Exporterstattungen, Interventionspreis, etc.) bedingt eine Marktabschottung und sorgt damit für eine weitgehende Abschottung der EU-Binnenmarktpreise von Preisentwicklungen auf internationalen Märkten. Zwischen 1997 bis 2004 ist die Zeitverzögerung zwischen Verbraucher- und Erzeugerpreisen mit drei Monaten

Tabelle 4
Ergebnisse des Tests auf Kointegration nach Johansen

	Weltmarktpreis für Cheddar	Großhandelspreis für Gouda (Deutschland)	Verbraucherpreis für Gouda (Deutschland)
1997 - 2004			
Großhandelspreis für Gouda (D)	0,86 (3)		
Verbraucherpreis für Gouda (D)	1,89 (3)	7,08** (4)	
Erzeugerpreis für Rohmilch (D)	0,94 (3)	5,67* (9)	9,12** (3)
2005 - 2011			
Großhandelspreis für Gouda (D)	5,39* (2)		
Verbraucherpreis für Gouda (D)	6,22* (3)	9,03** (4)	
Erzeugerpreis für Rohmilch (D)	4,89* (6)	4,05* (4)	6,51* (2)

Angabe der Zeitverzögerung in Klammern. Signifikant auf dem *** 99,9 %, ** 99 % und * 95 % Niveau.
Quelle: Eigene Berechnungen.

¹⁴ Für Details zum Testverfahren siehe Kwiatkowski et al. (1992).

am kürzesten; mit neun Monaten ist sie zwischen Großhandels- und Erzeugerpreisen am längsten. Die Länge der Zeitverzögerung zwischen diesen beiden letztgenannten Handelsstufen wird hauptsächlich durch die Vertragslaufzeiten zwischen Molkereien und Einzelhändlern bzw. Exporteuren bestimmt. Diese gelten meist für mehrere Monate.

Erst mit der schrittweisen Liberalisierung der EU-Milchmarktordnung können Entwicklungen auf internationalen Märkten die EU-internen (deutschen) Preise stärker beeinflussen. Dies wird durch die Ergebnisse für die Periode 2005 bis 2011 bestätigt. Innerhalb dieses Zeitraums sind alle Zeitreihen einschließlich des Weltmarktpreises mindestens auf dem Signifikanzniveau von 95 % signifikant kointegriert. Der einzige Unterschied zwischen den Marktstufen besteht im Ausmaß der Zeitverzögerung, mit welcher sich Änderungen auf vor- bzw. nachgelagerten Stufen fortsetzen. Wie bereits zu sehen war, hat der Prozess der Marktentralisierung in der EU einige wesentliche Implikationen für die Preisbildung und damit auch für die betroffenen Marktteilnehmer. So ist die Dauer der Zeitverzögerung zwischen Weltmarkt- und Großhandelspreisen mit zwei Monaten am kürzesten, während sie mit sechs Monaten zwischen Weltmarkt- und Verbraucherpreisen am längsten ist. Die Weitergabe von Preisänderungen zwischen der Großhandels- und der Erzeugerstufe findet nun schon nach vier Monaten statt. Zwischen 1997 und 2004 vergingen noch neun Monate. Dies liegt insbesondere an einer verkürzten Laufzeit der Lieferverträge der Molkereien mit dem Einzelhandel. Dadurch können Preisänderungen zum einen schneller an untere Stufen der Wertschöpfungskette (Verarbeiter und Erzeuger) weitergegeben werden und zum anderen können Milchverarbeiter und -erzeuger schneller notwendige Anpassungen an geänderte Marktbedingungen vornehmen. Dies spiegelt sich auch in der Beziehung zwischen Verbraucherstufe und Erzeugerstufe wider. Hier hat die Zeitverzögerung um einen Monat abgenommen und unterstreicht die skizzierte Entwicklung.

Insgesamt ist zu sehen, dass die Auswirkungen der Reformen auf den Milchmarkt, wenn es um die Weitergabe von Preissignalen und deren Zeitverzögerung geht, auf der Ebene des Großhandels den stärksten Effekt haben. Hier hat sich die Dauer, die für eine Übertragung der Preissignale an den Milcherzeuger erforderlich ist, nahezu halbiert.

4.4 Kausalität nach Granger

Es kann gezeigt werden, dass eine gleichgerichtete Bewegung der Zeitreihen vorliegt. Diese unterscheidet sich jedoch in Abhängigkeit der betrachteten Periode. Basierend auf diesen Ergebnissen kann jedoch keine Aussage über die kausalen Beziehungen abgeleitet werden. Um herauszufinden, wie die Preisentwicklungen einzelner Marktstufen sich unter Umständen gegenseitig beeinflussen, wird der Kausalitätstest nach Granger verwendet. Die wesentlichen Testergebnisse werden für beide Beobachtungsperioden in Tabelle 5 veranschaulicht.

Zwischen 1997 und 2004 hat der Weltmarktpreis einen kausalen Effekt auf den Großhandelspreis mit einer Verzögerung von einem Monat. Das Ergebnis ist signifikant auf dem 90 %-Niveau und verdeutlicht den hohen Integrationsgrad der deutschen Großhandelspreise in die Weltmärkte. Jedoch widerspricht dieses Ergebnis teilweise den Testergebnissen zur Kointegration. Letztere waren für eine Zeitverzögerung von einem Monat nicht signifikant.

Großhandelspreise haben eine kausale Wirkung sowohl auf Verbraucher- als auf Erzeugerpreise mit einer Verzögerung von drei bzw. zwei Monaten. Dies stimmt mit den Befunden aus der Kointegrationsanalyse überein. Eine Verzögerung von zwei bzw. drei Monaten erscheint für die Weitergabe von Preisbewegungen an vor- und nachgelagerte Stufen der Wertschöpfungskette plausibel. Zusätzlich haben Erzeugerpreise mit zweimonatiger Verzögerung einen kausalen Effekt auf Großhandelspreise und mit dreimonatiger

Tabelle 5
Testergebnisse des Tests auf Kausalität nach Granger

	Weltmarktpreis für Cheddar		Großhandelspreis für Gouda (Deutschland)		Verbraucherpreis für Gouda (Deutschland)		Erzeugerpreis für Rohmilch (Deutschland)	
	F-Wert	Lag	F-Wert	Lag	F-Wert	Lag	F-Wert	Lag
1997 - 2004								
Weltmarktpreis für Cheddar	-		0,57	1	0,32	3	0,54	3
Großhandelspreis für Gouda (D)	3,94(*)	1	-		3,02*	3	7,62***	2
Verbraucherpreis für Gouda (D)	0,15	3	4,16**	3	-		4,44**	3
Erzeugerpreis für Rohmilch (D)	0,85	3	7,02**	2	3,60**	3	-	
2005 - 2011								
Weltmarktpreis für Cheddar	-		1,29	2	1,11	6	1,88	2
Großhandelspreis für Gouda (D)	7,65***	2	-		2,73	2	17,58***	2
Verbraucherpreis für Gouda (D)	2,38*	6	3,97*	2	-		4,44*	2
Erzeugerpreis für Rohmilch (D)	4,92**	2	1,54	2	2,46(*)		-	

Signifikant auf dem *** 99,9%, ** 99%, * 95% und (*) 90 % Niveau.

Quelle: Eigene Berechnungen.

Verzögerung auf Verbraucherpreise. Dass Erzeugerpreise Großhandelspreise und letztendlich auch Verbraucherpreise beeinflussen, ist ebenfalls plausibel. Dies kann auf gestiegene Produktionskosten in der Milcherzeugung zurückgeführt werden.

In der aktuellen Periode hat sich das Bild verändert. Zwischen 2005 und Oktober 2011 haben Weltmarktpreise einen kausalen Effekt auf alle anderen Vermarktungsstufen – jedoch mit unterschiedlichem Ausmaß in der Verzögerung (2 bis 6 Monate). Darin spiegelt sich der Effekt des verringerten Binnenmarktschutzes zwischen Weltmarkt und heimischem Markt wider. Es zeigt aber auch, dass Preissignale vom Weltmarkt im Vergleich zu den anderen Marktstufen sehr zeitverzögert weitergegeben werden. Dagegen haben Großhandelspreise nur noch einen kausalen Effekt auf Verbraucherpreise. Die Verzögerung, mit der die Preissignale des Weltmarktes an die nachgelagerte Stufe der Verbraucher durchgereicht werden, entspricht der Zeit, die die Signale des Weltmarktes bis zum Großhandel benötigen. Es liegt also Symmetrie vor. Die kausale Wirkung auf Erzeugerpreise kann in dieser Periode nicht mehr signifikant nachgewiesen werden. Das ist insofern ein überraschendes Ergebnis, da die Preisbildung der Erzeugerpreise überwiegend auf Preisen beruht, die Molkereien für die verarbeiteten Milchprodukte erzielen¹⁵. Eine mögliche Erklärung ist, dass Molkereien versuchen, die Zahlung von Preisextremen zu vermeiden und eher langfristig zu kompensieren versuchen, dass deutsche Molkereien zunehmend von internationalen Exportmärkten für Käse abhängig sind (ohne Einbezug der Marktstufe Großhandel), die Produktionskosten der Rohmilch nur einen geringen Anteil in den gesamten Produktionskosten des Endprodukts aufweisen, der Anteil genossenschaftlicher Molkereien in der Verarbeitung abnimmt oder Kombinationen der genannten möglichen Ursachen. Die Reihung dieser möglichen Erklärungen spiegelt auch deren wahrscheinliche Gewichtung wider. Eine genaue Beurteilung kann jedoch nur mit Hilfe weiterer Analysen erfolgen. Lediglich auf einem Signifikanzniveau von 90 % kann ein kausaler Effekt der Verbraucherpreise auf die Erzeugerpreise nachgewiesen werden. Verglichen damit ist der Effekt der Erzeugerpreise auf die Großhandels- und die Verbraucherstufe während dieser Periode vergleichsweise stabil. Die geringere Anzahl beobachteter Kausalbeziehungen in jeweils nachgelagerten Vermarktungsstufen kann auch hier, wie bereits erwähnt, durch eine stärkere Abhängigkeit der Preise von internationalen Marktentwicklungen bedingt sein.

5 Diskussion

Dieser Beitrag behandelt die Interaktionen von Preisen verschiedener Marktstufen in der deutschen Milchwirtschaft, wobei der Fokus auf dem Produkt Käse liegt. Die analysierten Marktstufen umfassen die Erzeugerbene (Rohmilch), den Großhandel/Molkereien (Käse) sowie die Verbraucher (Käse

und den Weltmarkt (Käse). Für die Analyse werden der deutsche Erzeugerpreis für Rohmilch und Verbraucherpreis für Gouda sowie der internationale Preis für Cheddar verwendet. Außerdem werden EU-Exporterstattungen für Käse berücksichtigt, sofern diese gewährt wurden. Um die Kointegration der Preisreihen und deren kausale Zusammenhänge analysieren zu können, wurde die Saisonkomponente in den Zeitreihen entfernt. Dies erfolgte nur für diejenigen Zeitreihen, in welchen sie signifikant war. Dazu wurde das Census-X12-Verfahren angewendet. Des Weiteren wurden die Zeitreihen auf Stationarität getestet bzw. diese durch Bildung erster Differenzen hergestellt. Mit den so angepassten Zeitreihen wurde der Test auf Kointegration nach Johansen durchgeführt und die Kausalität nach Granger ermittelt. Damit stellt dieser Beitrag den ersten Schritt in der Analyse der Preisbildung entlang der Wertschöpfungskette für Milch und Milchprodukte in Deutschland dar. Das Ziel ist es, die Effekte von Preissignalen in den stark miteinander verbundenen Marktstufen zu quantifizieren.

Die Analyse liefert interessante Ergebnisse. Bei der Interpretation der Ergebnisse müssen jedoch einige Einschränkungen berücksichtigt werden. In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf dem Produkt Käse. Dabei wird von einer Interaktion mit anderen Milchprodukten abstrahiert. Das bedeutet, dass die Beziehung zwischen den Preisen unterschiedlicher Milchprodukte und deren gegenseitige Abhängigkeit bisher nicht berücksichtigt werden. Dieses Problem wird durch die bestehende Milchquotenregelung noch verstärkt, da das verfügbare Milchangebot für die Verarbeitung begrenzt ist und somit nur eingeschränkte Mengenanpassungen möglich sind. Ein weiteres Problem liegt in den Preisdaten selbst. Über lange Zeiträume vergleichbare Preisreihen sind nur selten verfügbar. Daher musste für die Analyse auf Preisreihen unterschiedlicher Käseprodukte (Gouda, Cheddar) zurückgegriffen werden. Eine solche Vorgehensweise schränkt die Aussagefähigkeit und Verallgemeinbarkeit der Ergebnisse ein, d. h. die Ergebnisse könnten bei einer Betrachtung homogener Produkte abweichen. Offensichtlich wird diese Problematik bei den Analysen zur Kointegration und Kausalität, die teilweise zu sich widersprechenden Ergebnissen führen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit weiterer und tiefer gehender Analysen.

Dennoch können einige erste Schlussfolgerungen getroffen werden: Während Erzeuger- und Großhandelspreise saisonbedingten Schwankungen unterliegen, ist dies für Verbraucherpreise nicht zu beobachten. Einzelhändler, in Teilen auch der Großhandel, gleichen die Saisonalität mit ihrer Preisgestaltung aus. Es besteht also keine Preissymmetrie. Der LEH wendet eher eine Mischkalkulation an, mit der Preisextreme ausgeglichen und ein stabilerer „Durchschnittspreis“ verwendet wird. Dies wird durch andere Studien bestätigt, die eine relativ ausgeprägte Preisstarrheit von Lebensmittelpreisen nachweisen (Weber, 2009; Herrmann et al. 2005). Demgegenüber deuten die Ergebnisse für internationale Preise auf eine zunehmende Relevanz der

¹⁵ Preisbildung in genossenschaftlichen Molkereien (vgl. S. 10).

Saisonalität hin. Dies könnte durch eine gestiegene Bedeutung graslandbasierter Milcherzeugung in den Exportanteilen bedingt sein. Mit Inkrafttreten der Luxemburger Beschlüsse haben sich die Preisbeziehungen auf dem Markt für Käse wesentlich verändert. Während in der Periode 1997 bis 2004 heimische Preise weitestgehend unabhängig von internationalen Preisen (zuzüglich Exporterstattungen) waren, bestehen ab der Periode 2005 bis 2011 kausale Beziehungen zwischen Weltmarkt und den nachfolgenden nationalen Marktstufen. Auch untereinander stehen die nachgelagerten Stufen in signifikanten Beziehungen. So weisen beispielsweise Großhandels- und Verbraucherpreise eine gegenseitige kausale Beeinflussung auf, die Zeitverzögerungen unterscheiden sich jedoch in den beiden betrachteten Perioden. Während Erzeugerpreise in der ersten Periode Großhandelspreise kausal beeinflussen, besteht in der Periode 2005 bis 2011 keine wechselseitige Wirkung des Großhandelspreises auf den Erzeugerpreis. Dies ist insofern ein überraschendes Ergebnis, als dass zumindest die Erzeugerpreise genossenschaftlicher Milchverarbeiter auf Großhandelspreisen beruhen. Obgleich zahlreiche Erklärungsansätze möglich sind, ist eine weitergehende Untersuchung dieses Ergebnisses notwendig. Dennoch kann gezeigt werden, dass die EU-Reformen für den Milchmarkt Auswirkungen auf die Preisbildung in der Wertschöpfungskette Milch haben. Es zeigt sich ferner, dass diese Auswirkungen je nach Marktstufe variieren.

Literatur

- Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (verschiedene Jahrgänge) Marktbilanz Milch – Daten, Fakten, Entwicklungen. Bonn : AMI
- Azzam AM (1999) Asymmetry and rigidity in farm-retail price transmission. *Am J Agric Econ* 81(3):525-533
- BMLEV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2011) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. Münster-Hiltrup : Landwirtschaftsverlag
- Bundeskartellamt (2009) Sektoruntersuchung Milch : Zwischenbericht Dezember 2009 [online]. Zu finden in <http://www.bundeskartellamt.de/wDeutsch/download/pdf/Stellungnahmen/1001_Sektoruntersuchung_Milch_Zwischenbericht_2009.pdf> [zitiert am 19.02.2013]
- CAP Monitor (2011) The complete guide to the common agricultural policy. London : Agra Europe
- Capps O, Sherwell P (2005) Spatial asymmetry in farm-retail price transmission associated with fluid milk products [online]. Zu finden in <http://future.aae.wisc.edu/publications/asymmetryAAEA05_capps_paper_final_version.pdf> [zitiert am 19.02.2013]
- Central Bureau of Statistics Jerusalem (ohne Jahr) Seasonal adjustment [online]. Zu finden in <<http://www.cbs.gov.il/publications/tseries/seasonal07/introduction.pdf>> [zitiert am 19.02.2013]
- Cuthbertson K, Hall SG, Taylor MP (1992) Applied econometric techniques. Ann Arbor MI : Univ Michigan Pr, 274 p
- Deutscher Bundestag – Ausschuss für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2010) Angebots- und Nachfragemacht des Lebensmitteleinzelhandels und die Auswirkungen auf die Verbraucher : öffentliche Anhörung am 05.07.2010 [online]. Zu finden in <http://www.bundestag.de/bundestag/ausschusse/17/a10/anhoerungen/archiv/2010/_A_5_7_2010_Angebots-_und_Nachfragemacht_des_Lebensmitteleinzelhandels_und_die_Auswirkungen_auf_die_Verbraucher_.index.html> [zitiert am 19.02.2013]
- Dickey DA, Fuller WA (1979) Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *J Am Statistical Ass* 74:427-431
- Engle RF, Granger CW (1987) Co-integration and error correction : representation, estimation, and testing. *Econometrica* 55(2):251-276
- Findley DF, Hood CC (1999) X-12-ARIMA and its application to some Italian indicator series [online]. Zu finden in <<http://www.census.gov/ts/papers/x12istat.pdf>> [zitiert am 19.02.2013]
- Geweke J, Meese R, Dent W (1983) Comparing alternative tests of causality in temporal systems : analytical results and experimental evidence. *J Econometrics* 21(2):161-194
- Gould BW (2012) Understanding dairy markets [online]. Zu finden in <<http://future.aae.wisc.edu/tab/prices.html>> [zitiert am 19.02.2013]
- Granger CW (1969) Investigating causal relationships by econometric models and cross-spectral models. *Econometrica* 37(3):424-438
- Greene WH (2008) Econometric analysis. Upper Saddle River NJ : Pearson Prentice Hall, 1178 p
- Herrmann R, Möser A, Weber SA (2005) Price rigidity in the German grocery-retailing sector : scanner-data evidence on magnitude and causes. *J Agric Food Industrial Org* 3:1-35
- Johansen S (1988) Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal Econ Dynamics Control* 12(2-3):231-254
- Johansen S, Juselius K (1990) Maximum likelihood estimation and inference on cointegration – with applications to the demand for money. *Oxford Bull Econ Statistics* 52(2):169-210
- Kinnucan HW, Forker OD (1987) Asymmetry in farm-retail price transmission for major dairy products. *Am J Agric Econ* 69(2):385-392
- Kraft M, Schneider E (2004) Stochastischer Trend und Kointegration. *Wirtschaftsstudium* 12:1545-1552
- Kwiatkowski D, Phillips PCB, Schmidt P, Shin Y (1992) Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root : how sure are we that economic series have a unit root? *J Econometrics* 54(1-3):159-178
- Lothian J, Morry M (1978) A set of quality control statistics for the X-11-ARIMA seasonal adjustment method [online]. Zu finden in <<http://www.census.gov/ts/papers/LothianMorry1978.pdf>> [zitiert am 20.02.2013]
- Pierce DA, Haugh LD (1977) Causality in temporal system : characterizations and a survey. *J Econometrics* 5(3):265-293
- Ramanathan R (2002) Introductory econometrics with applications. Mason : South Western, Thomson Learning, 688 p
- Senate Economics References Committee (2010) Milking it for all it's worth – competition and pricing in the Australian dairy industry [online]. Zu finden in <<http://www.australiancompetitionlaw.org/reports/2010milk.html>> [zitiert am 20.02.2013]
- Serra T, Goodwin BK (2002) Price transmission and asymmetric adjustment in the Spanish dairy sector [online]. Zu finden in <<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/19622/1/sp02se03.pdf>> [zitiert am 19.02.2013]
- Shiskin J, Young A H, Musgrave J C (1967) The X-11 variant of the Census Method II seasonal adjustment program. Washington : Dept Commerce, US Census Bureau, Techn Paper 15
- Sims CA (1980) Macroeconomics and reality. *Econometrica* 48(1):1-48
- US Census Bureau (2011) X-12-ARIMA reference manual : version 0.3 [online]. Zu finden in <<http://www.census.gov/ts/x12a/v03/x12adocV03.pdf>> [zitiert am 19.02.2013]
- Weber SA (2009) Ausmaß und Determinanten von Preisrigiditäten im deutschen Lebensmitteleinzelhandel : eine empirische Analyse mit Scannerdaten [online]. Zu finden in <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2009/7206/pdf/WeberSaschaAlexander_2009_09_22.pdf> [zitiert am 19.02.2013]
- Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle (verschiedene Jahrgänge) ZMP-Marktbilanz Milch : Deutschland, Europäische Union, Weltmarkt. Bonn : ZMP

Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen

Teil 1. Bestimmung und Bewertung von Dosis-Größen

Karsten Mohr* und Ulrich Dämmgen**

Zusammenfassung

Intensive Tierhaltung führt zu Emissionen von NH_3 , die unerwünschte Wirkungen auf Böden und Vegetation haben. Genehmigungsverfahren für den Bau von Stallanlagen sehen daher die Überprüfung bestehender Belastungen und die Schätzung zusätzlicher Belastungen vor. Aus Kostengründen geschieht dies durch Modellierung. In dieser Arbeit werden die zur Genehmigung von Stallbauvorhaben eingesetzten Modelle zur NH_3 -Belastung mit Messungen verglichen. Die festgestellten Unterschiede sind teilweise erheblich.

- In Quellnähe gemessene NH_3 -Konzentrationen und die daraus abgeleiteten Zusatzkonzentrationen unterschreiten die nach TA Luft modellierten Zusatzkonzentrationen.
- Die aus den modellierten NH_3 -Konzentrationen mit Hilfe des TA-Luft-Ansatzes ermittelten zusätzlichen N-Depositionen stimmten gut mit den aus gemessenen Bestandesniederschlägen ermittelten Zusatzbelastungen überein. Die nach dem LAI-Verfahren berechneten Zusatzdepositionen erscheinen dagegen unrealistisch hoch.
- Die vom UBA bereitgestellten MAPESI-Daten zur Vorbelastung (Deposition) übertreffen die Messwerte aus den Bestandesniederschlägen in dieser Region erheblich. Die Unterschiede lassen sich neben den gängigen Unsicherheiten auf Mängel beider Ansätze zurückführen.
- Den modellierten Depositionen liegen Annahmen zu Depositionsgeschwindigkeiten zugrunde. Der Vergleich von gemessenen und modellierten Zusatzbelastungen legt nahe, dass der in TA Luft vorgeschlagene Wert von $1,0 \text{ cm s}^{-1}$ im Messgebiet die N-Einträge leicht unterschätzt, der von LAI angenommene Wert von $2,0 \text{ cm s}^{-1}$ jedoch die Einträge sicherlich überschätzt.

Schlüsselwörter: Ammoniak, Ammonium, Dosis, Forst

Abstract

Ammonia and ammonium loads to forests in Northwest Niedersachsen in the vicinity of animal houses

Part 1. Assessment and validation of doses

Intensive animal production implies NH_3 emissions that result in unwanted effects on soils and vegetation. Hence, any authorization of erection or extension of animal houses presupposes an assessment of existing N loads and an estimate of potential future loads. Due to the costs involved, this is achieved by application of models. This work compares measured and modelled nitrogen loads in a region with high animal densities. In parts, the results differ considerably.

- NH_3 concentrations measured in the proximity of sources and the additional loads derived deviate from those obtained from model calculations using the German standard procedure (TA Luft).
- The additional N depositions derived from the modelled concentrations using TA Luft agree quite well with the measured additional N throughfall fluxes. Additional depositions modelled using the LAI procedure are apparently far too large.
- The German Federal Environment Agency (UBA) provides data for background N depositions (MAPESI). These data exceed measured throughfall N by far. The differences cannot be explained, even if one considers the uncertainties involved.
- Modelled depositions are based on assumed deposition velocities. The comparison between measured additional throughfall N and modelled additional depositions suggests that the deposition velocity proposed in TA Luft (1.0 cm s^{-1}) slightly underestimates the N input in the region considered, whereas the values assumed by LAI (2.0 cm s^{-1}) definitely overestimates those inputs.

Keywords: ammonia, ammonium, dose, forest

* Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Mars-la-Tour-Str. 1-13,
26121 Oldenburg

** Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz,
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Kontakt: Karsten.Mohr@LWK-Niedersachsen.de

1 Einleitung

Tierhaltungsanlagen setzen Ammoniak (NH_3) frei. Dies kann ebenso wie sein Reaktionsprodukt Ammonium (NH_4^+) und andere reaktive Stickstoff-Spezies (N-Spezies: gasförmig: Stickstoffdioxid, NO_2 , und Salpetersäure, HNO_3 ; in Partikeln Nitrat, NO_3^- , und gelöster organischer Stickstoff, dissolved organic nitrogen, DON) empfindliche Pflanzen und Ökosysteme in der Umgebung solcher Anlagen schädigen (Garber und Schürmann, 1971; Heinsdorf und Krauss, 1991; Fangmeier et al., 1994; Adaros und Dämmgen, 1994; Krupa, 2003; Stevens et al., 2011). Sichtbare Gewebeschädigungen wurden erst bei NH_3 -Konzentrationen über $50 \mu\text{g m}^{-3}$ festgestellt (van Dijk et al., 2001). Schon deutlich niedrigere NH_3 -Konzentrationen ($\beta_{\text{NH}_3} < 10 \mu\text{g m}^{-3}$) führen als Folge der hiermit verbundenen N-Depositionen bei von Natur aus N-limitierten Ökosystemen wie Wäldern, Heiden und Magerrasen zu Veränderungen der Artenzusammensetzung, Nährstoffdsharmonien, Bodenversauerung und NO_3^- -Austrägen ins Grundwasser. Keine negativen Effekte sind (definitionsgemäß) bei Einhaltung und Unterschreitung der critical loads (CL) für N zu erwarten. Für die in Deutschland häufigsten Waldökosysteme bewegen sich die CL zwischen 10 und 20 kg $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ N (Bobbink et al., 2011). Sie werden jedoch in weiten Teilen Deutschlands bereits von der Hintergrund-Deposition (Vorbelastung, D_v) deutlich überschritten.

Die Wirkungen sind an NH_3 -Konzentrationen und N-Depositionen als Dosis-Größen gekoppelt, wobei die Dosis auch von meteorologischen Größen (Windgeschwindigkeit, Temperatur) und Eigenschaften des Rezeptors abhängt, insbesondere von der Rauigkeit des Bestandes, jedoch auch zusätzlich von der NH_4^+ -Konzentration im Apoplasten und dem daraus resultierenden NH_3 -Kompensationspunkt (Sutton et al., 1993).

Es ist erklärtes politisches Ziel, die Zahl der Ökosysteme, in denen CL überschritten werden, zu verringern (EU, 2001). Dabei kommt der Verringerung der Emissionen eine besondere Bedeutung zu. NH_3 -Konzentrationen und N-Depositionen werden insbesondere durch NH_3 -Quellen in der Nähe des Wirkortes beeinflusst. Deshalb ist beim Bau oder der Erweiterung von Stallanlagen zu prüfen, ob als Folge zusätzliche Emissionen mit nachteiligen Wirkungen auftreten können. Das hierzu dienende Regelwerk in Genehmigungsverfahren ist die „Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA Luft) (BMU, 2002). Diese schreibt die getrennte Betrachtung der NH_3 -Konzentrationen β_{NH_3} und der daraus resultierenden Deposition D_N von reaktivem N vor. Die Ermittlung der Zusatzbelastung erfolgt im Genehmigungsverfahren aus Kostengründen über eine Modellierung. Hierzu ist gemäß BMU (2002) das Lagrange-Modell AUSTAL2000 zu verwenden. Zur Beurteilung der NH_3 -Wirkungen auf empfindliche Pflanzen und Ökosysteme werden nur allgemeine Hinweise zur Vorbelastung und zum Standort gemacht (TA Luft, Sonderfallprüfung).

Der von der Länderarbeitsgemeinschaft für Immissions- schutz erarbeitete „Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen“ (LAI, 2012) ergänzt und modifiziert diese Vorgehensweise. Gegenüber der bisherigen Praxis ergeben sich dabei folgende wesentliche Neuerungen:

- die Heraufsetzung der Depositionsgeschwindigkeit v_{d, NH_3}

von $1,0 \text{ cm s}^{-1}$ auf $2,0 \text{ cm s}^{-1}$ für die Berechnung der N-Depositionen auf Grundlage von VDI 3782, Bl. 5, und VDI 3783, Bl.13,

- die Einbeziehung der vom Umweltbundesamt bereitgestellten bundesweiten Daten der Hintergrundbelastung (UBA, 2012) und
- die Berücksichtigung der CL zur Beurteilung der N-Empfindlichkeit von Ökosystemen.

Vergleichende Messungen zu den mit AUSTAL2000 berechneten NH_3 -Konzentrationen und N-Depositionen sind sehr selten und lückenhaft. Für Verfahren, die – wie LAI (2012) – andere Depositionsgeschwindigkeiten v_{d, NH_3} als die von in der BMU (2002) genannten ($v_{d, \text{NH}_3, \text{TAL}} = 1,0 \text{ cm}^{-1}$) verwenden, fehlen publizierte Überprüfungen durch Messungen.

Ziel dieser Arbeit ist, in einer landwirtschaftlich intensiv genutzten Region mit hoher Vorbelastung (Konzentration β_{v, NH_3} , Deposition $D_{v, \text{N}}$), die in der Umgebung von Tierhaltungsbetrieben modellierte NH_3 -Konzentrationen $\beta_{\text{NH}_3, \text{LAI}}$ und Depositionen $D_{z, \text{N}, \text{TAL}}$ und $D_{z, \text{N}, \text{LAI}}$ mit Messdaten zu vergleichen. Dabei werden statt der Zusatzdepositionen die leichter zu messenden Zusatzbestandesniederschläge $B_{z, \text{N}}$ herangezogen.

Im Teil 2 der Untersuchungen (Mohr und Dämmgen, 2013) werden die Auswirkungen langfristiger NH_3 -Zusatzdepositionen auf den Böden und Vegetation hoch belasteter Wälder ermittelt und modellierten Zusatzbelastungen gegenübergestellt.

2 Experimentelles Design

Im Rahmen einer 1½-jährigen Messkampagne (Oktober 2009 bis April 2011) sollten Datensätze gewonnen werden, die zu Klärung folgender Fragen dienen:

1. Ist die insbesondere in Regionen mit hohen Viehdichten relativ hohe regionale Hintergrundbelastung (Vorbelastung) sachgerecht angesetzt?

In immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren ist gemäß BMU (2002) die Gesamtbelastung, d. h. die Summe aus Vorbelastung (D_v) und Zusatzbelastung (D_z) bei der Bewertung von Schadstoffemissionen zu berücksichtigen. Weil Messungen zur Ermittlung von D_v und D_z unverhältnismäßig langwierig und aufwändig sind, werden sie in der Praxis berechnet. Daten zu D_v (MAPESI-Daten) werden vom Umweltbundesamt (UBA, 2012) zur Verfügung gestellt und basieren auf Modellierungen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km^2 .

Zur Validierung dieser modellierten Daten wurden Kronentrauemessungen an fünf Orten **außerhalb des Einflussbereiches von Stallanlagen** durchgeführt. Diese Methode erfasst nicht sämtliche N-Flüsse in das betrachtete Ökosystem (siehe unten), ist aber standardisiert und im europäischen forstlichen Monitoring üblich.¹

¹ Der mithilfe von Kronentrauemessungen ermittelte $B_{z, \text{N}}$ wird europaweit neben modellierten Daten zur Quantifizierung der N-Belastung von Wäldern herangezogen (z. B. Gehrmann et al., 2001; Lorenz et al., 2008; Verhagen und van Diggelen, 2006).

Der nur durch den **Waldrand** bedingte Einfluss auf die Verteilung der N-Bestandesniederschläge wurde durch Transektsmessungen außerhalb des Einflussbereiches von Stallanlagen quantifiziert.

2. Ist die mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL2000 ermittelte Zusatzbelastung (Konzentration, Deposition) in der Umgebung von Stallanlagen plausibel?

Die im Genehmigungsverfahren geforderten Angaben zur Zusatzbelastung der NH₃-Konzentrationen und N-Depositionen sind gemäß BMU (2002) mithilfe des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 zu berechnen.

Zur Validierung dieser Modelldaten wurden hierzu **in der Umgebung von jeweils zwei Stallanlagen** Messungen der NH₃-Konzentrationen und N-Bestandesniederschläge entlang von Belastungsgradienten mit vier bzw. fünf Messorten durchgeführt. Die über den gesamten Messzeitraum gemittelten NH₃-Konzentrationen ($\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{mess}}$) und jährlichen N-Bestandesniederschläge ($B_{Z, N}$) wurden den modellierten Daten ($\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{TAL}}$ und $D_{Z, N}$) gegenübergestellt.

3. Wie sind die Auswirkungen der NH₃-Konzentrationen- bzw. N-Depositionen auf Wälder, insbesondere in Regionen mit hoher Vorbelastung einzuschätzen?

Da die Einflüsse von atmosphärischem reaktivem N sowohl über die Blätter als auch über den Boden wirksam werden können, sollten entsprechende Indikatorwerte gewonnen werden, die den Dosisgrößen gegenübergestellt werden. Wesentliche Indikatoren sind die Vitalität des Baumbestandes, die chemischen Bodeneigenschaften und die Biodiversität. Diese Arbeiten werden im Teil 2 dieser Arbeit (Mohr und Dämmgen, 2013) vorgestellt.

3 Depositionen, Bestandesniederschläge, Konzentrationen – Begriffe und Zusammenhänge

3.1 Wirkgrößen

Die eigentliche Wirkgröße ist die vom Bestand aufgenommene, verstoffwechselte und am Wirkort verfügbare N-Menge (Dämmgen und Grünhage, 1998). Diese Menge ist auf ökosystemarer Ebene experimentell nicht fassbar.

Als eine sinnvoll messbare Wirkgröße wird die N-Gesamtdeposition $D_{G, N}$ in den Bestand angenommen, die sich als Summe der nassen und trockenen Deposition von NH₄, NO₃ und organischem N (ON) mit sedimentierenden Partikeln und der trockenen Deposition von NH₃, NO₂, gasförmiger HNO₃ und gasförmigem ON sowie von NH₄, NO₃ und gelöstem organischem N (DON) in nichtsedimentierenden Partikeln ergibt.

Dabei lässt sich die Deposition sedimentierender Partikel direkt mit Sammlern erfassen, die der nichtsedimentierenden Spezies erfordert die Anwendung aufwändiger mikrometeorologischer Verfahren (VDI 4320, Bl. 1).

Für akute, auf die Einwirkung von gasförmigem NH₃ zurückzuführende Schäden ist die in der Nähe des Wirkortes bestimmte NH₃-Konzentration in der Umgebungsluft β_{NH_3} eine gut messbare Dosisgröße.

3.2 Deposition und Bestandesniederschlag – Definitionen und Symbolik

Die Differenz der N-Deposition (Gesamtdeposition) $D_{G, N}$ an einem Messpunkt entlang eines Transektes und eines Messpunktes, der so weit von der Quelle entfernt ist, dass mit zunehmender Entfernung keine weiteren Änderungen mehr beobachtbar sind, wird als Zusatzdeposition $D_{Z, N}$ angesehen. $D_{Z, N}$ ist das Maß für den jeweils zusätzlichen, auf die betrachtete Quelle zurückführbaren Anteil der Dosis. Die nicht von dieser Quelle herrührende Belastung wird als Hintergrunddeposition bzw. Vorbelastung $D_{V, N}$ bezeichnet. Es gilt:

$$D_{G, N} = D_{V, N} + D_{Z, N}$$

Ebenso gilt für die NH₃-Konzentrationen (Gesamt-, Vor- und Zusatzbelastung)

$$\beta_{G, \text{NH}_3} = \beta_{V, \text{NH}_3} + \beta_{Z, \text{NH}_3}$$

In der Praxis ist es üblich, statt der komplexen Messungen der Gesamtdeposition $D_{G, N}$ den sog. Bestandesniederschlag (Gesamtbestandesniederschlag) von N, $B_{G, N}$, zu bestimmen. $B_{G, N}$ ist definitionsgemäß keine Deposition², sondern der auf den Boden des Bestandes gelangende Massenstrom von N. Er wird als Massenstromdichte mit der gleichen Einheit wie die Deposition angegeben (Dämmgen et al., 1997; VDI 4320, Bl. 1).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Unterschiede, die sog. Zusatzbestandesniederschläge, $B_{Z, N}$ zwischen der B_N und Vorbelastung $B_{V, N}$ entlang eines Transektes als experimentell zugängliches Maß für die Zusatzdeposition $D_{Z, N}$ angesehen, wobei sinngemäß angenommen wird:

$$D_{Z, N} \approx B_{Z, N} = B_{G, N} - B_{V, N}$$

4 Messorte, Messmethoden und Modelle

4.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im westniedersächsischen Tiefland (atlantisch bis subatlantisch geprägtes Klima, durchschnittliche Jahresmitteltemperatur 9 °C, vornehmlich südwestliche Winde; Landwirtschaftskammer Niedersachsen, unveröffentlichte Daten aus dem Zeitraum 1989 bis 2009, Station Lingen). Die Untersuchungsstandorte befinden sich

² Die in der Kronentraufe der Waldbäume mit Bulksammlern gemessenen N-Flüsse berücksichtigen nicht den Anteil, der direkt im Kronenraum von den Pflanzen aufgenommen wird (Dämmgen et al., 1997; VDI 4320, Bl. 1).

Tabelle 1

Kurzbeschreibung der Messorte, Entferungen zu den Stallanlagen siehe Tabellen 3 bis 7

Messort	Tierart/Lage	Quellstärke Mg a ⁻¹ NH ₃	Messgrößen	Vegetation	Anordnung und Anzahl der Messpunkte	Messperiode	
						von	bis
En	Legehennen	3,42	N-Flüsse	Fichtenforst	Transekts, 5	10/2009	4/2011
Ma	Legehennen	3,83	NH ₃ -Konzentrationen	Grünland	Transekts, 4	12/2010	4/2011
Ne	Mastschweine	1,58	NH ₃ -Konzentrationen	Rasen	Transekts, 4	12/2009	4/2011
Ne	Mastschweine	1,58	N-Flüsse	Lärchenforst	Transekts, 4	10/2008	4/2011
Ho	emittentenfern		N-Flüsse	Kiefernforst	Einzelmesspunkt	1/1996	4/2011
Sa	emittentenfern		N-Flüsse	Kiefernforst	Einzelmesspunkt	1/1996	4/2011
Tw	emittentenfern		N-Flüsse	Lärchenforst	Einzelmesspunkt	10/2009	9/2010

schwerpunktmaßig in den Landkreisen Emsland und Vechta mit sehr intensiver Tierproduktion.³ Hier wurden größere Stallanlagen bereits in den 1960er Jahren aus Gründen des Seuchen- und Immissionsschutzes in Waldgebieten errichtet.

Messorte. Bei der Auswahl der Messorte wurde auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Bedingungen für den Vergleich der Messwerte mit den berechneten Modelldaten Wert gelegt. Dazu zählten insbesondere:

- Einzellage der Stallanlagen
- Beschränkung auf jeweils eine Tierart pro Messort
- kontinuierlicher Tierbesatz während der Messkampagne
- praxisübliche Haltungsverfahren
- keine emissionsmindernden Maßnahmen (z. B. Abluftreinigung, N-reduzierte Fütterung)
- Ventilation durch Zwangsentlüftung in mindestens 4 m Höhe

Einzelheiten gehen aus Tabelle 1 hervor.

Messpunkte. Abbildung 1 veranschaulicht beispielhaft die Lage der Messpunkte an einem Messort.

Messungen der NH₃-Konzentrationen in der Nähe der Stallanlagen berücksichtigten zunächst die gute Anströmbarkeit und Erreichbarkeit der Sammler (sie befinden sich deshalb über Grünland bzw. Rasen). Wegen der Einbeziehung aktueller Winddaten bei der Datenauswertung war eine Ausrichtung der Messpunkte für die Konzentrationsmessungen in Hauptwindrichtung nicht erforderlich.

Die Messungen der Bestandesniederschläge in der Umgebung der Stallanlagen erfolgten an vier bzw. fünf Messpunkten entlang von Transekten in Hauptwindrichtung. Diese Messanordnung erlaubte schon während der Messkampagne eine entfernungsbezogene Plausibilitätsprüfung der Einzelwerte. Die durch lokale, standortspezifische Turbulenzen mitunter heterogene Verteilung der Belastung wie am Messort En (s. u.) kann ebenso abgebildet werden.

Die Messpunkte für Bestandesniederschläge zeichneten sich durch folgende Eigenschaften aus:

- geschlossener Waldrand zur Vermeidung von Unterströmungen der Baumkronen
- einschichtiger, mittelalter Bestand ohne Unterstand und

- einheitliche Baumart pro Messort, homogene Bestandesstruktur ohne größere Bestandeslücken, Kronenschlussgrad über 80 %.



Abbildung 1

Messort Ne mit Stallanlage (dunkles Rechteck) und je vier Messpunkten zur Ermittlung der NH₃-Konzentrationen (β) über Rasen und der Bestandesniederschläge im Wald (B)

Zur Ermittlung der Zusatzbelastungen an den Messorten En, Ma und Ne erfolgten Messungen des Bestandesniederschlags $B_{G,N}$ und NH₃-Konzentrationen β_{NH_3} über einen Zeitraum von 16 bis 19 Monaten entlang von Transekten (s. Tabellen 3 bis 6). Bei der Auswahl der Messpunkte standen optimale Standortbedingungen im Vordergrund. Ihre Lage zur Hauptwindrich-

³ Genaue Ortsangaben werden aus Datenschutzgründen nicht vorgelegt.

tung war aufgrund der Berücksichtigung der aktuellen Winddaten bei der Modellierung weniger entscheidend. Der Wahl optimaler Entfernungsstufen im Nahbereich der Stallanlagen ging eine vorläufige Modellierung der NH_3 -Belastung voraus. In größerer Entfernung befindliche Stallanlagen spielten auch aufgrund ihrer geringen NH_3 -Emission keine Rolle.

An den seit 1996 betriebenen Messorten **Sa** und **Ho** wurde die Vorbelastung ($B_{G,N}$) in emittentenferner Lage, d. h. 2000 m bzw. 300 m von der nächstgelegenen Stallanlage, erfasst.

Am Messort **Tw** wurden über ein Jahr Depositionsmessungen zur Ermittlung von Waldrandeffekten auf den N-Eintrag ($B_{G,N}$) durchgeführt. Der Messtransekts erstreckte sich über eine Entfernung, bei der nach den Ergebnissen von Messungen die Belastung durch „Auskämmung“ gegenüber der Vorbelastung nicht mehr feststellbar war.

4.2 Bestimmung der Ammoniak-Quellstärke (Emissionsrate)

Die Kenntnis der Emissionsmassenströme aus den Ställen ist eine Voraussetzung für Ausbreitungsrechnungen. Bei der Vorgehensweise nach BMU (2002) ist es üblich, die Emissionsmassenströme aus Tierplatzzahlen und Standardwerten für Emissionen je Tierplatz und Jahr (Emissionsfaktoren) zu berechnen. Die in der niederländischen Richtlinie (Staatscourant, 2007) genannten Werte weichen von den später in VDI 3894, Bl. 1, erschienenen Emissionsfaktoren nur unwesentlich ab (Tabelle 2).⁴ Am Messort **Ne** wurde der Trockenkot in einem gesonderten Gebäude gelagert. Die Emissionen aus dem Lager gingen in die Ausbreitungsrechnungen ebenfalls ein.

Parallel zu den Konzentrationsmessungen erfolgten zur Überprüfung und ggf. Anpassungen der Emissionsfaktoren für die Legehennenhaltung an **Ma** diskontinuierliche Messungen der Emissionsmassenströme. Die Ergebnisse bestätigten die Standardannahmen zu NH_3 -Emissionsfaktoren; im (gewichteten) Mittel deckten sich die gemessenen NH_3 -Emissionen der gesamten Anlage mit den aus Literaturdaten ermittelten Werten.

Tabelle 2

In Ausbreitungsrechnungen verwendete NH_3 -Emissionsraten pro Tierplatz (TP)

	NH_3 -Emissionsrate	Quelle
NT Sauen	4,2 kg TP ⁻¹ a ⁻¹	Staatscourant (2007)
Sauen mit Ferkel	8,3 kg TP ⁻¹ a ⁻¹	Staatscourant (2007)
Ferkel	0,6 kg TP ⁻¹ a ⁻¹	Staatscourant (2007)
Eber	5,5 kg TP ⁻¹ a ⁻¹	Staatscourant (2007)
Legehennen, Bodenhaltung	0,3157 kg TP ⁻¹ a ⁻¹	BMU (2002)
Legehennen, Kleingruppe	0,0389 kg TP ⁻¹ a ⁻¹	BMU (2002)
Kotlager	3,3 kg m ⁻² a ⁻¹	Brewer und Costello (1999)

⁴ Für die in den Emissionsinventaren verwendeten Emissionsfaktoren werden Unsicherheiten von 30 % gerechnet (Haenel et al., 2012; EMEP, 2009).

4.3 Messung von Ammoniak-Konzentrationen

Die NH_3 -Konzentrationsmessungen im Freiland wurden an den Messorten **Ma** und **Ne**⁵ an jeweils vier Messpunkten pro Transekts gemäß VDI 4280, Bl. 3, und VDI 3869, Bl. 4, mit frei anströmenden Passivsammlern des Typs „Zürcher“ durchgeführt. Das in Blatter und Neftel (1990) beschriebene Verfahren zur Messung der NH_3 -Konzentrationen in der Luft erwies sich in mehreren Untersuchungen als für Dauermessungen geeignet (Kirchner et al. 1999; Thöni et al., 2003; Schmitt et al., 2005) (je Messpunkt 2 Schutzgehäuse mit je 2 Sammlern; Exposition 1,5 m über Grund).

Zum Abstand der Messpunkte von den Quellen siehe Tabellen 3 und 4.

4.4 Messungen der Bestandesniederschläge

Die Erfassung der Bestandesniederschläge $B_{G,N}$ erfolgte durch Kronentrauemessungen. An den Hintergrundmessorten **Sa** und **Ho** wird seit 1996 der Sammeltyp „Münden“ (NLÖ, 1993) eingesetzt (jeweils 16 Sammler auf einer Fläche von ca. 300 m² gleichmäßig verteilt).

In der Umgebung der Stallanlagen wurden je drei Sammler-Systeme vom Typ „Osnabrück“ (NLÖ, 1993) pro Entfernungsstufe installiert. Jedes System besteht aus sechs Trichter-Flasche-Einheiten, mit einer Auffangfläche jeweils 200 cm², sodass die von Bleeker et al. (2005) geforderte Mindestauffangfläche von 3140 cm² deutlich überschritten wurde. Die Installation erfolgte ausschließlich unter dem Schirm der Baumkronen.⁶

Der Ermittlung der Vorbelastung $B_{V,N}$ an den Stallstandorten dienten Sammler, die mehr als 400 m entfernt von den Stallanlagen aufgestellt waren; in dieser Entfernung lagen die stallbürtigen Zusatzbelastungen nach den Modellrechnungen auf sehr niedrigem Niveau, sodass diese Messdaten der Vorbelastung zugeordnet werden konnten.

Messungen von $B_{G,N}$ an einem Transekts in Entfernung von 0, 10, 30 und 1000 m vom Waldrand hin zum Bestandesinneren sollten am emittentenfernen Messort **Tw** Aufschluss über die Auswirkungen der „Auskämmung“ von gas- und partikelgebundenem N geben (Waldrandeffekt).

Die Probenahmeintervalle betrugen bei mittleren Außentemperaturen von über 10 °C maximal zwei Wochen, bei niedrigeren Temperaturen vier Wochen. Die Vierwochen-Mischproben wurden auf NH_4^+ und NO_3^- sowie DON mit dem Continuous Flow Analyser analysiert (DIN EN ISO 11732; DIN EN ISO 13395).⁷

⁵ Aus datenschutzrechtlichen Gründen werden von diesem Messort keine Einzelwerte zu den Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Haltungsformen (Bodenhaltung, Kleingruppenhaltung) genannt.

⁶ Aus einer einjährigen Vergleichsmessung am Messort (**Sa**) lässt sich schließen, dass fehlende Berücksichtigung der Bestandeslücken zu einer Überschätzung der N-Flüsse für den gesamten Bestand um 30 % führen kann.

⁷ Andere Inhaltsstoffe (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, S) wurden mittels ICP-OES analysiert DIN EN ISO 11885. Sie wurden zur Qualitätsüberprüfung herangezogen, jedoch nicht detailliert ausgewertet.

4.5 Wetterdaten

Für die Ausbreitungsrechnung wurden – nach vorausgegangener Überprüfung ihrer Übertragbarkeit – die meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von repräsentativen Stationen verwendet. Es handelte sich um stündliche Daten für Windrichtung, Windgeschwindigkeit und zur atmosphärischen Stabilität.

An **Ma** wurden Vergleichsmessungen in 100 m Entfernung vom Stall durchgeführt. Sie bestätigten, dass die Daten des DWD zutreffend und damit für Ausbreitungsrechnungen anwendbar waren.

$$D_{Z, \text{mod}, \text{LAI}} = \beta_{\text{NH}_3} \cdot \frac{M_N}{M_{\text{NH}_3}} \cdot v_{D, \text{NH}_3, \text{LAI}}$$

mit

$D_{Z, \text{mod}, \text{LAI}}$	modellierte N-Zusatzdeposition nach LAI (2012) (in kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
β_{NH_3}	NH ₃ -Konzentration (in µg m ⁻³)
M	Molmasse (in g mol ⁻¹)
$v_{d, \text{NH}_3, \text{LAI}}$	Depositionsgeschwindigkeit von NH ₃ nach LAI (in cm s ⁻¹)

4.6 Modellierte Vorbelastung (Deposition)

Daten zur Vorbelastung (Deposition) $D_{V,N}$ werden für ganz Deutschland vom Umweltbundesamt (UBA, 2012) zur Verfügung gestellt (MAPESI). Diese Daten werden aus Messungen der Nass-Deposition und aus modellierten Emissionen unter Verwendung von LOTOS-EUROS (Builtjes et al., 2011) modelliert. Die räumlich hoch aufgelösten Datensätze (1 km x 1 km) werden in mehrjährigen Abständen aktualisiert. Die in dieser Arbeit herangezogenen Daten beschreiben die Situation im Jahr 2007.

4.7 Modellierung der Zusatzbelastung

Die Berechnungen der NH₃-Konzentrationen und N-Depositionen in der Umgebung der Stallanlagen erfolgten gemäß BMU (2002) mit dem Programm AUSTAL2000⁸ unter Beachtung der Rechenvorschriften, die sich aus VDI 3783, Bl. 13, Janicke (2009) und LAI (2012) ergeben. Die Ergebnisse der Rechnungen beziehen sich vorschriftsgemäß auf Durchtrittsflächen (Hüllflächen) in einer Höhe zwischen 0 und 3 m⁹. Für die emittentenbezogenen Messungen wurden für die Ausbreitungsrechnungen aktuelle Klimadaten von benachbarten für die Messorthe repräsentativen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

Die Berechnung der Zusatzdepositionen $D_{Z,N}$ erfolgte nach zwei unterschiedlichen Verfahrensweisen: Zum einen wurde $D_{Z,N}$ nach TA Luft (BMU, 2002) bestimmt. Diese als Zusatzdeposition $D_{Z, \text{mod}, \text{TAL}}$ bezeichnete (modellierte) Deposition wurde dabei direkt mit Hilfe von AUSTAL2000 unter Verwendung einer Depositionsgeschwindigkeit $v_d = 1,0 \text{ cm s}^{-1}$ berechnet. Zum anderen wurde gemäß LAI-Leitfaden (LAI, 2012) ein weiteres Rechenverfahren verwendet, in dem für den betrachteten Waldstandort mit dem Ausbreitungsmodell AUSTAL20000 gemäß TA Luft ($v_{d, \text{NH}_3, \text{TAL}} = 1,0 \text{ cm s}^{-1}$) die NH₃-Konzentrationen bestimmt und dann nach VDI 3782, Bl. 5, unter Verwendung von $v_{d, \text{NH}_3, \text{LAI}} = 2,0 \text{ cm s}^{-1}$ die Zusatzdeposition $D_{Z, \text{mod}, \text{LAI}}$ berechnet wurde:

5 Ergebnisse

Die Messungen der NH₃-Konzentrationen (Januar 2010 bis April 2011) erfolgten an Transekten an den Messorthe **Ma** und **Ne**, die von Bestandesniederschlägen (August 2009 bis April 2011) an den Messorthe **Ne** und **En**. Die Ergebnisse der Messungen wurden den berechneten Daten gegenübergestellt.

5.1 Gemessene NH₃-Konzentrationen

In der Nachbarschaft der Stallanlagen von **Ma** und **Ne** wurden die NH₃-Konzentrationen kontinuierlich in vier Entfernungsstufen gemessen. Die hochwüchsige Vegetation (Wald, Mais) bei **En** ließ keine Messungen der bodennahen NH₃-Konzentrationen zu. Die Ergebnisse der vierwöchigen Messintervalle sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die quellnächsten Messpunkte weisen die höchsten Konzentrationen auf (ausgezogene Linien). Die dritte und die vierte Entfernungsstufe sind voneinander kaum noch unterscheidbar; die Konzentration an der jeweiligen vierten Entfernungsstufe wird deshalb als Vorbelastung (Hintergrund-Konzentration β_{V, NH_3}) angesehen. Die höchste Vorbelastung von 8 µg m⁻³ (Jahresmittel) wurde an dem im Landkreis Vechta gelegenen Messor **Ne** festgestellt. Dieses Niveau liegt deutlich über den Langzeitwerten anderer Messungen in Deutschland (Dämmgen et al., 2013) und erreicht den von der UN-ECE genannten critical level von 8 µg m⁻³ (Jahresmittelwert) (siehe hierzu Cape et al., 2009). Auch an dem ca. 80 km weiter nördlich gelegenen Messor **Ma** wurde mit 6 µg m⁻³ eine hohe mittlere Konzentration beobachtet. Sie entspricht den von Köster et al. (2012) in agrarisch intensiv genutzten Regionen Niedersachsens festgestellten hohen NH₃-Konzentrationen.

Die Messwerte zeigen den typischen Jahresgang mit Maxima zur Zeit der Düngerausbringung. Der drastische Anstieg der NH₃-Konzentrationen bei dem stallnächsten Messpunkt von **Ma** in der letzten Messperiode wurde durch die Leerung einer (sonst geschlossenen) Kotlagerhalle verursacht. Die Emissionen dieser NH₃-Quelle wurden bei der Ausbreitungsrechnung einbezogen.

⁸ Benutzeroberfläche der Fa. Argusoft GmbH, Brühl

⁹ Als Hüllfläche wird die (fiktive) Durchtrittsfläche in der Höhe $d + z_0$ (d : Verschiebungshöhe, z_0 : Rauigkeitslänge)

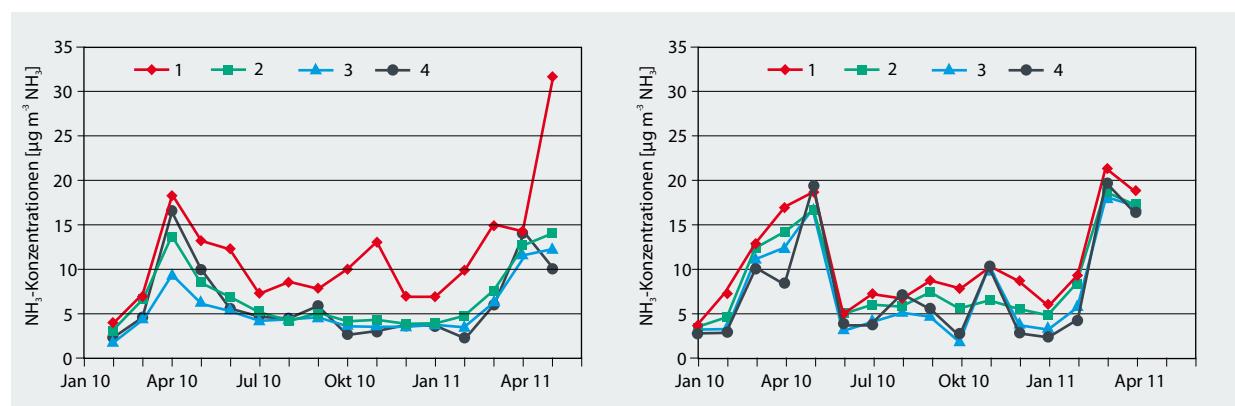


Abbildung 2

NH₃-Konzentrationen an den Messorten Ma (links) und Ne (rechts) für unterschiedliche Entfernungen zum Stall. Zu den Abständen der Messpunkte 1 bis 4 zum Stall siehe Tabellen 3 und 4.

5.2 Modellierte NH₃-Konzentrationen

Die für Ma und Ne gemessenen und modellierten Zusatzbelastungen (Konzentrationen $\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{ber}}$ und $\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{TAL}}$) und die gemessenen Konzentrationen $\beta_{G, \text{NH}_3, \text{mess}}$ sind in den Tabellen 3 und 4 einander gegenübergestellt.

Tabelle 3

Mittlere NH₃-Konzentrationen in µg m⁻³ an Ma ($\beta_{G, \text{NH}_3, \text{mess}}$: gemessene Gesamtkonzentration; $\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{ber}}$: Aus Messwerten berechnete Zusatzkonzentration; $\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{TAL}}$: nach TA Luft modellierte Zusatzkonzentration). Negative Werte bedingt durch höhere Werte an der Hintergrundmessstelle.

	Entfernung von Stallanlage [m]			
	43	150	260	520
$\beta_{G, \text{NH}_3, \text{mess}}$	12	6,9	5,7	6,4
$\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{ber}}$	5,6	0,5	-0,7	0,0
$\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{TAL}}$	12,8	4,1	1,7	0,5

Tabelle 4

Mittlere NH₃-Konzentrationen in µg m⁻³ am Messort Ne (Symbole wie in Tabelle 3).

	Entfernung von Stallanlage [m]			
	44	150	225	470
$\beta_{G, \text{NH}_3, \text{mess}}$	10,5	8,8	7,9	7,6
$\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{ber}}$	3,0	1,2	0,3	0,0
$\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{TAL}}$	9,9	1,6	0,5	0,1

Die Zusatzbelastung $\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{ber}}$ errechnet sich aus der Differenz der mittleren NH₃-Konzentrationen am stallfernen vierten Messpunkt und denen der stallnäheren Messpunkte. Gegenüber den modellierten NH₃-Konzentrationen sind die Unter-

schiede zum Teil erheblich. An den stallnahen Messpunkten betragen die mittels AUSTAL2000 berechneten NH₃-Konzentrationen an Ma mehr als das Doppelte und an Ne über das Dreifache der gemessenen NH₃-Konzentrationen. Mit der Abnahme der NH₃-Konzentrationen im weiteren Verlauf der Transmissionsstrecke nähern sich die aus Messwerten berechneten und die modellierten Konzentrationen $\beta_{Z, \text{ber}}$ und $\beta_{Z, \text{TAL}}$ einander an. 150 m von der Stallanlage an Ma entfernt betrug $\beta_{Z, \text{NH}_3, \text{TAL}}$ noch etwa 4 µg m⁻³, während sie nach den Messungen fast bei 0 µg m⁻³ lag. An Ne waren in diesem Entfernungsbereich die Unterschiede bereits vernachlässigbar. An Ma sanken die modellierten Konzentrationen hingegen erst bei Entfernungen über 260 m auf das Niveau von β_{G, NH_3} .

5.3 Gemessene N-Flüsse in der Kronentraufe

Die in Abbildung 3 für En und Ne dargestellten $B_{G, N}$ veranschaulichen deren räumlichen Gradienten. Im Unterschied zu den NH₃-Konzentrationen beziehen sich die Angaben zu $B_{G, N}$ ausschließlich auf hoch gerechnete Jahressummen, da die gemessenen 4-Wochen-Werte witterungsbedingt (insbesondere durch die Verteilung der Niederschlagsmengen) nur geringe Aussagekraft haben.

Am Messort En dagegen wurde der höchste N-Eintrag $B_{G, N}$ nicht am Waldrand (15 m vom Betrieb entfernt), sondern erst im Abstand von 45 m gemessen. Dies wird auf die geringe Höhe des Fichtenbestandes (ca. 15 m) und seine geringe Entfernung zum Stallgebäude zurückgeführt, wodurch der Waldrand von der Abluftfahne teilweise überströmt wird und der Auskämmungseffekt teilweise erst in der zweiten Entfernungsstufe wirksam wird. Weitere 45 m vom Stall entfernt sanken die $B_{G, N}$ auf 69 kg ha⁻¹ a⁻¹; in 170 m Entfernung wurden nur noch 32 kg ha⁻¹ a⁻¹ eingetragen. 290 m vom Stall entfernt wurden jedoch wieder 42 kg ha⁻¹ a⁻¹ gemessen. Dieser Messpunkt lag allerdings oberhalb einer kleinen Bodensenke. Als $B_{V, N}$ wurde deshalb das Mittel (37 kg ha⁻¹ a⁻¹) der letztgenannten Messwerte angenommen.

An Ne zeigte sich der zu erwartende Verlauf der N-Flüsse in der Kronentraufe mit einer maximalen Belastung von

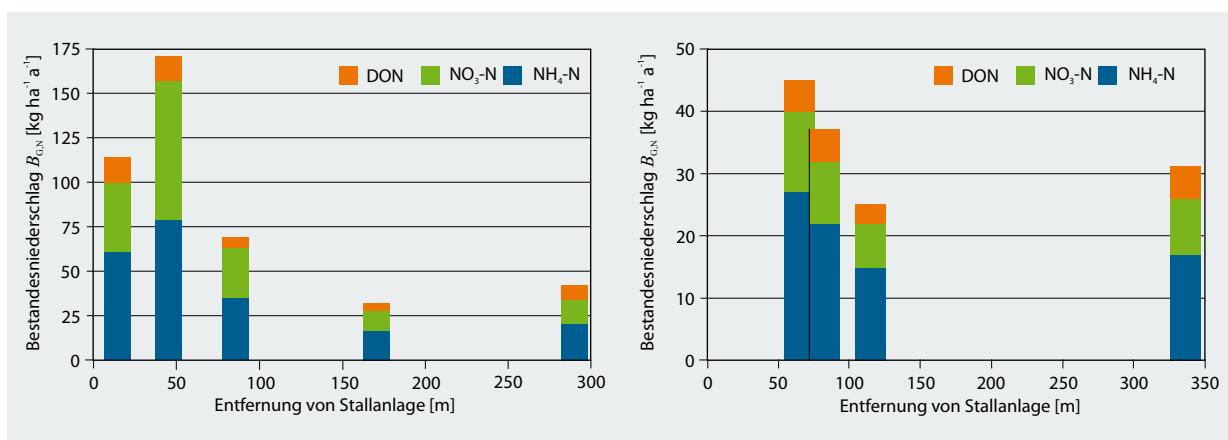


Abbildung 3

N-Bestandessiederschläge $B_{G,N}$ in der Nachbarschaft eines Legehennenbetriebes am Messort **En** (links) und eines Mastschweinebetriebes am Messort **Ne** (rechts)

46 kg ha⁻¹ a⁻¹ am Waldrand, die zum Bestandesinneren stetig abnahm. Das Niveau der $B_{V,N}$ wurde bereits bei 115 m vom Stall festgestellt. Die $B_{G,N}$ lagen am entferntesten Messpunkt mit 30 kg ha⁻¹ a⁻¹ etwas über denen des stallnäheren Messpunktes (24 kg ha⁻¹ a⁻¹). Für $B_{V,N}$ wurde hieraus wiederum der Mittelwert gebildet (27 kg ha⁻¹ a⁻¹).

$\text{NH}_4\text{-N}$ nimmt den größten Anteil unter den in B_N enthaltenen N-Spezies ein. Allerdings nimmt der $\text{NH}_4\text{-Anteil}$ mit Annäherung zu den Stallanlagen an beiden Orten ab. Dies ist wahrscheinlich auf Umsetzungsprozesse im Kronenraum zurückzuführen (siehe unten).

Ein geringerer, jedoch nicht zu vernachlässigender N-Eintrag in den Boden erfolgt über lösliche organische N-Verbindungen (DON), die aus dem Kronenraum ausgewaschen oder durch mikrobielle Umsetzung gebildet werden (zur Herkunft von DON vgl. Cape et al., 2011; zur Bildung und Aufnahme von DON im Kronenraum siehe Cape et al., 2010). An **Ne** lag der N-Eintrag über DON an allen Messpunkten zwischen 3 und 6 kg ha⁻¹ a⁻¹, mit dem höchsten Wert ebenfalls am Waldrand. Bei **En** in der Nähe zum Waldrand wurden weitere 13 bis 14 kg ha⁻¹ a⁻¹ DON eingetragen, in größerer Entfernung immer noch zwischen 4 und 8 kg ha⁻¹ a⁻¹.

5.4 Modellierte N-Depositionsraten

Die an **En** und **Ne** gemessenen und modellierten Depositionen sind in den Tabellen 5 und 6 einander gegenübergestellt. Die $D_{Z,\text{ber}}$ wurde aus Differenz von D_B und D_V berechnet (**En**: 37 kg ha⁻¹ a⁻¹; **Ne**: 27 kg ha⁻¹ a⁻¹; siehe oben). Hierdurch ergeben sich lokal negative Werte. Berücksichtigt wurde die Summe der analysierten N-Fraktionen ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DON). $\text{NO}_3\text{-N}$ und DON werden nicht oder nur in geringem Umfang direkt aus Stallanlagen emittiert, gelangen aber nach Ferntransport oder durch Umsetzung zu DON im Kronenraum in die Kronentraufenwässer.

Aus den Tabellen 5 und 6 ist ersichtlich, dass die berechneten Zusatzeinträge $B_{Z,N,\text{ber}}$ und die modellierten Zusatzdepositionen $D_{Z,N,\text{TAL}}$ und $D_{Z,N,\text{LAI}}$ zum Teil so große Unterschiede aufweisen, dass sie nicht allein auf kleinräumige Standortanomalien oder Messunsicherheiten zurückzuführen sind.

Aufgrund der erwähnten Überströmungs- und Auskämmeffekte erreichten die Messwerte an **En** erst in der zweiten Entfernungsstufe ihr Maximum. Derartige Überströmungseffekte im Stallnahbereich sind mit dem verwendeten Ausbreitungsmodell nicht darstellbar. Unter Berücksichtigung der beiden stallnahen Messpunkte zeigt sich jedoch eine hohe Übereinstimmung der Messwerte ($B_{G,N}$ von 77 und 134 kg ha⁻¹ a⁻¹) mit den Ergebnissen nach BMU (2002) ($D_{Z,N,\text{TAL}}$ von 133 und 72 kg ha⁻¹ a⁻¹). In größerer Entfernung lagen die Ergebnisse beider Ansätze, mit Ausnahme der vierten Entfernungsstufe, ebenfalls auf gleichem Niveau. Die Unterschiede der nach beiden Ansätzen ermittelten Daten sind insgesamt gering.

Tabelle 5

Am Messort **En** gemessene N-Bestandessiederschläge ($B_{G,N}$) und die berechneten Zusatzbestandessiederschläge ($B_{Z,N,\text{ber}}$) sowie die nach TA Luft ($D_{Z,\text{mod},\text{TAL}}$) und LAI ($D_{Z,\text{mod},\text{LAI}}$) ermittelte Zusatzdeposition (alle Angaben in kg ha⁻¹ a⁻¹ N).

	Entfernung von Stallanlage [m]					
	15	45	85	170	290	$B_{V,N}$
$B_{G,N}$	114	171	69	32	42	47
$B_{Z,N,\text{ber}}$	77	134	32	-4,9	4,9	
$D_{Z,N,\text{TAL}}$	133	72	28	10	5,6	
$D_{Z,N,\text{LAI}}$	279	140	51	17	9,8	

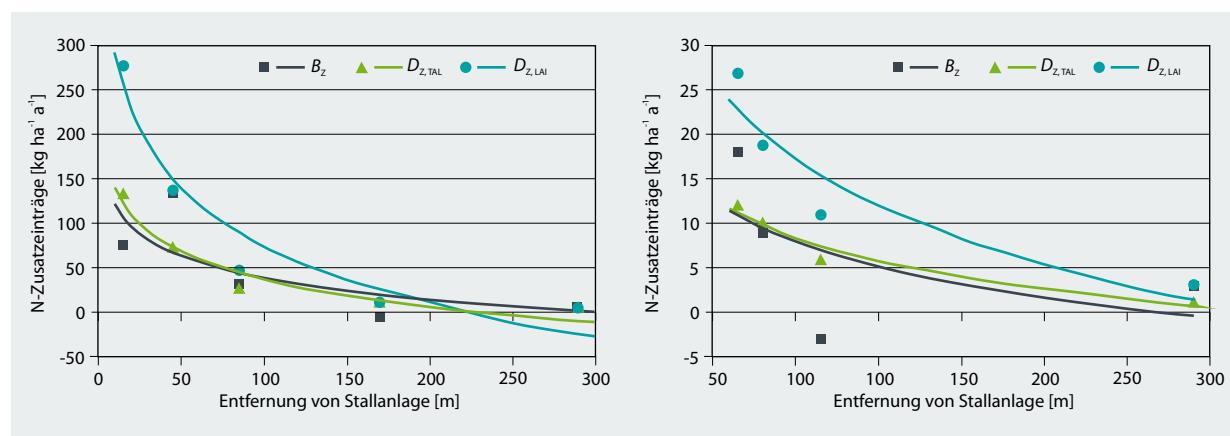


Abbildung 4

N-Zusatzeinträge als Bestandesniederschläge B_N und Depositionen D_N . Links: Messort En, rechts: Messort Ne.

Tabelle 6

Am Messort Ne bestimmte N-Einträge und Zusatzeinträge, Symbole und Einheiten wie in Tabelle 5.

	Entfernung von Stallanlage [m]				
	65	80	115	340	$B_{V,N}$
$B_{G,N}$	46	37	24	30	27
$B_{Z,N,ber}$	18	9	-3,0	3,0	
$D_{Z,N,TAL}$	12	10	5,9	1,2	
$D_{Z,N,LAI}$	27	19	11	3,1	

An Ne sind die Verhältnisse – auf niedrigerem Belastungsniveau – mit denen am Messort En vergleichbar. $B_{Z,N,ber}$ liegt hier am Waldrand mit 18 kg $ha^{-1} a^{-1}$ N über den nach TA Luft bestimmten Werten $D_{Z,mod,TAL}$ in größerer Entfernung kehren sich die Verhältnisse jedoch um.

Glättet man die Beziehungen zwischen $B_{Z,N,ber}$, $D_{Z,N,TAL}$ und $D_{Z,N,LAI}$ unter Verwendung einer logarithmischen Funktion gemäß

$$B_{Z,N,ber} = a_B + b_B \cdot \ln x$$

$$D_{Z,N,TAL} = a_{TAL} + b_{TAL} \cdot \ln x$$

$$D_{Z,N,LAI} = a_{LAI} + b_{LAI} \cdot \ln x$$

mit Konstanten a und b und der Entfernung x von der Quelle, so ergeben sich für $B_{Z,N,ber}$ und $D_{Z,N,TAL}$ Kurven, die nahezu deckungsgleich sind. Die Ausgleichskurve für $D_{Z,N,LAI}$ liegt deutlich höher als beide genannten: Nach dem LAI-Verfahren betragen die Depositionsraten $D_{Z,N,LAI}$ an der Mehrzahl der Messstellen etwa das Doppelte der nach TA Luft modellierten und der gemessenen N-Flüsse.

5.5 Messungen zu Walrandeffekten

Am emittentenfernen Messort Tw wurden Messungen durchgeführt, mit denen der Einfluss eines Walrandes auf den Bestandesniederschlag quantifiziert werden sollte. Abbildung 5 zeigt deutlich den Mehreintrag, der auf die Abscheidung von N („Auskämmung“) aus der in den Bestand einströmenden Luft zurückgeführt wird. Es wird auch deutlich, dass dieser Einfluss auf die ersten Dekameter begrenzt ist und nicht zur Erklärung der Zusatzbelastungen an den Messorten En und Ne beiträgt.

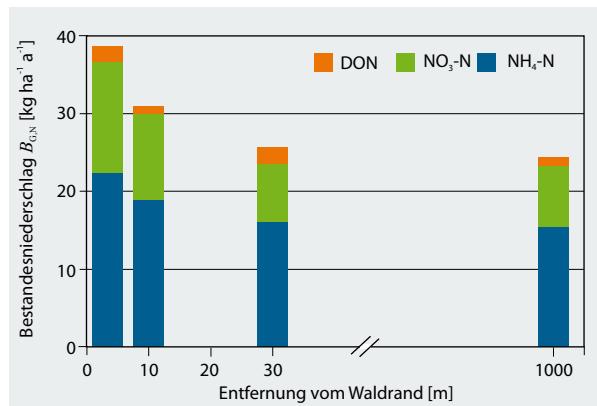


Abbildung 5

N-Bestandesniederschläge $B_{G,N}$ am Walrandtransekt des Standortes Tw

5.6 Einordnung der Vorbelastung, zeitliche Repräsentativität

An den emittentenfernen Messpunkten der Messorte En und Ne sowie an Tw, Ho und Sa wurden über einen Zeitraum von mindestens 12 Monaten Messungen von $B_{G,N}$ in Nadelwäldern durchgeführt. Sie wurden als gemessene Vorbelastungen $B_{V,N}$ angesehen (Tabelle 7). An den Messorten Ho und Sa wurden bereits mehr als zehn Jahre entsprechende Messun-

gen durchgeführt, die zur Bewertung der zeitlichen Repräsentativität dienen können. Im zehnjährigen Mittel wurden an **Ho** $23 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und an **Sa** $24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gemessen, im Untersuchungszeitraum waren dies nur jeweils $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Differenz von ca. 15 % entspricht etwa der Differenz zu den Niederschlagsmengen im Projektzeitraum.

In Tabelle 7 werden die entsprechend korrigierten Langzeitwerte den vom Umweltbundesamt (UBA) bereitgestellten Daten (MAPESI) zur Vorbelastung (UBA, 2007) gegenübergestellt.

Tabelle 7

Bestandesniederschläge zur Vorbelastung ($B_{V,N}$) (für **Ho** und **Sa** Langzeitmittel, für **En**, **Ne** und **Tw** unkorrigierte Messwerte) und die UBA-Vorbelastungsdaten zur N-Deposition $D_{V,N,UBA}$ (UBA, 2012). Angaben in $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$.

	Standort				
	En	Ne	Ho	Sa	Tw
$B_{V,N}$	37	27	23	24	25
$D_{V,N,UBA}$	56	56	61	41	43

Die Unterschiede zwischen den vom UBA veröffentlichten MAPESI-Daten zur N-Gesamtdeposition und den aus Bestandesniederschlägen ermittelten Vorbelastungen sind erheblich. Dabei übersteigen die modellierten Depositionen die Bestandesniederschläge erwartungsgemäß in jedem Fall. Auch die räumliche Verteilung dieser Daten und ihrer jeweiligen Differenzen unterscheidet sich sehr. Die höchste $D_{V,N,UBA}$ wurde am Messort **Ho** ($61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), die höchste $B_{V,N}$ am Messort **En** ($37 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ermittelt. Unter den etwa 1,5 km hiervon entfernten Japanlärchen des Messortes **Ne** wurden $27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gemessen. Die in einer Auflösung von 1 km^2 kartierten MAPESI-Daten weisen für diesen Bereich denselben Wert des benachbarten Rasters vom Messort **En** auf. Die Differenz der Messdaten beider Messorte von $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ resultiert vermutlich aus den unterschiedlichen Oberflächen-eigenschaften der nur halbjährig benadelten Lärchen bei **Ne**. Hiervon unterscheiden sich die Ergebnisse der Kronentrauemessungen $B_{G,N}$ an dem ca. 90 km entfernt liegenden Lärchenbestand **Tw** mit $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ kaum. An diesem Messort wurden durch Transektemessungen auch bei fehlendem Stalleneinfluss maximale Einträge von $38 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ am Waldrand festgestellt (Abbildung 5). Die Differenz von $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ beschränkte sich allerdings auf einen schmalen Saum und hatte bereits nach 30 Metern das Niveau der Vorbelastung $B_{V,N}$ erreicht.

6 Diskussion

Durch Messungen und Modellierungen wurden im nordwestdeutschen Raum deutliche Belastungen der Wälder durch hohe NH_3 -Konzentrationen und N-Einträge festgestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass die für Waldökosys-

teme unbedenklichen N-Depositionen (critical loads) – unabhängig vom Bestimmungsverfahren – stets, zum Teil aber erheblich überschritten wurden. Die daraus resultierenden ökologischen Konsequenzen kommen in den Kompartimenten Baumbestand, Bodenvegetation, Boden und Wasser mehr oder minder deutlich zum Ausdruck. Auf Dosis-Wirkung-Beziehungen an den benachbarten Stallstandorten wird in Mohr und Dämmgen (2013) gesondert eingegangen.

Die vergleichenden Bestimmungen der NH_3 -Konzentrationen (gemessene und modellierte Zusatzkonzentrationen) und N-Flüsse (gemessene Zusatzbestandesniederschläge und modellierte Zusatzdepositionen) zeigen große Unterschiede. Bei den Flüssen lagen die Unterschiede sowohl gegenüber der mit AUSTAL2000 berechneten Zusatzbelastung ($D_{Z,N,TAL}$) als auch der vom UBA berechneten Daten zur Vorbelastung ($D_{V,N,UBA}$) in einer Größenordnung von 100 % (Tabelle 5 und 6). Die Gründe hierfür ließen sich im Rahmen dieser Studie nur teilweise erklären:

6.1 Ammoniak-Konzentrationen

NH_3 führt erst bei mittleren Konzentrationen von über $50 \mu\text{g m}^{-3}$ bei Gefäßpflanzen zu (direkten) Gewebeschädigungen (Krupa, 2003; van Dijk et al., 2001), die von den Messergebnissen auch in der Nähe der Stallanlagen selbst an den nächstgelegenen Messpunkten nicht erreicht wurden.

Die NH_3 -Konzentration hat jedoch eine große Bedeutung für die Höhe der Dosisgröße der N-Deposition. Hier ist die trockene Deposition von NH_3 abhängig von der Konzentrationsdifferenz zwischen Umgebungsluft und Blattoberfläche und wird nach der Inferentialmethode durch Multiplikation von β_{Z,NH_3} mit der Depositionsgeschwindigkeit ermittelt.

Zur Modellierung der NH_3 -Konzentrationen in der Umgebung von Stallanlagen ($\beta_{Z,\text{NH}_3,\text{TAL}}$) wurde in dieser Studie gemäß BMU (2002) das Programm AUSTAL2000 verwendet. Die erhaltenen Werte lagen deutlich über den Ergebnissen, die anhand von Vergleichsmessungen mit Passivsammelnern ermittelt wurden ($\beta_{Z,\text{NH}_3,\text{be}}$). Die festgestellten Unterschiede von 100 bis 200 % (Tabelle 3) ließen sich durch Änderung der Rauigkeitswerte im Modell nicht erklären. Ähnlich vergleichende Untersuchungen, die Hartmann et al. (2004) im Zuge einer Validierung von AUSTAL vornahmen, ergaben ebenfalls höhere Messdaten.

6.2 N-Depositionen und -Bestandesniederschläge

Systematische Unterschiede. Es ist davon auszugehen, dass mit Messungen der Kronentraufe nicht der gesamte N-Eintrag in den Wald erfasst wird (Dämmgen et al., 1997; Dämmgen, 2005). Pflanzen sind in der Lage, oberirdisch, d. h. überwiegend über das Blatt, reaktive N-Spezies aufzunehmen und zu assimilieren (z. B. Lorenz et al., 2008). Dieser Anteil ist bei Wäldern nicht direkt messbar, sondern nur in Kombination mit mikrometeorologischen Verfahren erfassbar. Die von Ulrich (1991) und Draaijers und Erisman (1995) beschriebenen Verfahrensweisen zur Erfassung der Aufnahme partikularer N-Verbindungen im Kronenraum (Kronenraumbilanzierungsansatz) ergeben unter norddeutschen Verhältnissen

keine nennenswerten Unterschiede zu den gemessenen N-Flüssen im Kronenraum (Dämmgen, 2005).¹⁰

Zusatzbelastung. Für die Ermittlung der Zusatzbelastung ($D_{Z,N}$) wurden die Ergebnisse zweier Rechenverfahren den Messergebnissen von Kronentraufmessungen einander gegenübergestellt. Gegenüber den nach TA Luft (BMU, 2002) berechneten Werten waren die Unterschiede der Ergebnisse zu den Kronentraufmessungen gering. Dies bedeutet, dass mit diesem Verfahren oberirdische N-Aufnahmeraten im Wald offenbar nicht berücksichtigt und somit die wirklichen N-Einträge unterschätzt werden. Inwieweit diese Feststellung für andere N-empfindliche Ökosysteme zutrifft, bleibt offen.

Deutlich unterschiedliche N-Flüsse ergaben sich zwischen den Messwerten und den nach LAI (2012) ermittelten Modellwerten. Die Differenz von durchschnittlich 100 % ist zumindest teilweise auf die o.g. systematischen Fehler zurückzuführen. Inwieweit die N-Massenflüsse von etwa 20 bis 100 kg ha⁻¹ a⁻¹ über den Kronenraum, der Bodenvegetation und/oder der Humusauflage aufgenommen werden, lässt sich in dieser Studie nicht beantworten. Aufgrund der ungünstigen Bedingungen für mikrometeorologische Untersuchungen an emittentennahen Standorten ließe sich dieser Sachverhalt möglicherweise durch vertiefende Untersuchungen klären (z. B. ¹⁵N-Messungen, N-Bilanzierungen, Kompensationspunkt). Bei Waldökosystemen wird von oberirdischen Aufnahmeraten ausgegangen, die in einer Größenordnung zwischen 20 und 30 % der über Bestandesniederschlag eingetragenen N-Flüsse liegen (BMELF, 1997; Gehrmann et al., 2001; Papen, 2005; Zimmermann et al., 2006; Verhagen und van Diggelen, 2006; Loubet et al., 2009).

Die über Pflanzenoberflächen aufgenommenen N-Massenströme müssen assimiliert werden (Speicherung als Aminosäuren oder anderen organischen Substanzen), was bei einer bereits hohen N-Versorgung pflanzenphysiologisch limitiert ist. Bei hohen N-Aufnahmeraten über Blätter oder Nadeln kommt es zu einer Anreicherung von NH₄ im Zellsaft. Dieser Prozess steht in einer dynamischen Beziehung zu den NH₃-Konzentrationen in der Außenluft und steuert direkt über Austauschprozesse im Blatt oder über den Boden indirekt den Kompensationspunkt, der eine bedeutende Eingangsgröße zur Berechnung der Depositionsgeschwindigkeit (v_{d,NH_3}) darstellt (Nielsen et al., 2002; Loubet et al., 2009; BMELF, 1997). Sutton et al. (1993) postulieren daher einen negativen Zusammenhang zwischen den gemessenen NH_x-Konzentrationen und v_{d,NH_3} .

Durch saure Vegetationsoberflächen erhöht sich der Abscheidegrad des alkalischen NH₃. Aus Stickstoffoxiden und NH₃ gebildetes NH₄NO₃ bleibt bei niedrigem pH chemisch stabil. Bei pH-Werten der Vegetationsoberflächen, die nach

den Ergebnissen dieser Studie und Dämmgen (2005) auch in größerer Entfernung von NH₃-Quellen um 6 liegen, können bereits Umgebungstemperaturen von über 13 °C zu einer Thermolyse unter Freisetzung von NH₃ und HNO₃ führen (Huebert, 1988; Mohr, 2012). Diese bidirekionalen Flüsse bleiben von einem Partikelmodell wie AUSTAL2000 unberücksichtigt.

Die Inferentialmethode stellt generell einen konservativen Ansatz dar (VDI 3783, Bl. 13); zusammen mit einer unter konservativen Gesichtspunkten gewählten v_{d,NH_3} erklärt sich die deutliche Überschätzung der nach LAI (2012) modellierten $D_{Z,N}$. Dies wird auch von Straub et al. (2013) bei einer vergleichenden Modellierung heraus gestellt. Jedoch ergab der von diesen Autoren präferierte Rechenansatz (Methode 3) bei einer nachträglich vorgenommenen Vergleichsrechnung nahezu keine Unterschiede zu der nach LAI (2012) modellierten $D_{Z,N}$. Der bei Straub et al. (2013) nicht näher erläuterten Verfahrensweise liegen möglicherweise Standortverhältnisse zugrunde, die – anders als in dieser Studie – durch größere Entfernung zu Stallanlagen oder Waldflächen geringere Rauigkeiten voraussetzen.

Auch unter Berücksichtigung einer oberirdischen N-Aufnahme durch Addition von weiteren 30 % zu $B_{Z,N}$ verbleibt eine Diskrepanz von ca. 70 % zur der nach LAI (2012) modellierten $D_{Z,N}$. Unter der Annahme, dass die verwendete v_d von 2,0 cm s⁻¹ zutreffender ist als der bei BMU (2002) genannte Wert, lässt sich diese Diskrepanz nur durch die Überschätzung der modellierten NH₃-Konzentrationen erklären. Dies wird anhand der Vergleichsmessung in 1,5 m Höhe bestätigt, nach denen die modellierten NH₃-Konzentrationen über den Transect gemittelt um etwa den Faktor 3 über den Messwerten liegen.

Vorbelastung. Größere Unterschiede von $B_{V,N}$ der einzelnen Mессоре sind im Wesentlichen in einer abweichenden Struktur der Waldbestände (Höhe, Baumart, Waldrand) begründet, wie sie auch bei Dämmgen (2005) dokumentiert wurden. Die am Waldrand des Mессоре Tw festgestellte Flussrate $B_{V,N}$ von 38 kg ha⁻¹ a⁻¹ liegt auf dem Niveau der für dieses Gebiet modellierten Vorbelastung $D_{V,N}$ von 43 kg ha⁻¹ a⁻¹ (UBA, 2012), allerdings deutlich über der im Bestandesinneren gemessenen $B_{G,N} = B_{V,N}$ von 25 kg ha⁻¹ a⁻¹. Der gemessene Anstieg um ca. 50 % gegenüber der $B_{V,N}$ unmittelbar am Waldrand beschränkt sich auf einen schmalen Saum. Innerhalb von weniger als 30 m wird das Niveau der Vorbelastung erreicht. Vergleichbare Entfernung zum Waldrand werden bei Verhagen und Diggelen (2006) sowie Wuyts et al. (2008) genannt; allerdings gehen Spangenberg und Kölling (2004) von lokal deutlich breiteren Waldsäumen aus. Bei Depositionsmodellen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km (z. B. UBA, 2012) sind derartige Waldrandsituationen nicht darstellbar und unter konservativen Gesichtspunkten mit einem interpolierten Wert für die $D_{V,N}$ zu berücksichtigen. Kleinere Waldfächen mit einem relativen großen Waldrandanteil wie an den Standorten En und Tw sind hierdurch höheren N-Depositionen ausgesetzt, sodass bei einer angenommen maximalen oberirdischen N-Aufnahmerate von 30 % die modellierte $D_{V,N}$ plausibel erscheint. Bei den größeren Wäldern der anderen Mессоре liegt die Differenz zu den Vorbelastungsdaten jedoch auf einem Niveau, das anhand der Messdaten zur $B_{V,N}$ auch bei konservativer Betrachtung nicht nachvollziehbar ist.

¹⁰ Die eingesetzten Methoden erfassen bzw. errechnen jeweils unterschiedliche Depositionen. Die Transektmessungen von $B_{G,N}$ als Funktion des Abstandes erlauben eine experimentelle Bestimmung sämtlicher relevanter reaktiver N-Spezies (NH₃, NH₄⁺, NO₂, NO₃⁻, DON) in der Atmosphäre. Ihre im Kronenraum stattfindenden Interaktionen und Depositionen können den benachbarten Stallanlagen in ihrer Summe ($B_{Z,N}$) zugeschrieben werden, sodass eine weitergehende differenzierte Betrachtung der N-Spezies nicht erforderlich ist.

Depositionsgeschwindigkeiten. Für die Modellierung von N-Einträgen lassen sich lokale Modifikationen der Bestandesstruktur mit einer entsprechenden Anpassung der Depositionsgeschwindigkeit berücksichtigen (Sutton et al., 2008).

Die Ermittlung von Zusatzdepositionen ($D_{Z,N}$) erfolgt nach dem LAI-Leitfaden durch Multiplikation der mit dem Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 modellierten NH_3 -Konzentration mit einer v_d für Wald von $2,0 \text{ cm s}^{-1}$ (Inferentialmodellierung). AUSTAL2000 erlaubt eine Modellierung von $D_{Z,N}$, die ausschließlich durch trockene Deposition von NH_3 zu stande kommt. Da es sich um ein Partikelmodell handelt, berücksichtigt es keine chemischen Reaktionen im Verlauf der Transmission (insbesondere nicht die chemische Senke der Reaktion von NH_3 zu NH_4^+). Diese Vereinfachung erscheint gerechtfertigt, da die Transportzeiten klein sind gegenüber den Halbwertszeiten möglicher Reaktionen. Außerdem fehlen in Regionen mit hohen β_{NH_3} die notwendigen atmosphärischen Säuren. Eine verminderte NH_3 -Aufnahme sowie Interaktionen auf den Rezeptoroberflächen können jedoch zu einem deutlichen Anstieg des Kompensationspunktes bzw. einer Abnahme von v_{d,NH_3} führen. Derartige Bedingungen gewinnen bei höherer NH_3 -Belastung an Bedeutung und sind bei Modellierungen zu berücksichtigen (Loubet et al., 2009; Wichink Kruit et al., 2007).

Der nach TA Luft für Ausbreitungsrechnungen genannte Wert der Depositionsgeschwindigkeit $v_{d,\text{NH}_3,\text{TAL}} = 1,0 \text{ cm s}^{-1}$ stellt einen für verschiedene Landnutzungsformen generalisierenden Wert dar, der in der Literatur für Wald häufig höher angesetzt ist. Diesem Defizit kommt die später erschienene Richtlinie VDI 3782, Bl. 5, mit der Nennung einer ebenfalls pauschalen v_d für Wald von $2,0 \text{ cm s}^{-1}$ nach, auf die sich der LAI-Leitfaden stützt ($v_{d,\text{NH}_3,\text{LAI}}$). Dieser Wert basiert auf einer konventionellen Festlegung aus einem breiten Spektrum von Literaturwerten mit z. T. deutlich niedrigeren und höheren Werten. Ihnen gemeinsam sind Untersuchungen, die zu Zeiten höherer Niederschlagsacidität und außerhalb des unmittelbaren Einflussbereiches von Stallanlagen durchgeführt wurden. Durch diese Faktorenkonstellation ist generell von höheren v_{d,NH_3} als in der Umgebung von NH_3 -Quellen auszugehen. Die in Douglastienbeständen der Niederlande ermittelte mittlere v_{d,NH_3} von $2,5 \text{ cm s}^{-1}$ basiert fast ausschließlich auf Messungen am Tage (Erisman et al., 2001). Aufgrund der Assimilationsleistung der Pflanzenbestände können die Tagesswerte deutlich über den Nachtwerten liegen (Duyzer et al., 1993; Dennis et al., 2010). Die $v_{d,\text{NH}_3,\text{LAI}}$ von $2,0 \text{ cm s}^{-1}$ für Wald stellt somit unter Einbeziehung ungünstigerer Verhältnisse (z. B. Waldrandsituation, Nadelwald) eine für mittel-europäische Verhältnisse konservative Abschätzung der Depositionsgeschwindigkeit dar. Aus einer jüngeren, ebenfalls in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten durchgeführten Untersuchung in Nordwest-Deutschland (Dämmgen, 2005) wurde in einem Nadelwald ein mittleres v_{d,NH_3} von $1,6 \text{ cm s}^{-1}$ festgestellt.¹¹ Die hieraus resultierende mikrometeorologisch ermittelte N-Deposition (einschließlich oxidiertener

N-Spezies) $D_{G,N}$ liegt mit $57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ über den im aktuellen MAPESI-Datensatz genannten N-Eintrag $D_{G,N}$ von $46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Derartige Abweichungen sind unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Bezugszeitraumes sowie Mess- und Modellgenauigkeiten von $\pm 30\%$ akzeptabel. Die MAPESI-Daten wurden u. a. über ein Widerstandsmodell zur Ermittlung der trockenen N-Deposition berechnet (Buitjes et al., 2011). Die v_{d,NH_3} liegen bei Nadelwald zwischen $1,6 \text{ cm s}^{-1}$ (Referenzhöhe 1 m) und $2,2 \text{ cm s}^{-1}$ (Referenzhöhe 25 m) und bei Laubwald zwischen $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ (Referenzhöhe 1 m) und $2,1 \text{ cm s}^{-1}$ (Referenzhöhe 25 m). Die über Kronentraufmessungen ermittelte $B_{V,N}$ betrug an diesem Standort $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Dies setzt eine oberirdische N-Aufnahme von 27 bzw. $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ voraus, die deutlich über den in der Literatur genannten Aufnahmeraten von bis zu 30 % des N-Bestandesniederschlags liegt. Die um diesen Anteil erhöhte $B_{V,N}$ ($39 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) wäre – unter ungünstigsten Bedingungen (Waldrandeffekt, hohe Rauigkeit, kleinfächige Waldbestände, niedriger Kompensationspunkt) – vergleichbar mit einer konservativ (Überschätzung von 20 bis 30 %) mikrometeorologisch ermittelten und modellierten $D_{V,N}$.

6.3 Fazit

- Die Frage „Ist die insbesondere in Regionen mit hohen Viehdichten relativ hohe regionale Hintergrundbelastung (Vorbelastung) sachgerecht angesetzt?“ kann nicht eindeutig beantwortet werden:

Die Modellierungen zur Ermittlung der N-Depositionen in der Umgebung von Stallanlagen sowie zur Vorbelastung atmosphärischer Stickstoffeinträge weisen gegenüber Messungen der Bestandesniederschläge erhebliche Unterschiede auf. Dies resultiert u. a. aus der systematisch bedingten Unterschätzung der N-Depositionen durch Kronentraufmessungen. Aber auch Modellierungen und mikrometeorologische Untersuchungen bergen Unsicherheiten, die möglicherweise zu konservativen Schätzungen führen. Die MAPESI-Daten (UBA, 2012) zur $D_{V,N}$ liegen dadurch im Untersuchungsgebiet vermutlich im oberen Bereich der tatsächlichen atmosphärischen Netto-Einträge. Zumindest bei größeren, emittentenfernen Waldbeständen im Nordwesten Niedersachsens ist von einer Überschätzung in einer Größenordnung von 10 bis 20 % auszugehen.

- Ebenso kann die Frage „Ist die mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL2000 ermittelte Zusatzbelastung (Konzentration, Deposition) in der Umgebung von Stallanlagen plausibel?“ nicht eindeutig beantwortet werden: Die Tabellen 5 und 6 machen deutlich, dass in diesen beiden Fällen die beobachtete Zusatzbelastung ($B_{Z,N,\text{ber}}$) und die nach BMU (2002) berechnete Zusatzdeposition ($D_{Z,N,\text{TAL}}$) gut übereinstimmen.

Der LAI-Leitfaden (LAI, 2012) enthält mit der Kombination unterschiedlicher konservativer Verfahren (Modellierung nach TA Luft, VDI 2006 und VDI 2010) einen Ansatz, der offen-

¹¹ Bei den Gegenüberstellungen von Mess- und Modelldaten ist zu berücksichtigen, dass die Messungen in **einem Jahr an einem** Messpunkt über **einem** Bestand gewonnen wurden.

bar zumindest in unserem Untersuchungsgebiet zu einer erheblichen Überschätzung der N-Zusatzbelastung führt. Mit dem Verfahren nach BMU (2002) kommt es dagegen wahrscheinlich zu einer Unterschätzung der N-Einträge in den Wald, was auf ein zu niedriges v_{d, NH_3} zurückzuführen ist.

Zur Depositionsgeschwindigkeit für Wälder in Nordwestdeutschland existiert lediglich der von Dämmgen (2005) genannte Wert von $1,6 \text{ cm s}^{-1}$. Die Verwendung dieser v_{d, NH_3} könnte zu treffenderen Ergebnissen führen; sie würde zu Depositionen führen, die zwischen denen nach BMU (2002) und LAI (2012) liegen. Inwieweit diese Depositionsgeschwindigkeit für andere Regionen gilt, ist allerdings offen.

Eindeutig erscheint allenfalls, dass die Gradienten der Zusatzbelastungen, die aus Messungen der Kronentraufe und Modellen resultieren, nicht übereinstimmen.

Die Ursache hierfür ist in den Konzentrationen zu suchen; auch hier ist der mit wachsender Entfernung vom Stall beobachtete Gradient bei den modellierten Werten deutlicher ausgeprägt als bei den gemessenen. Dies wird als Hinweis darauf gewertet, dass die Modellierung der Zusatzbelastung unter Verwendung von AUSTAL2000 zu überarbeiten ist.

Literatur

- Adaros G, Dämmgen U (1994) Phytotoxische Wirkungen der aktuellen NH_3 -Immissionen. Braunschweig : FAL, 124 p, Landbauforsch Völkenrode SH 146
- Blatter A, Neftel A (1990) Vergleich dreier Messtechniken zur Bestimmung von Ammoniakemissionen und -immissionen. KTBL-Schr 341:18.1-18.21
- Bleeker A, Draaijers G, Veeb D van der, Erisman JW, Möls H, Fonteijn P, Geusenbroek M (2005) Field intercomparison of throughfall measurements performed within the framework of the Pan European intensive monitoring program of EU/ICP Forest. Environ Pollut 125:123-138
- BMELF-Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1997) Waldzustandsbericht der Bundesregierung 1997. Bonn : BMELF, 210 p
- BMU-Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002) Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissions-schutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) v. 24. Juli 2002 [online]. Zu finden in <<http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf>> [zitiert am 06.05.2013]
- Bobbink K, Braun S, Nordin A, Power S, Schütz K, Strengborn J, Weijters M, Tomassens H (2011) Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships [online]. Zu finden in <<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680359002.pdf>> [zitiert am 17.04.2013]
- Brewer SK, Costello TA (1999) In situ measurement of ammonia volatilization from broiler litter using an enclosed air chamber. Transact ASAE 42:1415-1422
- Buitjes P, Hendriks E, Koenen M, Schaap M, Banzhaf S, Kerschbaumer A, Gauger T, Nagel H-D, Scheuschner T, Schlutow A (2011) Erfassung, Prognose und Bewertung von Stickstoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland : zusammenfassender Abschlussbericht [online]. Zu finden in <<http://www.uba.de/uba-info-medien/4137.html>> [zitiert am 17.04.2013]
- Cape JN, Cornell SE, Jickells TD, Nemitz E (2011) Organic nitrogen in the atmosphere - where does it come from? : A review of sources and methods. Atmos Res 102:30-48
- Cape JN, Sheppard LJ, Crossley A, Dijk N van, Tang YS (2010) Experimental field estimation of organic nitrogen formation in tree canopies. Environ Pollut 158:2926-2933
- Cape JN, Eerden LJ van der, Sheppard LJ, Leith ID, Sutton MA (2009) Evidence of changing the critical level for ammonia. Environ Pollut 157:1033-1037
- Dämmgen U (Hrsg) (2005) Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkung auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt) : Schlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Braunschweig : FAL, 128 p, Landbauforsch Völkenrode SH 279
- Dämmgen U, Grünhage L (1998) Response of a grassland ecosystem to air pollutants : 5. A toxicological model for the assessment of dose-response relationships for air pollutants and ecosystems. Environ Pollut 101(3):375-380
- Dämmgen U, Grünhage L, Jäger H-J (1997) The description, assessment and meaning of vertical fluxes of matter within ecotopes – a systematic consideration. Environ Pollut 96(2):249-260
- Dämmgen U, Matschullat J, Zimmermann F, Strogies M, Grünhage L, Scheler B, Conrad J (2013) Emission reduction effects on bulk and wet-only deposition in Germany – evidence from long-term observations - Part 3: Sulphur and nitrogen compounds. Gefahrstoffe Reinhaltung Luft 73:330-339
- Dennis RL, Mathur R, Pleim JE, Walker JT (2010) Fate of ammonia emissions at the local and regional scale as simulated by the Community Multiscale Air Quality Model (CMAQ). Atmos Pollut Res 1(4):207-214
- DIN EN ISO 11732 (2005) Wasserbeschaffenheit : Bestimmung von Ammoniumstickstoff ; Verfahren mittels Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion. Berlin : Beuth
- DIN EN ISO 11885 (2009) Wasserbeschaffenheit : Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionspektrometrie (ICP-OES). Berlin : Beuth
- DIN EN ISO 13395 (1996) Wasserbeschaffenheit : Bestimmung von Nitritstickstoff, Nitratstickstoff und der Summe von beiden mit der Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion. Berlin : Beuth
- Draaijers GPJ, Erisman JW (1995) A canopy budget model to assess atmospheric deposition from throughfall measurements. Water Air Soil Pollut 85:2253-2258
- Duyzer JH, Verhagen HLM, Westrate JH (1993) The dry deposition of ammonia onto a Douglas forest in the Netherlands. Atmos Environ 28:1241-1253
- Erisman JW, Hensen A, Fowler D, Flechard CR, Grüner A, Spindler G, Duyzer JH, Westrate H, Römer F, Vonk AW, Jaarsveld JV (2001) Dry deposition monitoring in Europe. Water Air Soil Pollut Focus 1:17-27
- EMEP CORINAIR (2009) Emission inventory guidebook [online]. Zu finden in <<http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP-CORINAIR4>> [zitiert am 19.04.2013]
- EU-Europäische Union (2001) Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissions-höchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (NEC-Richtlinie), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften : L, Rechtsvorschriften L 309:22-30
- Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, Eerden L Van der, Jäger H-J (1994) Effects of atmospheric ammonia on vegetation : a review. Environ Pollut 86:43-82
- Garber K, Schürmann B (1971) Wirkung und Nachweis von Ammoniak-Immissionen in der Nähe von Großstallungen. Landwirtsch Forsch 26/I:36-40
- Gehrmann J, Andreae H, Fischer U, Lux W, Spranger T (2001) Luftqualität und atmosphärische Stoffeinträge an Level II - Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland. Berlin, 94 p
- Hartmann G, Gärtner A, Hölscher M, Köllner B, Janicke L (2004) Untersuchungen zum Verhalten von Abluftfahnen landwirtschaftlicher Anlagen in der Atmosphäre [online]. Zu finden in <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/jahresberichte/2003/lgtxt/L_Hartm_38.pdf> [zitiert am 17.04.2013]
- Haenel H-D, Rösemann C, Dämmgen U, Poddey E, Freibauer A, Döhler H, Eurich-Menden B, Wulf S, Dieterle M, Osterburg B (2012) Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2010 : report on methods and data (RMD) Submission 2012. Braunschweig ; vTI, 394 p, Landbauforsch SH 356
- Heinsdorf D, Krauss HH (1991) Massentierhaltung und Waldschäden auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. Forst Holz 13:356-361
- Janicke L (2009) AUSTAL2000 : Programmbeschreibung zu Version 2.4 ; Stand 2009-01-31 [online]. Zu finden in <http://www.weblakes.com/products/austal/resources/docs/austal2000_de.pdf> [zitiert am 17.04.2013]
- Huebert B jun (1988) Measurements of concentrations and dry surface fluxes of atmospheric nitrates in the presence of ammonia. J Geophys Res D 93(6):7127-7136

- Kirchner M, Braeutigam S, Ferm M, Haas M, Hangartner M, Hofschreuder P, Kasper-Giebl A, Römmelt H, Striedner J, Terzer W, Thöni L, Werner H, Zimmerling R (1999) Field intercomparison of diffusive samplers for measuring ammonia. *J Environ Monit* 1:259-265
- Köster M, Lohrengel B, Hainsch A, Klasmeier E, Dämmgen U, Mohr K, Wallasch M (2012) PASSAMONI : Passivsammler-Messungen zur Erfassung der Ammoniak-Belastung in Niedersachsen ; Abschlussbericht ; Beurteilung der Ammoniak-Hintergrundbelastung in Niedersachsen 2009 bis 2011. Hildesheim : Staatliches Gewerbeaufsichtsamt, Zentrale Unterstützungsstelle Luftreinhaltung, Lärm und Gefahrstoffe, 93 p
- Krupa SV (2003) Effects of atmospheric ammonia on terrestrial vegetation : a review. *Environ Pollut* 124:179-221
- KTBL (2006) Handhabung der TA Luft bei Tierhaltungsanlagen : ein Wegweiser für die Praxis. Darmstadt : KTB, 244 p, KTB-Schr 447
- LAI-Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (2012) Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz : Langfassung ; Stand 1. März 2012 [online]. Zu finden in <<http://www.umweltbundesamt.de/luft/downloads/lai-n-leitfaden.pdf>> [zitiert am 17.04.2013]
- Lorenz M, Nagel HD, Granke O, Kraft P (2008) Critical loads and their exceedance in intensive monitoring sites in Europe. *Environ Pollut* 155:426-435
- Loubet B, Asman WAH, Theobald MR, Hertel O, Tang YS, Robin P, Hassouna M, Dämmgen U, Genermont S, Cellier P, Sutton MA (2009) Ammonia deposition near hot spots : processes, models and monitoring methods. In: Sutton MA, Reis S, Baker S (eds) Atmospheric ammonia : detecting emission changes and environmental impacts ; results of an expert workshop under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution ; The "Edinburgh Workshop", 4-6 December 2006. Dordrecht : Springer, pp 205-267
- Mohr K (2011) Untersuchungen zur Bewertung der Auswirkungen von Ammoniak- und Stickstoff-Depositionen auf Pflanzen und Ökosysteme im Nahbereich von Stallanlagen (BESTAND) : Endbericht ; EH-Vorhaben 2809HS015 für die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) [online]. Zu finden in <<http://download.ble.de/09HS015.pdf>> [zitiert am 17.04.2013]
- Mohr K (2012) Messung, Modellierung und Wirkungsermittlung von Ammoniak aus Tierhaltungsanlagen. KRdL-SchrR 45:65-83
- Mohr K, Dämmgen U (2013) Immissionsbelastung durch Ammoniak auf Wälder in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen : Teil 2: Wirkungen auf die Vegetation, Dosis-Wirkung-Beziehungen. *Landbauforsch* 63(2):129-142
- Nielsen KH, Schjørring JK, Erisman JW, Pearson J (2002) Ammonia exchange at the tree-atmosphere interface. In: Gasche R, Papen H, Rennenberg H (eds) Trace gas exchange in forest ecosystems. Boston : Kluwer, pp 159-173, *Tree Physiol* 3
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1993) Depositionsmessnetz Niedersachsen : Belastung von Wasser und Boden durch Schadstoffe in Luft und Niederschlägen. Hildesheim : Niedersächsisches Landesamt Ökologie. 40 p
- Papen H (2005) Waldboden-Mikrobiologie in Abhängigkeit von erhöhten Stickstoffeinträgen : Stickstoffdynamik und biologische Prozesse in Ökosystemen ; Abschlussbericht (FuE 202 63 224). Dessau : Umweltbundesamt
- Schmitt M, Thöni L, Waldner P, Thimonier A (2005) Total deposition of nitrogen in Swiss long-term forest ecosystem research (LWF) plots : comparison of the throughfall and the inferential methods. *Atmos Environ* 39:1079-1091
- Spangenberg A, Kölling C (2004) Nitrogen deposition and nitrate leaching at forest edges exposed to high ammonia emissions in Southern Bavaria. *Water Air Soil Pollut* 152:233-255
- Staatcourant (2007) Wijziging regeling ammoniak en veehouderij. BWL/200703753 vom 24. April 2007
- Stevens CJ, Manning P, Berg LJL van den, Graaf MCC de, Wamelink GJ, Boxman AW, Bleeker A, Vergeer P, Aroniz-Crespo M, Limpens J, Lamers LPM, Bobbink R, Dorland E (2011) Ecosystem responses to reduced and oxidised nitrogen inputs in European terrestrial habitats. *Environ Pollut* 159:665-667
- Straub W, Hebbinghaus H, Sowa A, Wurzler S (2013) Ermittlung von Stickstoff- und Säureeinträgen in Wäldern mit Lagrange'schen Ausbreitungsmodellen : Vergleich unterschiedlicher Berechnungsmethoden. *Immissionschutz* (1):16-20
- Sutton MA, Pitcairn CER, Fowler D (1993) The exchange of ammonia between the atmosphere and plant communities. *Adv Ecological Res* 24:301-390
- Sutton MA, Erisman JW, Dentener F, Möller D (2008) Ammonia in the environment : from ancient times to the present. *Environ Pollut* 156:583-604
- Thöni L, Seitzer E, Blatter A, Neftl A (2003) A passive sampling method to determine ammonia in ambient air. *J Environ Monit* 5:96-99
- UBA-Umweltbundesamt (2012) Vorbelastungsdaten N-Deposition [online]. Zu finden in <<http://gis.uba.de/website/depo1/>> [zitiert am 10.12.2012]
- Ulrich B (1991) Rechenweg zur Schätzung der Flüsse in Waldökosystemen : Identifizierung der sie bedingenden Prozesse. *Ber Forsch Waldökosysteme* B 24:204-210
- VDI 3782 Blatt 5 (2006) Umweltmeteorologie : atmosphärische Ausbreitungsmodelle ; Depositionsparameter. Berlin : Beuth, 51 p
- VDI 3783 Blatt 13 (2010) Umweltmeteorologie : Qualitätssicherung in der Immissionsprognose ; anlagenbezogener Immissionsschutz ; Ausbreitungsrechnung gemäß TA Luft. Berlin : Beuth
- VDI 3869 Blatt 4 (2012) Messen von Ammoniak in der Außenluft : Probennahme mit Passivsammlern ; fotometrische oder ionenchromatografische Analyse. Berlin : Beuth, 38 p
- VDI 3894 Blatt 1 (2011) Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen : Haltungsverfahren und Emissionen ; Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde. Berlin : Beuth
- VDI 3945 Blatt 3 (2000) Umweltmeteorologie : atmosphärische Ausbreitungsmodelle ; Partikelmodell. Berlin : Beuth
- VDI 4280 Blatt 3 (2003) Planung von Immissionsmessungen : Messstrategien zur Ermittlung von Luftqualitätsmerkmalen in der Umgebung ortsfester Emissionsquellen. Berlin : Beuth
- VDI 4320 Blatt 1 (2010) Messung atmosphärischer Depositionen : Probennahme mit Bulk- und Wet-only-Sammlern ; Grundlagen. Berlin : Beuth, 18 p
- Van Dijk H, Franzaring J, van Alfen AJ (2001) Invloed van ammoniak op boomkwekerijgewassen en fruitbomen. *Plant Res Internat* 57:1-26
- Verhagen R, van Diggelen R (2006) Spatial variation in atmospheric nitrogen deposition on low canopy vegetation. *Environ Pollut* 144:826-832
- Wichink Kruit RJ, Pul RJ van, Otjes RP, Hofschreuder P, Jacobs AFG, Holtslag AAM (2007) Ammonia fluxes and derived canopy compensation points over non fertilized agricultural grassland in The Netherlands using the new gradient ammonia-high-accuracy monitor (GRAHAM). *Atmos Environ* 41:1275-1287
- Wuyts K, de Schrijver A, Staelsens J, Giels L, Vandenbruwane J (2008) Comparison of forest edge effects on throughfall deposition in different forest types. *Environ Pollut* 156:854-861
- Zimmermann F, Plessow K, Queck R, Bernhofer C, Matschullat J (2006) Atmospheric N and S-fluxes to a spruce forest M Comparison of inferential modelling and the throughfall method. *Atmospheric Environment* 40:4782-4796

Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen

Teil 2. Wirkungen auf Böden und Vegetation

Karsten Mohr* und Ulrich Dämmgen**

Zusammenfassung

Reaktiver atmosphärischer Stickstoff hat vielfältige Einflüsse auf empfindliche Ökosysteme wie Wälder. Untersuchungen in Wäldern, die unter langzeitiger Ammoniak-Belastung in der Umgebung von 15 Tierhaltungsanlagen einer landwirtschaftlich intensiv genutzten Region in Nordwestdeutschland (mit deutlicher Überschreitungen der critical loads) stehen, sollten Aufschluss zu möglichen Dosis-Wirkung-Beziehungen geben. Die an insgesamt 60 Orten experimentell untersuchten Wirkungen auf N_{min} -Vorrat, C/N in der Humusauflage, Nährelement-Gehalte in Nadeln/Blättern und N-Zeilengewerte der Bodenvegetation korrelierten teilweise eng mit der modellierten Zusatzbelastung. Bei anderen Parametern (N_{tot} -Vorrat in der Humusauflage, pH in Boden und Humusauflage, Basensättigung, Baumvitalität) war hingegen kein oder nur ein leicht signifikanter statistischer Zusammenhang festzustellen.

Zusatzbelastungen von über $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ führten schon zu einer signifikanten Zunahme der N-Konzentrationen in Kiefernadeln. Geringere Zusatzdepositionen haben möglicherweise bereits einen Einfluss auf die Zusammensetzung der Waldbodenvegetation.

Demgegenüber traten Schäden an Bäumen (Japanlärche, Waldkiefer) erst bei Zusatzbelastungen über $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf.

Die festgestellten Wirkschwellen von $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ N-Zusatzdeposition liegen auf dem Niveau der im LAI-Leitfaden genannten Zusatzbelastungen zwischen dem Bagatellwert und dem höchsten Beurteilungswert für Wald.

Schlüsselwörter: Ammoniak, Ammonium, Deposition, Wirkung, Boden, critical load, Vegetation

Summary

Ammonia and ammonium loads to forests in Northwest Niedersachsen in the vicinity of animal houses

Part 2. Effects on soils and vegetation

Reactive atmospheric nitrogen affects sensitive ecosystems such as forests in many respects. Forests in a region of intensive agriculture (where critical loads have been exceeded significantly) that have been exposed to ammonia in the vicinity of animal houses for a long time were selected for an investigation of potential dose response relationships.

In all, 60 locations were investigated experimentally with respect to effects on N_{min} pools, C/N ratios in the humus layer, nutrient element concentrations in leaves and nutrition indicator values in the ground vegetation. These entities correlated well with the additional load. For other entities (total N pool of the humus layer, soil and humus layer pH, base saturation, tree vitality) no or less significant statistical relations could be identified.

Additional loads exceeding $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ resulted in a significant increase of N concentrations in pine needles. The composition of the ground vegetation may be affected by even smaller additional loads.

On the other hand, damage to trees caused by N occurred with additional inputs above $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

The thresholds for effects of additional N inputs of $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ to $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ agree with those mentioned in the LAI guidelines for minor damage and the highest criterion load for forests.

Keywords: Ammonia, ammonium, deposition, response, soil, critical load, vegetation

* Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Mars-la-Tour-Str. 1-13,
26121 Oldenburg

** Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz,
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Kontakt: Karsten.Mohr@LWK-Niedersachsen.de

1 Einleitung

Als einzige gasförmige Base hat Ammoniak (NH_3) großen Einfluss auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre und der Niederschläge (z. B. Finlayson-Pitts und Pitts, 1986; Dämmgen et al., 2013).

NH_3 ist in höheren Konzentrationen phytotoxisch. Ökosysteme wie Wälder, Moore, Magerrasen und Heiden können auch bei niedrigen NH_3 -Konzentrationen durch die eutrophierende und bodenversauernde Wirkung von NH_3 und anderen N-Verbindungen chronisch geschädigt werden. Indizien hierfür bilden Überschreitungen ökologischer Belastungsgrenzen („critical loads“, CL). Diese werden in Deutschland und Mitteleuropa großräumig mehr oder minder deutlich überschritten; entsprechende Veränderungen sind feststellbar (Buitjes et al., 2011). Nationale und internationale Maßnahmen (z. B. EU, 2001) haben das Ziel, die Zahl der Gebiete mit CL-Überschreitungen deutlich zu verringern. Hierzu wurden Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen getroffen. Wesentliche Quellen für reaktiven N¹ sind die Landwirtschaft für NH_3 sowie Kraftwerke und Kraftfahrzeugverkehr für oxidierten N (NO_x) (Dämmgen et al., 2013). Für NH_3 -Emissionen wurden mit der im Jahr 2002 erschienenen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft; BMU, 2002) genehmigungsrechtliche Grundlagen geschaffen. Sie betreffen unter anderem die Bewertung von NH_3 -Emissionen von Tierställen und anderen relevanten Bauvorhaben. Zum Schutz von empfindlichen Pflanzen und Ökosystemen werden Jahresmittel der NH_3 -Konzentrationen von 3 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Zusatzbelastung²) und 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Gesamtbelastung³) genannt.

Die TA Luft enthält zur Regelung der N-Depositionen mit der Besatzdichte landwirtschaftlicher Nutztiere in Höhe von 2 Großvieheinheiten pro Landkreisfläche nur einen einzigen konkreten Hinweis zu möglichen negativen Auswirkungen auf N-empfindliche Ökosysteme. Der kürzlich erschienene Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von N-Einträgen (LAI, 2012) nennt wirkungsbezogene Kriterien im ökologischen und funktionalen Zusammenhang auf Basis der CL.

Die vorliegende Arbeit untersucht N-belastete Waldökosysteme in der Umgebung von Stallanlagen und versucht, Ursache-Wirkung-Zusammenhänge zu identifizieren und zu deuten. Als Maß für die Ursache werden die Zusatzdepositionen und ihre räumlichen Gradienten herangezogen, als Indikator für die Wirkungen werden bodenchemische

Zustandsgrößen, Schädigungen und Nährstoffversorgung des Baumbestandes und die Zusammensetzung der Bodenvegetation und ihre räumlichen Gradienten genutzt.

2 Konzept und praktische Vorgehensweise

Wegen des verzögerten Auftretens der Wirkungen von N-Depositionen wurde nur die Umgebung solcher Stallanlagen als Monitoringorte ausgewählt, die seit mindesten 40 Jahren in Betrieb sind und sich überwiegend in einer isolierten Lage umgeben von Wäldern befinden. Hierdurch treten Einflüsse weiterer N-Quellen in den Hintergrund. Die beobachteten Wirkungen wurden den berechneten N-Zusatzdepositionen gegenübergestellt.

Das experimentelle Design insgesamt ist in Mohr und Dämmgen (2013) vorgestellt.

2.1 Monitoring

Monitoringorte: Die insgesamt 15 Monitoringorte befanden sich im Westniedersächsischen Tiefland schwerpunktmäßig in den viehintensiven Landkreisen Emsland und Vechta⁴, wo bereits in den 1960er Jahren größere Stallanlagen aus Seuchen- und Immissionsschutzgründen vorwiegend in Waldgebieten errichtet wurden.

Die in Umgebung der Stallanlagen untersuchten Wälder stocken überwiegend auf nährstoffarmen, grundwasserfernen Sandböden (Geschiebedecksanden, Talsanden, Flugsanden). Bei der Bestockung handelt es sich um mittelalte (ca. 60 bis 80-jährige) Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), Rotfichte (*Picea abies*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*) und Japanlärche (*Larix kaempferi*) (siehe Tabelle 1). Die Untersuchungen erfolgten in den Jahren 2010 und 2011.

Monitoringpunkte. Die Untersuchungen erfolgten an jedem Monitoringort an Transekten mit jeweils vier Entfernungsstufen an Monitoringpunkten unter vergleichbaren Bedingungen (Bestockung, Standort) im Wald. Die Entfernungsstufen wurden so gewählt, dass sie ein breites Immissionsspektrum abdecken, vom stärker belasteten Waldrand wenige Dekameter von den Stallanlagen bis zum mehrere Hundert Meter entfernten Bereich, wo Einflüsse nicht oder kaum noch vorhanden waren.

2.2 Feststellung der Vorbelastung

Zur Entwicklung der N-Vorbelastung (Deposition) der letzten Jahrzehnte in Nordwestdeutschland liegen keine Untersuchungen vor. Mit Mohr et al. (2005) gehen wir davon aus, dass sich in den letzten zwei Dekaden das Belastungsniveau nicht signifikant geändert hat. Das aktuelle Niveau liegt nach den Ergebnissen von Bestandesniederschlägen (Kronenraufemessungen) in Nordwestdeutschland zwischen etwa

¹ Als reaktiver N werden in diesem Bericht diejenigen N-Spezies zusammengefasst, die von Pflanzen direkt oder indirekt verstoffwechselt werden können, d. h. die Gase Ammoniak (NH_3), Stickstoffdioxid (NO_2), salpetrige Säure (HNO_2) und Salpetersäure (HNO_3) sowie Ammonium (NH_4^+), Nitrat (NO_3^-) und gelöster organischer Stickstoff (DON) in Partikeln.

² Die Zusatzbelastung ist die aus den Emissionen einer Quelle herrührende berechnete NH_3 -Konzentration β_{Z, NH_3} oder N-Deposition $D_{Z, \text{N}}$.

³ Die Gesamtbelastung (Konzentration β_{G, NH_3} oder Deposition $D_{G, \text{N}}$) ist die Summe aus Vorbelastung (β_{V, NH_3} bzw. $D_{V, \text{N}}$) und Zusatzbelastung (β_{Z, NH_3} bzw. $D_{Z, \text{N}}$) (siehe auch Mohr und Dämmgen, 2013).

⁴ Genaue Ortsangaben können aus Datenschutzgründen nicht vorgelegt werden.

Tabelle 1

Monitoringorte und modellierte Zusatzdepositionen an den einzelnen Monitoringpunkten (Entfernungsstufen)

Bezeichnung Kürzel	Hauptbestockung Art	Emittent Tierart	Abstand zum Wald m	Zusatzdeposition $D_{Z,N,TAL}$ bei Entfernungsstufe			
				1	2	3	4
				kg ha ⁻¹ a ⁻¹ N			
Sa	Stieleiche	Mastschweine, MastbulLEN	121	17	13	5	0
Ba	Rotfichte	Legehennen	33	52	35	15	1
Be	Rotfichte	Masthähnchen	21	46	27	11	0
Da	Japanlärche	Masthähnchen	22	29	16	4	2
En	Rotfichte	Legehennen	14	110	57	20	5
Ge	Rotfichte	Masthähnchen	20	100	55	30	6
HaE	Waldkiefer	Legehennen, Jungennen	35	53	24	3	1
HaW	Japanlärche	Legehennen	5	80	23	11	4
Re	Waldkiefer	Masthähnchen, Elterntiere	7	58	36	16	3
Rü	Waldkiefer	Masthähnchen	26	15	5	2	2
Ve	Waldkiefer	Masthähnchen	13	80	8	5	3
Wa	Waldkiefer	Masthähnchen	10	119	40	12	2
WeN	Waldkiefer	Masthähnchen	14	73	35	6	1
WeS	Waldkiefer	Masthähnchen	20	105	50	13	1
Wi	Rotbuche	Jungennen, Legehennen	23	3	2	2	0

23 und 37 kg ha⁻¹ a⁻¹. Deutlich höher liegen die vom UBA (2012) modellierten Gesamtdepositionen von 41 und 56 kg ha⁻¹ a⁻¹ N (Mohr und Dämmgen, 2013)⁵.

2.3 Bestimmung der Zusatzdeposition

Die Zusatzdepositionen $D_{Z,N,TAL}$ wurden nach TA Luft (BMU, 2002) mithilfe des Lagrange-Partikelmodells AUSTAL2000 berechnet. Dieses Vorgehen schließt die Verwendung einer pauschalen Depositionsgeschwindigkeit (v_d) von 1,0 cm s⁻¹ ein. Da die Beziehungen zwischen den gemessenen Zusatzbelastungen aus dem Bestandesniederschlag, $B_{Z,N}$ und der nach verschiedenen Verfahren berechneten Zusatzdepositionen in Mohr und Dämmgen (2013) nicht eindeutig sind, wird hier auf das offizielle Verfahren zur Bestimmung der Zusatzdeposition nach TA Luft (BMU, 2002) zurückgegriffen. Sie wird als ein relatives Maß verstanden; die Verwendung anderer Depositionsgeschwindigkeiten⁶ ändert die Aussagen über Gradienten nicht.

Die NH₃-Emissionen wurden anhand von Richtwerten für die Emissionsfaktoren für die in den Stallanlagen gehaltenen

Tierarten berechnet. Die verwendeten Werte entstammen überwiegend BMU (2002). Für dort nicht genannte Tierarten sowie für Kotlager wurden aus anderen Literaturquellen folgende Daten entnommen (zu Einzelheiten siehe Tabelle 2 in Mohr und Dämmgen, 2013).

Der Modellierung der Zusatzdepositionen $D_{Z,mod,TAL}$ nach TA Luft während der gesamten Betriebsdauer lagen ausführliche Datenerhebungen (Tierhaltung, Abluftführung etc.) zugrunde. Bei vielen Stallanlagen änderten sie sich im Laufe der Zeit, so dass diese Abweichungen separater Modellierungen bedurften. Die Einzelwerte der sich hieraus ergebenden N-Zusatzdepositionen an den Monitoringpunkten wurden zu einem zeitgewichteten Mittelwert zusammengefasst.

2.4 Klimadaten

Die erforderlichen Klimadaten (Ausbreitungsklassenstatistik, AKS) wurden nach vorausgegangener Übertragbarkeitsprüfung von geeigneten Standorten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bezogen. Sie stellen für einen zurückliegenden Zeitraum von 10 Jahren eine repräsentative Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungssituationen dar. Weil von keiner grundlegenden Änderung des Mesoklimas hinsichtlich Windrichtung, -geschwindigkeit, Strahlung und Temperatur an den Monitoringorten auszugehen ist, werden sie auch für den gesamten Betriebszeitraum der Stallanlagen als repräsentativ betrachtet.

Die Datenausgabe erfolgte in einer räumlichen Auflösung mit einer Maschenweite von 5 m x 5 m als Mittelwerte der Rasterflächen.

⁵ Die in der Kronentraufe der Waldbäume mit Bulksammeln gemessenen N-Flüsse (Bestandesniederschläge $B_{G,N}$) berücksichtigen nicht den Anteil, der direkt im Kronenraum von den Pflanzen aufgenommen wird. Es ist üblich, anzunehmen, dass die Deposition das 1,2- bis 1,3-fache des Bestandesniederschlages beträgt. Die große Differenz zwischen den Ergebnissen beider Ansätze im Messgebiet ist allerdings nicht plausibel (Mohr und Dämmgen, 2013).

⁶ Höhere v_{d,NH_3} , wie beispielsweise bei VDI 3782, Bl. 5 genannt, führen zu einer Berechnung von N-Depositionen, die nach vergleichenden Untersuchungen von Mohr und Dämmgen (2013) deutlich höher liegen.

Tabelle 2

N-Zeigerwerte und ihre Bewertung nach Ellenberg et al. (2001)

	$1,0 < NZ_m \leq 3,3$	$3,3 < NZ_m \leq 4,3$	$4,3 < NZ_m \leq 5,3$	$5,3 < NZ_m \leq 6,1$	$6,1 < NZ_m < 9,0$
N-Verfügbarkeit	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Bewertung	dystroph	oligotroph	mesotroph	eutroph	hypertroph

2.5 Messgrößen für die Belastung.

Die folgenden Variablen, die direkt oder indirekt mit den Hauptfunktionen des Waldes in Zusammenhang stehen (Fangmeier et al., 1994; Gregor, 1995; Gehrmann, 2003), wurden untersucht:

- Boden: C-N-Verhältnis im Auflagehumus
 N_{min} , pH_{KCl} , Basensättigung und Basenneutralisierung im Mineralboden
- Baumbestand: Konzentrationen von N, P, K, Mg, Ca in Blättern/Nadeln, Wuchsigkeit und Kronenzustand
- Vegetation: Artenzusammensetzung, N-Zeigerwerte und Nährstoff-Verfügbarkeitsstufe

2.6 Probenahme, Aufarbeitung und Analysen

Pro Monitoringpunkt wurde der Boden an je fünf Entnahmestellen beprobt, dabei wurden jeweils zwei Proben vom Mineralboden und eine Probe vom Auflagehumus mittels Stechzylinder bzw. Stechrahmen entnommen und zu je einer Mischprobe (d. h. zehn Bodenproben und fünf Proben Auflagehumus) vereinigt. Die Laubproben wurden vom Hubsteiger aus sechs Baumkronen genommen. Auch diese Probenentnahme richtete sich nach König (2009). Laub- und Nadelproben wurden zu je zwei Mischproben vereinigt. Die Einstufung des Kronenzustandes erfolgte nach Hanisch und Kilz (1990). Die Analyse der Boden- und Laubproben folgte Seibold u. Barth (1976) und Thun et al. (1991), Kationenaustauschkapazität und Basensättigung wurden nach König (2009) bestimmt.

2.7 Vegetationsuntersuchungen

Die Inventur der Bodenvegetation folgte Braun-Blanquet (1964), wobei abweichend die Deckungsanteile einzelner Pflanzenarten in Prozent der bewachsenen Fläche geschätzt wurden (ab einer Deckung > 5 % der Deckungsgrad in 5-%-Schritten). Die Größe der Aufnahmefläche pro Monitoringpunkt lag zwischen 100 und 150 m². Die Gefäßpflanzen- und Moosarten wurden nach Rothmaler (1994) sowie Frahm und Frey (1987) bestimmt.

Die Auswertung der Vegetationsaufnahmen erfolgte auf Grundlage von VDI 3959, Bl. 1, basierend auf den von Ellenberg et al. (2001) publizierten N-Zeigerwerten. Die hier fehlenden N-Zeigerwerte für Moose wurden durch die bei Siebel et al. (2006) genannten Werte ergänzt. Hierdurch ließen sich etwa 80 % der Monitoringpunkte in die VDI-Auswertung einbeziehen.

Bei der VDI-Methode wird zunächst für alle Aufnahmen der Eutrophierungsstatus bestimmt. Für alle Aufnahmen mit mindestens 5 Pflanzenarten, denen ein N-Zeigerwert NZ^7 zugeordnet ist, wurde ein mittlerer N-Zeigerwert NZ_m gebildet.

$$NZ_m = \frac{\sum_{i=1}^9 (s_i \cdot NZ_i)}{s_{NZ}}$$

Dabei sind:

- NZ_m mittlerer N-Zeigerwert
 s_i Anzahl der N-Zeigertaxa mit N-Zeigerwert i in der Aufnahme
 NZ_i N-Zeigerwert ($i = 1, \dots, 9$)
 s_{NZ} Anzahl aller N-Zeigertaxa in der Aufnahme

Die errechneten N-Zeigermittelwerte werden einer N-Verfügbarkeitsstufe zugeordnet (siehe Tabelle 2).

2.8 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der Daten erfolgte mit der Software SPSS. Wegen unterschiedlicher Messniveaus der Daten und nicht immer vorhandener Normalverteilung wurde zur Errechnung der Korrelationen der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman angewendet. Die Prüfung der Signifikanz ($p < 0,05$) erfolgte mit dem nicht-parametrischen Mann-Whitney U-Test.

3 Ergebnisse

Für die Bestimmung langfristiger Wirkungen von luftgetragenem N entlang der Untersuchungstransekten wurden die berechneten N-Zusatzdepositionen ($D_{Z, mod, TAL}$, vgl. Mohr und Dämmgen, 2013) den Ergebnissen ökologischer Untersuchungen (chemische und deskriptive Parameter) gegenübergestellt.

⁷ Nach Ellenberg et al. (2001) stellt der N-Zeigerwert auf einer 9-teiligen Skala einen Indikator für die Nährstoffversorgung dar, insbesondere für die Versorgung mit N.

3.1 Berechnete N-Zusatzdepositionen an den Monitoringorten

Für die Gegenüberstellung der festgestellten Wirkungen an den 15 Monitoringorten erfolgte eine Berechnung der über den gesamten Betriebszeitraum von den Stallanlagen retrospektiv ausgehenden mittleren N-Zusatzdepositionen. Sie beziehen sich auf jeweils vier Entfernungsstufen und entsprechen den Orten der Boden- und Vegetationsuntersuchungen (siehe Tabelle 1 in Mohr und Dämmgen, 2013).

Die berechneten N-Zusatzdepositionen $D_{Z, \text{mod}, \text{TAL}}$ betragen an fast allen Monitoringorten in Stallnähe deutlich über $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In der weitesten vierten Entfernungsstufe lagen die berechneten N-Depositionen überwiegend zwischen 0 und $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; an den Monitoringorten **En** und **Ge** waren sie mit 5 und $6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich höher. Die Diskrepanz zwischen Daten und den Rechenergebnissen für die vergleichenden Messungen am Monitoringort **En** (Mohr und Dämmgen, 2013) erklärt sich aus den abweichenden meteorologischen Bedingungen während der Messperiode und der zwischenzeitlich reduzierten Anzahl von Tierplätzen.

3.2 Wirkungen erhöhter N-Einträge auf Böden

C/N-Verhältnis im Auflagehumus. Mit Werten zwischen 17 und 26 kg kg^{-1} war das Niveau der C/N-Verhältnisse für Nadelwaldböden insgesamt sehr niedrig. Die für die festgestellte Humusform Rohhumusartiger Moder typischen C/N-Verhältnisse zwischen 27 und 31 kg kg^{-1} (von Zezschwitz, 1980) wurden auch an den stallfernen Monitoringpunkten nicht erreicht. Die entlang der Untersuchungsstranekte zu den Stallanlagen zunehmende N-Deposition geht an nahezu allen Monitoringorten mit einer Verringerung der C/N-Verhältnisse im Auflagehumus einher (Abbildung 1). An den am stärksten belasteten Monitoringorten **En** und **Wa** mit N-Zusatzdepositionen über $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wurden mit 16 bzw. 17 kg kg^{-1} die engsten C/N-Verhältnisse festgestellt.

Nur an den weniger belasteten Monitoringorten im Laubwald (**Sa** und **Wi**) war kein Gradient festzustellen. Der statistische Zusammenhang der C/N-Verhältnisse mit den berechneten N-Zusatzdepositionen ist signifikant ($p > 0,05$, Abbildung 3). Bei selektiver Auswertung lässt sich für Fichtenbestände bereits bei modellierten N-Zusatzdepositionen über $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ein Zusammenhang mit dem C/N-Verhältnis statistisch absichern.

N-Vorrat im Auflagehumus. Die Gesamt-N-Vorräte im Auflagehumus wiesen – vermutlich auch bedingt durch die große natürliche Streuung der Humusmächtigkeit – große Unterschiede auf. Ein Zusammenhang zwischen N-Vorräten und den N-Zusatzdepositionen bzw. zur Entfernung zu den Stallanlagen war daher nicht feststellbar.

Im Buchenwald (**Sa**) lagen die N-Vorräte bei $0,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, während sie bei den Nadelwäldern in der Regel ein Mehrfaches hiervon betrugen. Nur im Fichtenbestand **Ge** (Neuaufforstung nach Sturmschaden 1972), war der N-Vorrat ähnlich niedrig wie in den Laubwäldern.

Mineral-N-Vorrat. Bei den Mineral-N- (N_{\min} -)Vorräten im Oberboden (10 bis 30 cm Tiefe) wird der Einfluss der auf Emissionen aus den benachbarten Stallanlagen zurückgeführten Zusatzdepositionen (Abbildung 2) deutlicher als im Auflagehumus (Abbildung 1). Demgegenüber streuen die N_{\min} -Vorräte in 0 bis 10 cm Tiefe so stark, dass sich die Depositionen hier nicht widerspiegeln. In dieser Tiefenstufe kommen vermutlich N-Verluste durch Wurzelauftnahme durch die Bodenvegetation und Auswaschung stärker zum Tragen. Die in den Wintermonaten ermittelten Mineral-N-Vorräte von 5 bis zu 20 Mg ha^{-1} signalisieren bereits an den stallfernen Messpunkten eine N-Sättigung der Waldbestände und lassen Nitrat- (NO_3^-) Austräge mit dem Sickerwasser erwarten. Zu deren Höhe sind wegen der geringen Messtiefe und witterungsbedingt großen Schwankungen keine hinreichend genauen Aussagen möglich; bei N_{\min} -Vorräten über 30 Mg ha^{-1} ist eine Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes von 50 mg l^{-1} jedoch wahrscheinlich.

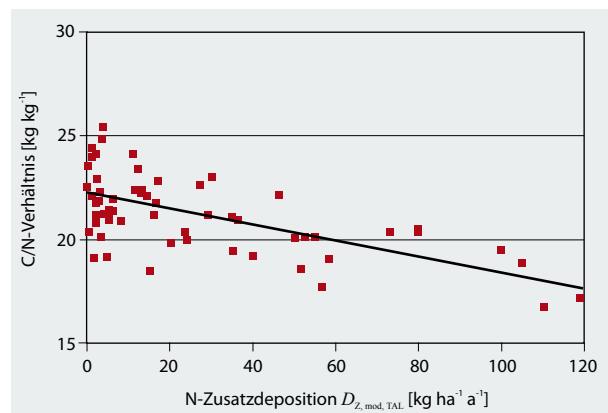


Abbildung 1
C/N-Verhältnisse im Auflagehumus als Funktion der berechneten N-Zusatzdepositionen

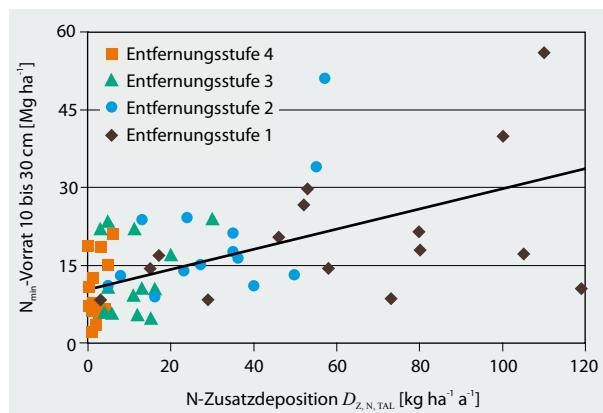


Abbildung 2
 N_{\min} -Vorrat im Mineralboden als Funktion der berechneten N-Zusatzdepositionen

Die höchsten N_{min} -Vorräte wurden unter dem Fichtenbestand am Monitoringort En festgestellt. Wenngleich an diesem Messort die Abstufung der gemessenen und modellierten Einträge uneinheitlich ist (Mohr und Dämmgen, 2013), wird auch an diesem Wirkfaktor zumindest ein deutlicher Gradient zwischen den beiden ersten und den beiden letzten Entfernungsstufen ersichtlich.

Am deutlichsten wird der Einfluss der Stallanlagen auf die N_{min} -Vorräte bei den Fichtenbeständen: Bei selektiver Auswertung dieser Daten zeichnet sich bei N-Zusatzdepositionen über $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine signifikante Zunahme der N_{min} -Vorräte ab, während bei anderer Bestockung eine Zusammenhang erst bei deutlich höheren Zusatzdepositionen festzustellen ist. In den untersuchten Fichtenbeständen spielt der Einfluss der häufig fehlenden Bodenvegetation gegenüber den lichteren Kiefern- und Lärchenforsten offenbar eine geringere Rolle.

pH-Wert und Basensättigung. Infolge hoher Einträge atmosphärischer Säuren und Säurebildner sowie interner Säurereproduktion sind die Waldböden stark versauert. Am stärksten kommen diese Folgen in der Humusaufgabe der Nadelwaldböden zum Ausdruck (teilweise $\text{pH} < 3$). Die Streuung der pH-Werte ist an manchen Monitoringpunkten erheblich und korrespondiert nur in wenigen Fällen mit der Entfernung von den Stallanlagen. An der Messstelle Rü liegen die pH-Werte in den Entfernungsstufen 3 und 4 deutlich über den Werten im Nahbereich. Mit dem Vorkommen nitrophytischer Pflanzen in der Bodenvegetation deuten sich hier allerdings Kalkungseffekte an, die die immissionsbedingte Versauerung offenbar überprägen. Derartige Effekte sind vermutlich auch die Ursache der Unterschiede von über einer pH-Stufe bei anderen Monitoringorten.

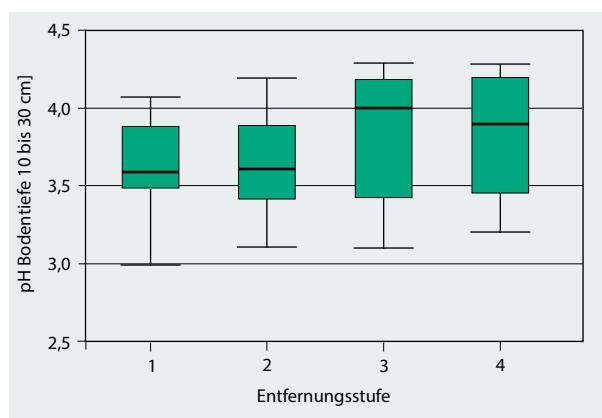


Abbildung 3

Box-and-whisker-plots der pH-Werte im Mineralboden für die vier Entfernungsstufen der 15 Monitoringorte (fette Querbalken: Median; Ober und Unterkante der Rechtecke: 75- und 25-% Perzentil; dünne Querlinien: Maximum und Minimum). Der Wert von 5,3 für Entfernungsstufe 1, Monitoringort Sa, Eichenwald, wurde als Ausreißer angesehen und wurde daher nicht miteinbezogen.

Die pH-Werte im Mineralboden streuen weniger und liegen überwiegend zwischen 3,0 und 3,9, d. h. ebenfalls im stark sauren Bereich. Ein durch Zunahme der Deposition bewirkter Gradient wie im Auflagehumus ist im Mineralboden deutlich seltener und ebenfalls nicht signifikant. In Abbildung 3 wird allerdings ein tendenzieller Anstieg der pH-Werte mit zunehmender Entfernung von den Stallanlagen deutlich. In 0 bis 10 cm Tiefe liegen die pH-Werte im Mittel um etwa 0,5 Einheiten niedriger als in der Tiefenstufe 10 bis 30 cm. Werte unter pH 3,0 wurden im Nahbereich einer Stallanlage in dem vermutlich einzigen ungekalkten Bestand Be ermittelt.

Auch zwischen Basensättigung (BS) und berechneten N-Zusatzdepositionen zeigt sich bei der Mehrzahl der Entfernungsstufen in beiden Tiefenstufen kein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$). In der Tiefenstufe 10 bis 30 cm wurde das von Ulrich (1995) genannte Niveau von 15 % für eine ausreichende BS in Sandböden an vielen Orten mit Werten um 10 % deutlich unterschritten.

3.3 Wirkungen erhöhter N-Einträge auf Bäume

Nährelementkonzentrationen in Nadel- und Laubproben. An den meisten Untersuchungstransekten ist ein kontinuierlich abnehmender Gradient der N-Konzentrationen in Nadeln und in Blättern zu erkennen (Abbildungen 4 und 5). Die für Kiefer und Fichte in der Literatur genannten Normalwerte (standortabhängig zwischen 15 und $17 \text{ g kg}^{-1} \text{ N}$; Heinsdorf, 1995; Arbeitskreis Standortkartierung, 2003) wurden an vielen Monitoringorten insbesondere in Stallnähe deutlich überschritten. Die höchsten mittleren N-Konzentrationen in den Kieffernnadeln wurden mit 26 g kg^{-1} an Re ermittelt. Die nach TA Luft berechnete N-Zusatzdeposition betrug hier $58 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auch in größerer Entfernung fielen die N-Konzentrationen hier nicht unter 20 g kg^{-1} . Insgesamt stehen die N-Konzentrationen in den Kieffernnadeln in einem engen Zusammenhang mit den berechneten N-Zusatzdepositionen, die bereits ab einer Höhe von $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ statistisch signifikant miteinander korrelieren (Abbildung 4). In Fichtennadeln sind die N-Konzentrationen erheblich breiter gestreut, wodurch signifikante Unterschiede erst ab Zusatzdepositionen ab $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$ festgestellt wurden.

Die für Japanlärche (*Larix kaempferi*) genannten Normalwerte von 16 bis $18 \text{ g kg}^{-1} \text{ N}$ (Bergmann, 1983) werden in den beiden untersuchten Lärchenbeständen ebenfalls überschritten.

Das natürliche Niveau der N-Konzentrationen im Eichenlaub ist vergleichsweise hoch (25 bis 28 g kg^{-1} , Bergmann, 1983). In dem einzigen untersuchten Eichenbestand (Sa) wurde dieses Niveau aber auch am stallnahen Messpunkt nicht erreicht. Bei einer berechneten Zusatzdeposition von maximal $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ war zudem kein Gradient der N-Gehalte erkennbar. Auch die für Buchenlaub genannten Normalwerte wurden mit N-Konzentrationen von 19 bis 25 g kg^{-1} an Wi nicht überschritten, doch zeigte sich ein deutlicher Gradient.

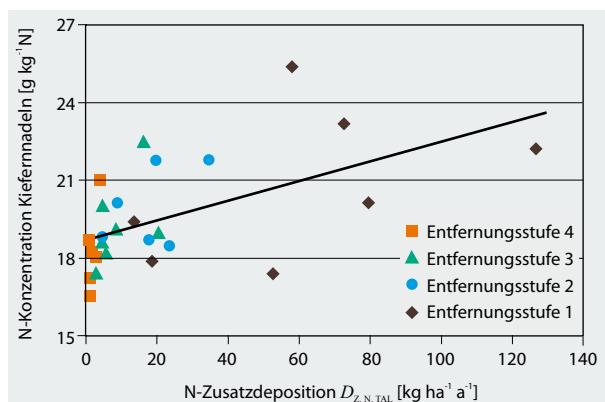


Abbildung 4
N-Konzentrationen der Kiefernadeln als Funktion der berechneten N-Zusatzdepositionen

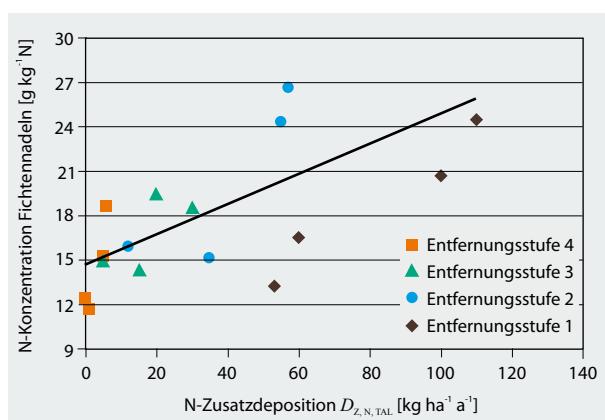


Abbildung 5
N-Konzentrationen der Fichtennadeln als Funktion der berechneten N-Zusatzdepositionen

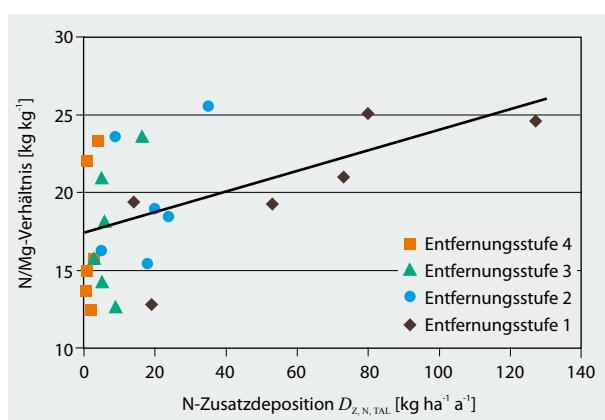


Abbildung 6
N/Mg-Verhältnis in Kiefernadeln als Funktion der berechneten N-Zusatzdepositionen

Andere Nährelementgehalte, wie z. B. die von Magnesium (Mg) sinken mit zunehmender Zusatzdeposition tendenziell, wobei der Zusammenhang mit den N-Depositionen nur bei Kiefer signifikant ist. Parallel zu den am Belastungsgradien-

ten steigenden N-Konzentrationen ergibt sich dadurch eine physiologisch ungünstige Zunahme des N/Mg-Verhältnisses. Bei der Kiefer (Abbildung 6) ist dieser Zusammenhang signifikant, bei Fichte wegen der geringeren Fallzahlen – ebenso wie die Verhältnisse von N zu Ca, N zu P, und N zu K – weniger deutlich ausgeprägt.

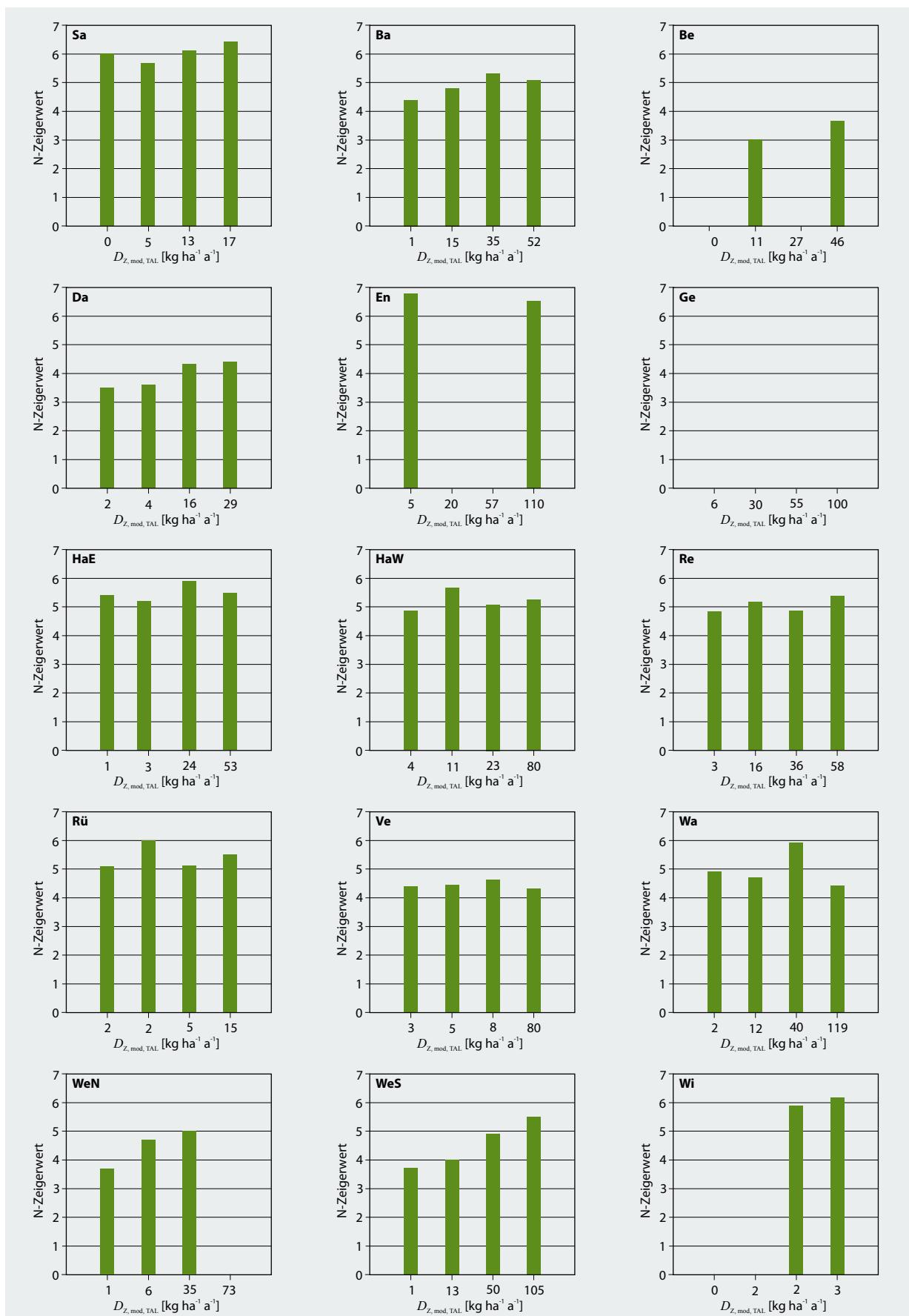
Kronenzustand von Fichte und Kiefer. Eine Beeinträchtigung des Kronenzustandes durch NH₃ war nur im Nahbereich der Stallanlagen feststellbar (starke Schädigungen des Kronenraumes, Schadstufe 3) durch deutliche Nadelverluste, d. h. bei Kiefer unter eineinhalb und bei Fichte unter fünf Nadeljahrgängen, dies oft in Verbindung mit Vergilbungsscheinungen und hohem Totreisiganteil. Zusätzlich durch Windwurf charakterisierte Auflösungsscheinungen oder bereits eingetretene Auflichtungen führten an Ba zur Einstufung in die höchste Schadstufe 4. An HaW waren in der 2. Entfernungsstufe mehrere Japanlärchen durch Kupferstecherbefall abgestorben (ebenfalls Einstufung in Schadstufe 4). An Da traten bei Japanlärche stärkere Kronendeformationen auf (Schadstufe 3). Diese Baumart stellte sich gegenüber höheren N-Depositionen als vergleichsweise empfindlich heraus.

Mit zwei Nadeljahrgängen bei Kiefer sowie sechs voll benadelten Jahrgängen bei Fichte war der im Winter festgestellte Benadelungsgrad vergleichsweise hoch. Vergilbungen traten bei Kiefer nur schwach in Erscheinung; auch Fichten wiesen im Bestandesinneren nur selten Vergilbungen auf, was vermutlich auch auf den Untersuchungszeitraum (Winter) zurückzuführen ist. Schaderreger oder Frosteinwirkungen waren insgesamt selten festzustellen. Rotfichten, die stallnah hohen NH₃-Konzentrationen ausgesetzt waren, zeigten stellenweise Symptome, die auf einen zurückliegenden Befall mit *Phomopsis ssp.* hindeuten. An Ge war der gesamte Fichtenbestand von der Fichtenquir-Schildlaus (*Physokermes piceae*) stark befallen. An den beiden Monitoringorten im Laubwald ließen sich entlang des Untersuchungstransektes keine Schadsymptome feststellen.

Anhand der Vitalitätsparameter Kronenzustand und Vergilbung wurde die überwiegende Mehrzahl der Bestände in die Schadstufe 1 eingeordnet. Weitergehende statistische Auswertungen waren wegen der ordinalskalierten Einteilung der Daten (Schadstufen) nicht zulässig. Unter einer Zusatzdeposition von 50 kg ha⁻¹ a⁻¹ war jedoch keine Beeinträchtigung des Kronenzustandes festzustellen.

3.4 Wirkungen erhöhter N-Einträge auf die Zusammensetzung der Vegetation

Bei den vegetationskundlichen Untersuchungen wurden insgesamt 90 Pflanzenarten festgestellt, darunter 11 Moosarten. Die Anzahl der Pflanzenarten pro Monitoringpunkt lag zwischen 1 (Ge) und 23 (Ve) Arten. Die häufigste Art der untersuchten Nadelwälder ist die Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*), eine auf den bodensauren Standorten in Nadelwäldern verbreitete Grasart. Sie besitzt einen N-Zeigerwert (NZ) von 3, welcher auf saure und nährstoffarme Bodenverhältnisse hindeutet. An vier von zehn Monitoringorten zeigte sie hinsichtlich ihrer Präsenz oder Deckung einen zu den

**Abbildung 7**

Mittlerer N-Zeigerwert der Bodenvegetation ausgewerteter Vegetationsaufnahmen und N-Zusatzdeposition

Stallanlagen hin abnehmenden Trend. Die zweithäufigste Art ist das Grünstängelmoos (*Scleropodium purum*) mit einem bei Siebel et al. (2006) genannten NZ von 7. Eine räumliche Präferenz war bei dieser und anderen Moosarten allerdings nicht festzustellen.

Weitere häufige Arten wie der Breitblättrige Dornfarn (*Dryopteris dilatata*), Rankender Lerchensporn (*Ceratocapnos claviculata*), Dreinervige Nabelmiere (*Moehringia trinerva*) und Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*) weisen mit $5 < NZ < 7$ in den bodensauren Nadelwäldern auf ein erhöhtes atmosphärisches Nährstoffangebot hin.

Weniger nährstofftolerante Pflanzenarten ($NZ \leq 3$) wie Harzer Labkraut (*Galium saxatile*) und Gewöhnlicher Dornfarn (*Dryopteris carthusiana*) traten sehr vereinzelt ohne gerichteten räumlichen Trend auf. Die in Kieferforsten der Nordwestdeutschen Tiefebene noch in den 1950er Jahren charakteristischen Rentierflechten (Meisel-Jahn, 1955; Heinken, 1995; Stortfelder et al., 1999) wurden nirgends mehr angetroffen.

Die Auswertung der NZ setzt voraus, dass mindestens fünf Zeigerarten am Monitoringpunkt erfassbar waren. Am Monitoringort Ge war dies nie der Fall, an Be, En, WeN und Wi waren einzelne Punkte nicht auswertbar.

Die in Abbildung 7 dargestellten gemittelten NZ stiegen nur bei drei (vollständig auswertbaren) Messorten mit zunehmender Entfernung bzw. steigender N-Zusatzdeposition deutlich (Ba, Da und WeS). Andere, unvollständige Daten von Be, WeN und Wi veranschaulichen eine vergleichbare Reaktion der Vegetation auf erhöhte N-Depositionen. Verantwortlich hierfür ist häufig das Hinzutreten der säure- und nährstofftoleranten Arten Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*, $NZ = 4$), Breitblättriger Dornfarn (*Dryopteris dilatata*,

$NZ = 7$), Grünstängelmoos (*Scleropodium purum*) zulasten der nährstoffmeidenden Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*). Arten mit dem höchsten $NZ = 9$ wie Große Brennnessel (*Urtica dioica*) und Schwarzer Holunder (*Sambucus nigra*) beschränkten sich zumeist auf den stallnahen Waldrand, wo sie vermutlich auch von dem höheren Lichtangebot und Einträgen anderer Nährstoffe aus Stäuben gefördert werden.

3.5 Nährstoff-Verfügbarkeitsstufen

Die nach VDI 3959, Bl. 1, auf Basis der NZ-gemittelten Nährstoff-Verfügbarkeitsstufen liegen bei den meisten stallfernen Standorten im Bereich von „sehr gering“ bis „mittel“ (Abbildung 8). Mit Annäherung zu den Stallanlagen steigt der Eutrophierungsgrad der Vegetation oft um eine N-Verfügbarkeitsstufe. Die Nährstoff-Verfügbarkeitsstufen „hoch“ und „sehr hoch“ wurden auch an den extrem belasteten Waldrändern der Messorte En und Wa ($D_{Z, N, TAL} > 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) nicht erreicht. Ursache hierfür sind offensichtlich die basenarmen Sande, deren Mangel anderer Nährstoffe (P, K, Mg, Ca) wachstumslimitierend ist. Die mittleren N-Zeigerwerte und die Nährstoff-Verfügbarkeitsstufe der Vegetation reicherer Böden (Sa und Wi) liegen trotz niedriger Zusatzbelastung auf vergleichbar hohem Niveau.

Aus den ordinalskalierten Verfügbarkeitsstufen beider Auswertungsverfahren lassen sich keine regressionsanalytisch ermittelten Dosis-Wirkung-Beziehungen ableiten. An Orten mit gerichtetem Gradienten steigen die mittleren Zeigerwerte zum Teil schon zwischen der dritten und vierten Entfernungsstufe, d. h. bei geringer Zunahme der N-Depositionen von wenigen $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

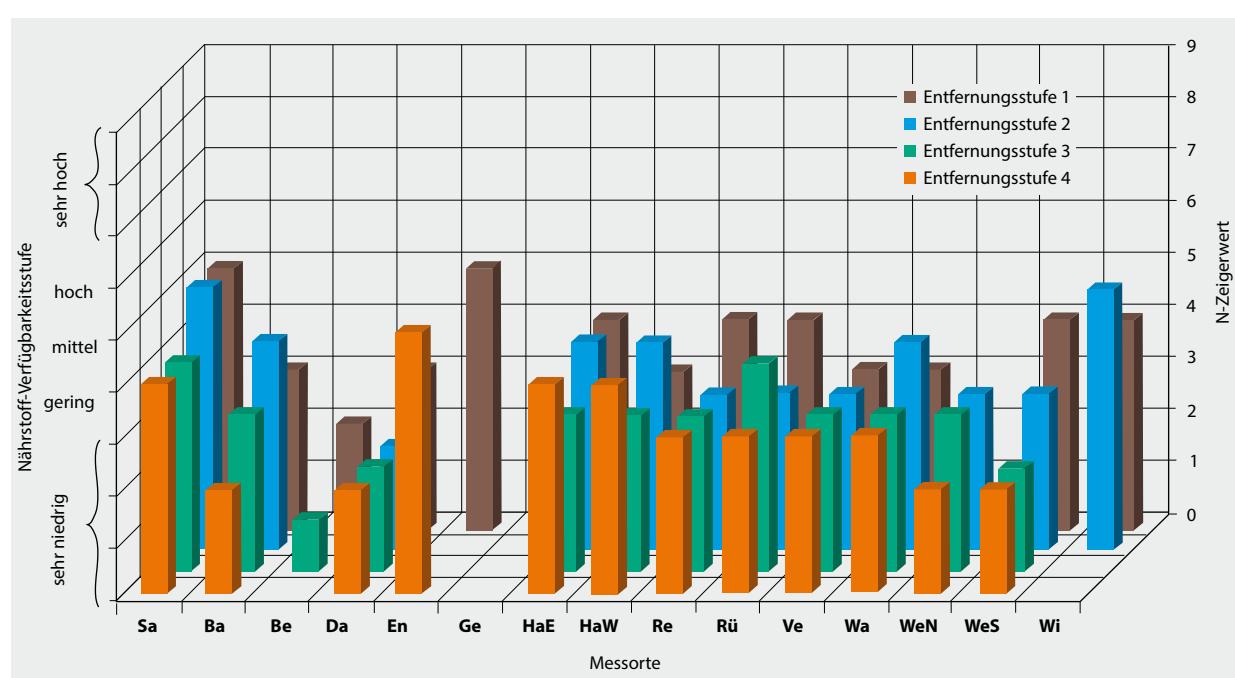


Abbildung 8

Nährstoff-Verfügbarkeitsstufen der Bodenvegetation nach VDI 3959, Bl. 1.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Die N-Depositionen liegen in agrarisch intensiv genutzten Regionen Deutschlands deutlich über den critical loads (CL) empfindlicher Ökosysteme (Buitjes et al., 2011; Bobbink et al., 2011). Insbesondere in Nordwestdeutschland werden die CL, die für die meisten Wälder zwischen 10 und 20 kg ha⁻¹ a⁻¹ N liegen, zum Teil um ein Vielfaches überschritten. Mohr und Dämmgen (2013) geben Vorbelastungen (Depositionen) zwischen 40 und 60 kg ha⁻¹ a⁻¹ N an; die in dieser Arbeit berechneten Zusatzdepositionen überschritten teilweise 100 kg ha⁻¹ a⁻¹ N.

Bei der Ausprägung der Wirkungen von N-Depositionen spielen Standort und Nutzung eine entscheidende Rolle. Ihre Bedeutung ist wiederum an die unterschiedlichen Ansprüche (Waldfunktionen) geknüpft und unter ökologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekten zu bewerten. Der von der Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionschutz vorgelegte Leitfaden (LAI, 2012) nennt hierzu eine Vorgehensweise für die Genehmigungspraxis bei Stallbauvorhaben. Die Ergebnisse der vor diesem Hintergrund durchgeföhrten Untersuchungen legen die ökologischen Folgen langfristiger N-Depositionen in der Umgebung von Stallanlagen offen – dies in einer tierhaltungsintensiven Region, in der bereits die großräumige Hintergrunddeposition mit großer Wahrscheinlichkeit seit Jahrzehnten die CL für Wälder überschritten.

Die Effekte erhöhter N-Depositionen treten im N_{min}-Vorrat, pH-Wert und den Blatt- und Nadelspiegelwerten mehr oder minder deutlich hervor. Vor allem an den zum Teil sehr hoch belasteten Waldrändern waren die Wirkungen an allen untersuchten Ökosystemkompartimenten (Boden, Baumbestand, Bodenvegetation) erkennbar.

Das Laub der unter vergleichsweise geringer Zusatzbelastung stehenden Eichen- und Buchenbestände wies keine sichtbaren Schädigungen in der Nähe der Stallanlagen auf. Wie bei Thomas und Büttner (1998) beschrieben, lässt sich der Fraß der Eichenwickler-Schadgesellschaft nicht mit erhöhten N-Depositionen in Zusammenhang bringen. Gleichwohl deutet sich aus anderen Beobachtungen eine vergleichsweise hohe Empfindlichkeit der Japanlärche gegenüber N-Depositionen an.

Die Waldkiefer zeigte im Vergleich zu den anderen Baumarten den geringsten Schädigungsgrad und erwies sich auch bei einer Zusatzdeposition deutlich über 60 kg ha⁻¹ a⁻¹ als vergleichsweise unempfindlich. Dagegen zeigte die empfindlichere Rotfichte bei Zusatzdepositionen von etwa 50 ha⁻¹ a⁻¹ am Waldrand eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Pilzbefall (*Phomopsis ssp.*), während bei Japanlärche unter diesen Bedingungen deutliche Kronendeformationen auftraten.

Bereits deutlich geringere N-Depositionen riefen negative Wirkungen auf das C/N-Verhältnis im Auflagehumus, den N_{min}-Vorrat im Mineralboden und die N-Konzentration in den Nadeln hervor. Diese Indikatoren zeigten in einer bundesweiten Auswertung forstlicher Monitoringdaten (Augustin und Wolff, 2003; Spangenberg, 2002) ebenfalls vergleichsweise empfindliche Reaktionen auf atmosphärische N-Einträge. Die

C/N-Verhältnisse im Auflagehumus der Nadelwälder im Untersuchungsgebiet waren mit 17 bis 25 deutlich reduziert. Bereits bei vorgefundene C/N-Verhältnissen unter 25 besteht somit das Risiko erhöhter NO₃-Austräge in allen untersuchten Wäldern, wie sie von Horváth et al. (2012) für einige Waldgebiete Nordwestdeutschlands belegt wurden.

N-Konzentrationen in Kiefernneedeln und Bodenmoosen bilden die Höhe der N-Depositionen unter vergleichbaren Standortbedingungen gut ab (Flückiger und Braun, 1998; Mohr, 2007; Franzaring et al., 2010). Auch in dieser Studie standen die N-Konzentrationen in den Nadeln von Kiefer und Fichte in enger Beziehung zu den modellierten Zusatzdepositionen. Sie lagen mit durchschnittlich 18 g kg⁻¹ N in der Trockensubstanz auch außerhalb des Einflussbereiches der Stallanlagen über den bei Bergmann (1983) und Heinsdorf (1995) genannten Normalwerten. Beim Arbeitskreis Standortkartierung (2003) werden einjährige Kiefer- und Fichtenneedeln mit N-Konzentrationen von 17 g kg⁻¹ N (in der Trockensubstanz) als hoch versorgt eingestuft. Andere bei zunehmendem N-Angebot (wachstumsbedingt) häufig defizitären Nährelemente, insbesondere Mg, standen in dieser Studie nur lose in einem negativen Zusammenhang mit den Zusatzdepositionen. Hierfür sind vermutlich auch die in fast allen Beständen durchgeföhrten Bodenschutzkalkungen verantwortlich, wodurch mögliche Nährstoffdefizite teilweise ausgeglichen werden.

Andere Untersuchungsparameter (N-Vorrat im Auflagehumus, Boden-pH, Basensättigung) zeigten keine statistisch signifikante Reaktion auf die Zusatzdeposition, die von benachbarten Stallanlagen herrührt. Mitverantwortlich ist das insgesamt hohe Belastungsniveau und die begrenzte Anzahl statistisch ausgewerteter Fälle (in der Regel 60). Aber auch die von Landscheidt (2010) vorgenommene selektive Auswertung der Daten, z. B. von Standorten, die einen gerichteten Gradienten der N_{min}-Konzentrationen aufwiesen, kam zu keinem anderen Ergebnis. Graduelle Unterschiede der boden- und pflanzenphysiologisch bedeutsamen Bodenversauerung werden offensichtlich durch die forstwirtschaftliche Nutzung (z. B. Bodenschutzkalkung, Holznutzung) und durch die vorhandene erhöhte Hintergrundbelastung überprägt (Eberl, 2002). Vermutlich spielen auch die puffernden Effekte des basischen NH₃ oder die aus Stallanlagen freigesetzten, basisch wirkenden Stäube eine Rolle. Auf die Zunahme standortfremder, nitrophytischer Pflanzen in der Waldbodenflora durch großräumig erhöhte N-Depositionen wird von vielen Autoren hingewiesen (z. B. Ellenberg, 1996; Bernhardt, 2005). Bei den untersuchten Waldbeständen wurde dies besonders deutlich an den atypischen Brennesselsäumen der von Natur aus oligotrophen Waldrändern.

Im Bestandesinneren war der Einfluss stallbürtiger N-Depositionen auf die Artenzusammensetzung der Bodenvegetation sehr unterschiedlich ausgeprägt. Die Vegetationsaufnahmen von fünf Monitoringorten mit zwei und mehr ausgewerteten Monitoringpunkten besaßen einen zur Stallanlage gerichteten Anstieg der mittleren N-Zeigerwerte. Bei sechs Messorten war dagegen auch bei N-Depositionen von z. T. deutlich über 50 kg ha⁻¹ a⁻¹ kein Gradient feststellbar. Die

Nährstoff-Verfügbarkeitsstufen nach VDI 3959, Bl. 1, lagen insgesamt auf einem niedrigen Niveau zwischen „sehr gering“ und „gering“. Auch bei hoch belasteten Waldflächen wurde die Einstufung „mittel“ in keinem Fall überschritten. Die Aussagekraft dieser Einstufungen zur Höhe atmosphärischer N-Einträge ist auf basenarmen Standorten offenbar begrenzt. Auch bestand – anders als bei Ellenberg et al. (2001) beschrieben – kein Zusammenhang zwischen mittleren Zeigerwerten (NZ) und den N_{min} -Gehalten im Boden.

Die festgestellte niedrige Basensättigung der Böden unter 10 % bedeutet für viele „Stickstoffzeiger“ wie z. B. Große Brennnessel (*Urtica dioica*) und Schwarzer Holunder (*Sambucus nigra*) eine Limitierung des Pflanzenwachstums, wodurch sie weniger als erwartet in den Vordergrund treten. Als wichtigste Einflussgröße für die Zusammensetzung der Waldbodenvegetation stellten Block et al. (2000) bei der Auswertung bundesweit erhobener Daten ebenfalls den Säure-Base-Zustand heraus.

Ein ausreichendes Angebot basischer Nährelemente wiesen die von Roland (2009) in Nordwestdeutschland untersuchten Buchenwälder auf Tertiärkreide auf, die N-Depositionen ausgesetzt sind, die mit denen dieser Studie vergleichbar sind. Die aufgrund ihrer Exposition in dem Waldgebiet und anhand der N-Konzentrationen in den Bodenmoosen zu erwartenden lokalen Unterschiede der N-Depositionen waren jedoch auch hier gegenüber anderen Standortfaktoren (z. B. Beschattung, Wasserversorgung) bei der Ausprägung der Bodenvegetation von untergeordneter Bedeutung. In Lichtungen, Aufforstungen und durch forstliche Maßnahmen gestörten Bereichen – die in Vegetationsuntersuchungen generell unberücksichtigt bleiben – können N-Zeiger wie Brombeere (*Rubus fruticosus agg.*) und Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*) jedoch größere Deckungsgrade erreichen und ein Verjüngungshemmnis für den Baumbestand bilden.

Eine sensiblere Reaktion der Vegetation auf NH_3 -N-Depositionen in der Umgebung von Stallanlagen fanden Pitcairn et al. (1998). Die in mitteleuropäischen Nadelwäldern und auch in den untersuchten Wäldern häufig abundante Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*, $NZ = 3$) zeigte bei der deutlich geringeren Hintergrundbelastung in Schottland eine starke Zunahme in der Nähe von Stallanlagen. Sehr hohe Deckungsgrade besitzt im Untersuchungsgebiet auch der Rankende Lerchensporn (*Ceratocapnos clavicularia*). Diese rohhumusbewohnende, an basenarme Standorte angepasste Art ($NZ = 6$) ist in den letzten Jahrzehnten aus dem euanatlantischen westlichen Florenareal eingewandert. Ihre großräumige Ausbreitung in östliche und südliche Landesteile wird auf klimatische Ursachen und erhöhte N-Depositionen zurückgeführt (Lethmate et al., 2002).

Die ökologischen Wirkungen der N-Depositionen von den Stallanlagen wurden am deutlichsten durch messbare stoffliche Veränderungen im Boden und in den Blattorganen. Wenngleich die Vegetation durch N-Anreicherung und Biomassezuwachs in der Lage ist, größere N-Mengen auch mittelfristig zu speichern (Bergmann, 1998; Nieder et al., 2000), so stellt der Boden zusammen mit der Humusauflage die

weitaus größere N-Senke dar. Wegen der extremen räumlichen Streuung und der Höhe des Bodenstickstoffvorrates war der Einfluss der NH_3 -Emissionen benachbarter Stallanlagen auf diesen N-Pool nicht feststellbar. Dieser Umstand stellt für die Bilanzierung der N-Flüsse in Waldökosystemen generell ein Problem dar (Dämmgen et al., 2005). Im Bodenhumus gebunden liegen die N-Vorräte mitteleuropäischer Wälder zwischen etwa 1 und über 15 Mg ha^{-1} (Wolff und Riek, 1996); in den Böden norddeutscher Nadelwälder etwa 3 bis 6 kg ha^{-1} (Bartens und Büttner, 1997; Heinsdorf, 1997). Das N-Akkumulations- und -Retentionsvermögen der Böden ist begrenzt und wird von vielen standörtlichen und nutzungsbedingten Einflüssen bestimmt (Brinkmann und Nieder, 2003), sodass sich die Wirkungen stallbürtiger N-Depositionen auch nach dem Zeitraum von ca. 40 Jahren noch verstärken können. Kurzfristiger und sensibler reagieren die N-Konzentrationen in den Blättern und Nadeln über direkt aus der Atmosphäre aufgenommenes reaktives N, wodurch sich die Wirkungen der Zusatzbelastungen über 5 kg $ha^{-1} a^{-1}$ von denen der Hintergrundbelastungen unterscheiden lassen. Damit bestätigt dieser Wert das in LAI (2012) genannte Abschneidekriterium in gleicher Höhe für die Bewertung von N-Depositionen im Rahmen von Genehmigungsverfahren

Fazit

Die Gegenüberstellung der Wirkungen mit den retrospektiv nach TA Luft modellierten Zusatzdepositionen geben Wirkungsschwellen zu erkennen, oberhalb derer – unter den Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes – statistisch signifikante Veränderungen im Wald zu erkennen sind. Sie liegen in einem Bereich zwischen 5 kg $ha^{-1} a^{-1}$ (N-Konzentrationen in Kiefernneedeln) und 50 kg $ha^{-1} a^{-1}$ (Kronenverlichtungen).

Anders als CL beziehen sich diese Zusatzdepositionen auf negative Veränderungen bestimmter Ökosystemkompartimente unter Einbeziehung der aktuell relativ hohen Vorbelastung. Zusammen mit der von Mohr und Dämmgen (2013) mittels Kronentraufenmessungen in diesem Raum gemessenen Hintergrundbelastung von ca. 25 kg $ha^{-1} a^{-1}$ addieren sich die Gesamtdepositionen auf mindestens 75 kg $ha^{-1} a^{-1}$, welche nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen direkte Schädigungen am Baumbestand hervorrufen können. Die in dieser Studie berücksichtigten Wirkzeiträume von ca. 40 Jahren entsprechen zwar etwa denen der CL (Sutton et al., 2009); sie liegen aber deutlich unter der Lebenserwartung bzw. den Umtriebszeiten von Bäumen. Hierdurch ist die maximale Wirkchwelle von 75 kg $ha^{-1} a^{-1}$ beispielweise bei der genehmigungsrechtlichen Bewertung der Zusatzdepositionen lediglich für ökologisch weniger sensible Gehölzbestände (z. B. Hofgehölze, Pappelwälder) relevant. Demgegenüber bildet die untere Wirkchwelle von 5 kg $ha^{-1} a^{-1}$ – analog zu dem im LAI-Leitfaden geltenden Abschneidekriterium – das untere Niveau messbarer Veränderungen durch Zusatzdepositionen ab. Geringere Zusatzdepositionen haben möglicherweise bereits einen Einfluss auf die Zusammensetzung der Waldbodenvegetation.

Literatur

- Arbeitskreis Standortkartierung (2003) Forstliche Standortsaufnahme : Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching : IHW-Verl, 352 p
- Augustin S, Wolff B (2003) Beziehungen zwischen Critical Loads-Überschreitungen und Daten des forstlichen Umweltmonitorings am Beispiel des Stickstoffhaushaltes von Fichtenwäldern. Ber Freiburger Forstl Forsch 49(1):115-123
- Bartens H, Büttner G (1997) Bodenzustandserhebung in Niedersachsen 1990/91 : Datendokumentation. Göttingen : Forschungszentrum Waldökosyst, 476 p, Ber Forschungszentrum Waldökosysteme C 5
- Bergmann C (1998) Stickstoff-Umsätze in der Humusauflage unterschiedlich immissionsbelasteter Kiefernbestände (*Pinus sylvestris* L.) im nordostdeutschen Tiefland. Cottbus : Brandenburgische Techn. Univ, 128 p, Cottbuser Schr Bodenschutz Rekultivierung 1
- Bergmann W (1983) Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Jena : G. Fischer, 614 p
- Bernhardt M (2005) Reaktionen der Waldbodenvegetation auf erhöhte Stickstoffeinträge : Analyse und Vorhersage von Vegetationsveränderungen anhand von funktionellen Merkmalen. Berlin : Bornträger, 121 p, Dissertationes Botanicae 397
- Block J, Eichhorn J, Gehrmann J, Kölling C, Matzner E, Meiweis KJ, von Wilpert K, Wolff B (2000) Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Bonn : BMELF, 167 p
- BMU-Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002) Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhal tung der Luft - TA Luft) v. 24. Juli 2002 [online]. Zu finden in <<http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf>> [zitiert am 06.05.2013]
- Bobbink K, Braun S, Nordin A, Power S, Schütz K, Strengborn J, Weijters M, Tomassen H (2011) Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships [online]. Zu finden in <<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680359002.pdf>> [zitiert am 17.04.2013]
- Braun-Blanquet J (1964) Pflanzensoziologie : Grundzüge der Vegetationskunde. Wien : Springer, 865 p
- Brinkmann S, Nieder R (2003) Critical loads für eutrophierenden Stickstoff : Weiterentwicklung des Ansatzes unter besonderer Berücksichtigung der Umsetzung im Boden (Humusschicht) FGH II 1.2: Wirkungen auf Ökosysteme und Materialien. Braunschweig : Inst Geoökologie, 115 p
- Buitjes P, Hendriks E, Koenen M, Schaap M, Banzhaf S, Kerschbaumer A, Gauger T, Nagel H-D, Scheuschner T, Schlutow A (2011) Erfassung, Prognose und Bewertung von Stickstoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland : zusammenfassender Abschlussbericht [online]. Zu finden in <<http://www.uba.de/uba-info-medien/4137.html>> [zitiert am 17.04.2013]
- Dämmgen U, Grünhage L (1998) Response of a grassland ecosystem to air pollutants : 5. A toxicological model for the assessment of dose-response relationships for air pollutants and ecosystems. Environ Pollut 101(3):375-380
- Dämmgen U, Matschullat J, Zimmermann F, Strogies M, Grünhage L, Scheler B, Conrad J (2013) Emission reduction effects on bulk and wet-only deposition in Germany – evidence from long-term observations : Part 3: Sulphur and nitrogen compounds. Gefahrstoffe Reinh Luft, im Druck
- Dämmgen U, Mohr K, Meesenburg H (2005) Die Bestimmung von Flüssen reaktiver Stickstoff-Spezies in hoch mit Stickstoff belasteten Waldökosystemen: methodische Grundlagen, Randbedingungen und Konzept der Messungen und Modellierungen im ANSWER-Projekt. Landbauforsch Völkenrode SH 279, 9-15
- Eberl C (2002) Stoffhaushaltsprognosen 2: Wirkung von Kalkung auf den chemischen Bodenzustand. Ber Forschungszentrum Waldökosysteme B 68:126
- Ellenberg H (1996) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Stuttgart : Ulmer, 1095 p
- Ellenberg H, Düll R, Weber H, Werner W, Wirth V (2001) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Göttingen : Goltze, 262 p, Scripta Geobotanica 18
- EU-Europäische Union (2001) Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (NEC Richtlinie). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften : L, Rechtsvorschriften L 309:22-30
- Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, Eerden L Van der, Jäger H-J (1994) Effects of atmospheric ammonia on vegetation : a review. Environ Pollut 86:43-82
- Finlayson-Pitts BJ, Pitts JN (1986) Atmospheric chemistry : fundamentals and experimental techniques. New York : Wiley, 1098 p
- Flückiger W, Braun S (1998) Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leave nutrient status, parasite attacks and soil acidification. Environ Pollut 102:69-76
- Frahm JP, Frey W (1987) Moosflora. Stuttgart : Ulmer, 525 p
- Franzaring J, Holz I, Zipperle J, Fangmeier A (2010) Twenty years of biological monitoring of element concentrations in permanent forest and grassland plots in Baden-Württemberg (SW Germany). Environ Sci Pollut Res 17:4-12
- Garber K, Schürmann B (1971) Wirkung und Nachweis von Ammoniak-Immissionen in der Nähe von Großställungen. Landwirtsch Forsch 26/I:36-40
- Gehrmann J (2003) Atmosphärische Stoffeinträge und deren Langzeitwirkung im Wald. LÖBF-Mitt (2):24-29
- Gregor H-D (ed) (1995) IMA-Querschnittsseminar Wirkungskomplex Stickstoff und Wald : Umweltbundesamt 21./22. November 1994. Berlin : Umweltbundesamt, 232 p, Texte / Umweltbundesamt 28
- Hanisch B, Kilz E (1990) Waldschäden erkennen : Fichte und Kiefer. Stuttgart : Ulmer, 334 p
- Heinken T (1995) Naturnahe Laub- und Nadelwälder grundwasserferner Standorte im niedersächsischen Tiefland : Gliederung, Standortsbedingungen, Dynamik. Berlin : Cramer, 311 p, Dissertationes Botanicae 239
- Heinsdorf D (1995) Forstliche Strategien in Waldgebieten am Beispiel des nord-ostdeutschen Tieflandes. Texte / Umweltbundesamt 28:183-191
- Heinsdorf D, Krauss H-H (1991) Massentierhaltung und Waldschäden auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. Forst Holz 13:356-361
- Heinsdorf M (1997) Boden- und ernährungskundliche Untersuchungen in Kiefern- und Kiefern-Buchen-Mischbeständen auf verschiedenen Standorten Brandenburgs. Beitr Forstwirtsch Landschaftsökol 31:119-124
- Horváth B, Meiweis KJ, Meesenburg H, Ackermann J (2012) Nitrausträge unter Wald : Untersuchungen auf Standorten mit hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen. Grundwasser 9:1-32
- König N (2009) Handbuch Forstliche Analytik : 4. Ergänzung 2009 [online]. Zu finden in <<http://www.bmvelv.de/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Wald-Jagd/WaldBodenZustand/Handbuch-Forstliche-Analytik.html>> [zitiert am 22.04.2013]
- LAI-Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (2012) Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz : Langfassung ; Stand 1. März 2012 [online]. Zu finden in <<http://www.umweltbundesamt.de/luft/downloads/lai-n-leitfaden.pdf>> [zitiert am 22.04.2013]
- Landscheidt S (2010) Wirkungen von Stickstoffimmissionen auf Waldböden im Nahbereich von Intensivtierhaltungen. Oldenburg : Univ, 98 p
- Lethmate J, Ebke K, Pollmann W (2002) Zur Ausbreitung des Rankenden Lerchensporns Ceratocapnos clavigulata (L.). Osnabrücker Naturwiss Mitt 26:117-135
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2006) Leitfaden zur Erstellung von Immissionsprognosen mit AUSTAL2000 in Genehmigungsverfahren nach TA Luft und der Geruchsimmisions-Richtlinie. Essen : Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 71 p, Merkblätter / Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen 56
- Meisel-Jahn S (1955) Die Kiefernforstgesellschaften des nordwestdeutschen Flachlandes : ihre Beziehungen zu den natürlichen Waldgesellschaften und zum Boden, ihre Genese und ihre Bedeutung für die Landschaftsgliederung. Stolzenau/Weser, 126 p, Angew Pflanzensoziol 11
- Mohr K (2007) Biomonitoring von Stickstoff-Immissionen : Möglichkeiten und Grenzen von Bioindikationsverfahren. Umweltwiss Schadstoffforsch 19:255-264
- Mohr K (2011) Untersuchungen zur Bewertung der Auswirkungen von Ammoniak- und Stickstoff-Depositionen auf Pflanzen und Ökosysteme im Nahbereich von Stallanlagen (BESTAND) : Endbericht, EH-Vorhaben

- 2809HS015 für die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) [online]. Zu finden in <<http://download.ble.de/09HS015.pdf>> [zitiert am 17.04.2013]
- Mohr K, Dämmgen U (2013) Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen. Teil 1: Bestimmung von Dosis-Größen. **Landbauforsch** 63(2):115-128
- Mohr K, Schaaß S, Horvath B, Meesenburg H, Dämmgen U (2005) Stoff- und Energieflüsse der im ANSWER-Projekt untersuchten Waldbestände. **Landbauforsch Völkenrode SH** 279:69-94
- Nieder R, Wachter H, Isermann K (2000) Erhöhte Stoffausträge bald auch aus Waldböden? **AFZ Wald** 11:594-599
- Pitcairn CER, Leith ID, Sheppard LJ, Sutton MA, Fowler D, Munro RC, Tang S, Wilson D (1998) The relationship between nitrogen deposition, species composition and foliar nitrogen concentration in woodland flora in the vicinity of livestock farms. **Environ Pollut** 102:41-48
- Roland C (2009) Vegetations- und bodenkundliche Untersuchungen zur Eutrophierung von historisch alten Laubwaldbeständen am Beispiel der Buchenwälder des Stemweder Berges. **Vechta : Hochschule**, 236 p
- Rothmaler W (1994) Exkursionsflora von Deutschland : Bd. 1, Niedere Pflanzen. **Jena : Fischer**, 811 p
- Seibold R, Barth C (1976) Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Meldungen : Neumann-Neudamm, VDLUFA-Methodenbuch 3
- Siebel HN, Bijlsma RJ, Bal D (2006) Toelichting op de rode lijst mossen. Ede : Directie Kennis, Ministerie Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 70 p, Rapport DK 2006/034
- Spangenberg A (2002) Stickstoffbelastung an Waldrändern : Untersuchungen in südbayrischen Regionen mit hoher Ammoniakemission. München : Frank, 176 p, Forstl Forschungsber München 190
- Stortefelder AFH, Schaminée JHJ, Hommel PWFM (1999) De vegetatie van Nederland : 5. Plantengemeenschappen van ruitgen, struwelen, bossen. Uppsala, Leiden : Opus Pr, 376 p
- Sutton MA, Sheppard LJ, Fowler D (2009) Potential for the further development and application of critical levels to assess the environmental impacts of ammonia. In: Sutton MA, Reis S, Baker S (eds) Atmospheric ammonia : detecting emission changes and environmental impacts ; results of an expert workshop under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution ; The "Edinburgh Workshop", 4-6 December 2006. Dordrecht : Springer, pp 41-48
- Thomas FM, Büttner G (1998) Zusammenhänge zwischen Ernährungsstatus und Belaubungsgrad in Alteichenbeständen Nordwestdeutschlands. **Forstw Cbl** 117:115-128
- Thun R, Herrmann R, Schmitt L (1991) Die Untersuchung von Böden. Radebeul : Neumann, VDLUFA-Methodenbuch1
- UBA-Umweltbundesamt (2012) Vorbelastungsdaten Stickstoff TA Luft Nr. 4.8 – Genehmigungsverfahren [online]. Zu finden in <<http://gis.uba.de/web-site/depo1/index.htm>> [zitiert am 06.05.2013]
- Ulrich B (1995) Die Entwicklung der Waldschäden aus ökosystemarer Sicht. Texte / Umweltbundesamt 28:9-19
- VDI 3782 Blatt 5 (2006) Umweltmeteorologie : atmosphärische Ausbreitungsmodelle ; Depositionsparameter. Berlin : Beuth, 51 p
- VDI 3959 Blatt 1 (2008) Vegetation als Indikator für Stickstoffeinträge : Bewertung der Stickstoffverfügbarkeit durch Ellenberg-Zeigerwerte der Waldbodenvegetation. Berlin : Beuth
- von Zezschwitz E (1980) Analytische Kennwerte typischer Humusformen westfälischer Bergwälder. **Z Pflanzenernähr Bodenkunde** 143:692-700
- Wolff B, Riek W (1997) Deutscher Waldbodenbericht 1996 : Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung von 1987-1993 (BZE). Bonn : BMELF, 144 p

The effect of a Niacin supplementation to different diets on ruminal fermentation and flow of nutrients to the duodenum of dairy cows

Inka-Donata Niehoff*, Liane Hüther*, Peter Lebzien* and Gerhard Flachowsky*

Abstract

The objective of this study was to investigate the influence of a niacin supplementation to three diets with different forage to concentrate ratios (F:C ratio) on ruminal metabolism of dairy cows. The rations consisted of either 2/3 forage and 1/3 concentrate, 1/2 forage and 1/2 concentrate or 1/3 forage and 2/3 concentrate on dry matter basis. Each diet was fed in one period without and in the following period with a supplementation of 6 g niacin (nicotinic acid, NA) per cow and day. Three dry and seven mid-lactating Holstein-Friesian cows, equipped with cannulas in the dorsal sac of the rumen and proximal duodenum were used. Ruminal fluid was obtained before and six times after the morning feeding, while duodenal chyme was collected every two hours for five consecutive days. Cr_2O_3 was used as flow marker.

NA supplementation increased rumen ammonia concentration, whereas it decreased short-chain fatty acid concentration. The amount of organic matter reaching the duodenum was enhanced if niacin was added to the rations. NA supplementation also led to higher flows of microbial protein and undegraded feed protein to the duodenum. Furthermore, the efficiency of microbial protein synthesis was enhanced in supplemented animals.

The amounts of total niacin (the sum of NA and NAM) reaching the duodenum rose with increasing concentrate proportion and also with NA supplementation, whereas amounts of nicotinamide were only influenced by NA feeding and not by the F:C ratio.

Keywords: niacin, forage to concentrate ratio, dairy cows, nicotinic acid

Zusammenfassung

Der Einfluss einer Niacin Zulage zu unterschiedlichen Rationen auf die Pansenfermentation und den Nährstofffluss am Duodenum von Milchkühen

Ziel der Untersuchung war, den Einfluss einer Niacinzulage zu drei Rationen mit unterschiedlichem Grundfutter-Kraftfutter Verhältnis (F:C Verhältnis) auf den Pansenmetabolismus von Milchkühen zu untersuchen. Die Rationen bestanden aus 2/3 Grund- und 1/3 Kraftfutter, 1/2 Grund- und 1/2 Kraftfutter bzw. 1/3 Grund- und 2/3 Kraftfutter auf T-Basis. Jede Ration wurde in einer Periode ohne und in der folgenden mit einer Zulage von 6 g Niacin (Nicotinsäure, NA) pro Tier und Tag verfüttert. Eingesetzt wurden drei trockenstehende und sieben laktierende Holstein-Friesian Kühe im mittleren Laktationsstadium mit Fisteln im dorsalen Pansenack und proximalen Duodenum. Pansensaft wurde vor der Morgenfütterung und zu sechs Zeitpunkten danach, Duodenalchymus über fünf Tage alle zwei Stunden entnommen. Cr_2O_3 wurde als Flussmarker eingesetzt.

Der NA-Zusatz führte zu einem Anstieg der ruminalen Ammoniak-Konzentration, die Gesamtmenge an kurzkettigen Fettsäuren war dagegen vermindert. Die Menge an organischer Masse sowie die Flüsse an mikrobiellem Protein und unabgebautem Futterprotein am Duodenum waren durch den Niacinzusatz erhöht. Außerdem steigerte sich die Effizienz der mikrobiellen Proteinsynthese.

Die Mengen an Gesamt-Niacin (Summe aus NA und NAM) am Duodenum stiegen mit zunehmendem Kraftfutteranteil und bei einer NA-Zulage an, während der Fluss an Nicotinamid lediglich durch eine NA-Zulage und nicht durch das F:C-Verhältnis beeinflusst wurde.

Schlüsselwörter: Niacin, Grundfutter-Kraftfutter-Verhältnis, Milchkühe, Nicotinsäure

* Friedrich-Loeffler-Institute (FLI), Federal Research Institute for Animal Health, Institute of Animal Nutrition, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

Contact: liane.huether@fli.bund.de

1 Introduction

Niacin is of great importance in the energy metabolism because it is incorporated in the two electron-carrying coenzymes NAD(H) and NADP(H). In general, NAD⁺ is involved in energy yielding metabolism, whereas the major coenzyme for reductive synthetic reactions is NADPH (Bender, 1992). But to date, no recommendations for a general supplementation of niacin to dairy cow rations are given, because ruminal synthesis seems to cover the requirements (NRC, 2001).

If niacin was supplemented to cattle, it has been shown that only a part of the supplement arrived at the duodenum (Riddell et al., 1985; Zinn et al., 1987). Santschi et al. (2005a) stated that higher concentrate levels would probably influence bacterial population and rumen passage time, which could affect ruminal synthesis and use of B-vitamins. Hence, diets differing in forage to concentrate ratio might cause different amounts of niacin metabolised in the rumen. Therefore, the objective of this study was to investigate the effect of a niacin supplementation to three diets differing in forage to concentrate ratio on rumen fermentation parameters and the amount of nutrients, especially of niacin, arriving at the duodenum of dairy cows.

2 Materials and Methods

2.1 Experimental Design and Animals

The experiment was conducted according to the European Community regulations concerning the protection of experimental animals and the guidelines of the Regional Council of Braunschweig, Lower Saxony, Germany (File Number 33.11.42502-04-057/07). A total of 10 Holstein-Friesian cows was used. The cows were equipped with large rubber cannulas in the dorsal sac of the rumen (inner diameter: 10 cm) and in the proximal duodenum, close to the pylorus (inner diameter: 2 cm). At the beginning of the experiment, animals had an average weight of 599 ± 79 kg. Seven cows were in lactation (102 ± 18 days in milk at the beginning), and three were non-lactating. Lactation numbers ranged from second to fifth lactation. Lactating cows were milked at 5:00 and 16:00 h.

The cows were kept in a tethered stall with neck straps and with an individual trough for each cow. They had free access to water and to a salt block containing sodium chloride. Forage was offered at 5:30 and 15:30 h, concentrate was given at 5:30, 7:30, 15:30 and 17:30 h and hand mixed with roughage in the trough. Forage consisted of 60 % maize silage and 40 % grass silage on DM basis. Except for the dry cows, amounts offered were adjusted to the expected intake of each cow in order to reach nearly ad libitum intake but avoid refusals. Non-lactating cows were fed restrictedly according to their energy requirement for maintenance.

In six periods the cows were assigned randomly to one of the three experimental diets. The diets applied were the following: low concentrate (LC) which consisted of 1/3 concentrate and 2/3 forage on DM basis, medium concentrate (MC) with 1/2 concentrate and 1/2 forage and high concentrate (HC) which contained 2/3 concentrate and 1/3 forage.

Composition of the diets is given in Table 1. The DM content of forage was determined twice weekly and amounts offered were adapted, to maintain the appropriate forage to concentrate ratio (F:C ratio). Each diet was fed in one period without supplemental niacin and in the following period with a supplementation of 6 g niacin per cow and day as nicotinic acid (NA). The NA used was powdered NA, with a content of at least 99.5 % NA (Lonza Ltd., Basel, Switzerland). NA was mixed in an extra 100 g of mineral and vitamin premix and one half was top dressed on the concentrate during the morning feeding, the other half during the evening feeding. In periods without supplemental NA, 100 g of extra mineral and vitamin premix only were given in the same way. The seventh and last period was used to fill gaps in animal number per group.

Table 1

Planned composition of the diets in % (DM basis)

Components	LC ²	MC ³	HC ⁴
Grass silage	26.7	20.0	13.3
Corn silage	40.0	30.0	20.0
Wheat	8.3	12.5	16.7
Corn	8.3	12.5	16.7
Soybean meal	5.7	8.5	11.3
Peas	5.0	7.5	10.0
Dried sugar beet pulp	5.0	7.5	10.0
Mineral and vitamin premix ¹	0.7	1.0	1.3
Calcium carbonate	0.23	0.35	0.47
Urea	0.10	0.15	0.20

¹ Composition per kg: 140 g Ca, 120 g Na, 70 g P, 40 g Mg, 6 g Zn, 5.4 g Mn, 1 g Cu, 100 mg I, 40 mg Se, 25 mg Co, 1,000,000 IU vitamin A, 1,000,000 IU vitamin D3, 1,500 mg alpha tocopherol acetate

² LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis

³ MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis

⁴ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis

2.2 Sample Collection

During the first three weeks cows were adapted to the respective concentrate level. Afterwards each period consisted of four weeks: two weeks of adaptation to the diet, followed by one week of ruminal sampling and a second week of duodenal sampling.

Ruminal samples were taken on one day in the third week of each period. Approximately 100 mL of ruminal fluid were withdrawn from the ventral sac through the rumen fistula using a hand vacuum pump. Rumen fluid was taken before first feeding at 5:30 h in the morning, and 30, 60, 90, 120, 180 and 360 minutes afterwards.

For duodenal chyme collection in the last sampling week, four 100 mL samples were taken through the duodenal cannula at two hour intervals for five consecutive days, beginning at 6:00 h Monday morning until 4:00 h on Saturday morning. Immediately after withdrawal, pH was measured using a glass electrode (pH 525, WTW, Weilheim, Germany). The sample with the lowest pH (Rohr et al., 1984) was added

to the daily pooled sample from each cow and stored at -18 °C. For the calculation of the daily digesta flow, Cr₂O₃ as a flow marker was mixed with wheat flour (ratio 1:4). 50 g were distributed into the rumen every 12 h, beginning 10 d before the duodenal digesta sampling period, whereas one day before and during the sampling period, 25 g were administered every 6 h. In a comparison of measurements of duodenal flow in dairy cows (Rohr et al., 1984), the spot-sampling procedure has shown only small differences in flow as compared to the total collection. During the duodenal digesta sampling week, samples of concentrate and forage as well as occurring feed refusals were collected daily and pooled on a weekly basis. Part of this was freeze-dried (Christ Epsilon 1-15, Martin Christ GmbH, Osterode, Germany) for niacin analysis, the rest was dried at 60 °C for nutrient analysis. Daily duodenal digesta samples were freeze-dried as well. Afterwards, all dried samples were ground to pass through a 1-mm screen.

2.3 Analyses

Except for dried feedstuffs and refusals for nutrient analysis, samples that could not be analysed immediately were kept frozen at -18°C until analysis. Feeds and refusals were analysed for dry matter (DM), crude protein (CP), crude ash (Ash), ether extract (EE), crude fibre (CF) and starch according to methods of the VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten; Naumann and Bassler, 1976). The analysis of ADF and NDF was done following Goering and Van Soest (1970). The niacin content in feedstuffs was determined microbiologically with *Lactobacillus plantarum* by the LUFA Speyer. For the calculation of energy (ME) content, digestibility of the forage was determined in a digestibility trial with 4 adult wethers (GfE, 1991).

The pH of rumen fluid was measured immediately after withdrawal (pH525, WTW, Weilheim, Germany). NH₃-N in the rumen fluid was determined according to DIN 38406-E5-2 (Anonymous, 1998). Short chain fatty acids (SCFA) were analysed using a gas chromatograph (Hewlett Packard 5580, Avondale, PA, USA) equipped with a flame ionization detector as described by Geissler et al. (1976).

In thawed duodenal chyme, nitrogen concentration was quantified by the Kjeldahl method. The content of DM, ash and EE were determined in the freeze-dried and ground duodenal chyme with the same methods as for the feed analysis for each day of the sampling week. The proportion of microbial-N of non-ammonia-nitrogen (NAN) in duodenal chyme was determined via near infrared spectroscopy according to the method of Lebzien and Paul (1997). Cr₂O₃ was analysed by atomic absorption spectrophotometry according to Williams et al. (1962) and used to calculate duodenal DM flow. The daily duodenal DM flow was then used as a measure for the preparation of one pooled sample per cow per week, in which concentrations of CF, NDF, ADF and starch were analysed applying the same methods as for feedstuffs. Niacin (NA and nicotinamide) was determined in the pooled samples by HPLC. Sample preparation was carried out according to the method of Santschi et al. (2005a). 0.5 g freeze-dried digesta sample and 35 mL of HCl (0.1 M) were mixed in a 50 mL brown

glass flask, autoclaved for 50 min at 121 °C and after cooling, the mixture was diluted to a final volume of 50 mL with ultrapure water. 10 mL fluid was centrifuged for 30 min at 14000 × g and 4 °C and 20 µL of the supernatant were injected into a Shimadzu HPLC system (model SCL-10A controller, model LC-10AS pump, model SIL-10AC autosampler, model CTO-10AC oven; Shimadzu, Kyoto, Japan) equipped with a multi wavelength detector (model SPD-M10A VP; Shimadzu, Kyoto, Japan). Samples were run through a C18 column (Inertsil ODS, 150 mm x 3 mm i. d., 5 µm) and were eluted using a mobile phase, consisting of 94 % of sodium 1-hexanesulfonate monohydrate (5 mM) and sodium 1-pentanesulfonate monohydrate (3.8 mM) in ultrapure water (adjusted to pH 2.55 with 2M phosphoric acid) and 6 % acetonitrile at a flow rate of 0.5 mL/min. The detection wavelength was 260 nm.

2.4 Calculations and Statistics

The ME (MJ) content was calculated according to GfE (2001):

$$\text{ME (MJ)} = \frac{0.0312 \text{ g DEE} + 0.0136 \text{ g DCF} + 0.0147 \text{ g CP}}{(\text{DOM} - \text{DEE} - \text{DCF}) + 0.00234 \text{ g CP}}$$

Where DEE is digestible ether extract; DCF digestible crude fibre and DOM digestible OM.

Digestibility values for forage were obtained from the wether digestibility trial mentioned before, whereas for concentrates, tabular values were used (DLG, 1997).

Daily duodenal dry matter flow (DMF) was calculated as follows:

$$\text{DMF (kg/day)} = \frac{\text{chromium application (mg/d)}}{\text{duodenal chromium concentration (mg/g DM)}} / 1000$$

For the calculation of duodenal flow of nutrients, niacin and OM, the DMF at the duodenum was multiplied with their respective concentrations in duodenal chyme. Apparent niacin synthesis in the reticulo - rumen was calculated by subtracting the niacin intake from the amount arriving at the duodenum. Even though niacin analysis in feedstuffs was done microbiologically, it was assumed that the measured concentrations represent only NA (personal communication VDLUFA). This is consistent with data from literature, where also no nicotinamide (NAM) was present in feed (Santschi et al., 2005b).

The mean ammonia proportion of total N in duodenal chyme was assumed to be 4.9 % (Riemeier, 2004). Thus, the daily flow of NAN was estimated by subtracting 4.9 % of the N flow at the duodenum. Following Lebzien and Voigt (1999), utilizable crude protein (uCP) at the duodenum was estimated to be:

$$\text{uCP (g/d)} = \text{crude protein flow at the duodenum} - \text{endogenous protein (EP)}$$

Following Brandt and Rohr (1981) EP was calculated using DMF at the duodenum:

$$\text{EP (g/d)} = (3.6 * \text{kg DMF}) * 6.25$$

Rumen-degradable protein (RDP), rumen-undegradable protein (RUP) and fermented organic matter (FOM) were calculated with the equations:

$$\text{RDP (g/d)} = \text{CP intake} - \text{RUP}$$

$$\text{RUP (g/d)} = 6.25 * [\text{g NAN at the duodenum} - (\text{g microbial N} + (\text{g EP} / 6.25))]$$

$$\text{FOM (kg/d)} = \text{OM intake} - (\text{duodenal OM flow} - \text{microbial OM})$$

Microbial OM was estimated according to Schafft (1983):

$$\text{Microbial OM} = 11.8 * \text{microbial N}$$

The statistical analysis was performed using the statistical software package SAS (Version 9.1, procedure mixed, SAS Institute Inc., Cary, USA). The procedure "MIXED" was applied. Concentrate level ("CONC") and niacin ("NIA") were considered as fixed effects. Additionally, to analyse rumen variables, also the time after feeding in minutes ("MINUTES") was included. OM intake ("OMI") was considered as fixed regressive component. The fact that a cow had to be used in several periods for different treatments was taken into account by using the "RANDOM" statement for the individual "COW" effect. Variances were evaluated with the restricted maximum likelihood method (REML) and degrees of freedom were calculated according to the Kenward-Roger method. The "PDIFF" option was applied to test differences between least square means, using a Tukey-Kramer test for post-hoc analysis. Thus, the SAS code for rumen variables was as follows:

PROC MIXED METHOD = REML;

CLASS COW CONC NIA MINUTES;

**MODEL Y = CONC NIA CONC*NIA OMI MINUTES
MINUTES*CONC*NIA / DDFM
= KENWARDROGER;**

RANDOM COW;

**LSMEANS CONC NIA CONC*NIA MINUTES*CONC*NIA /
PDIFF e ADJUST = TUKEY;**

The SAS code applied for duodenal variables was basically the same, except for all "MINUTES" related effects and interactions, which were not of interest in duodenal measurements and therefore deleted in that model. Main effects of NA supplementation, level of concentrate or their interaction were considered as significant if F-statistics revealed $P \leq 0.05$,

a trend was announced if $P \leq 0.10$. All values presented are least square means (LS MEANS), except for chemical composition of feedstuffs, OM and niacin intakes, where arithmetic means are given.

3 Results

3.1 Feeding

Due to overnight drying of samples for DM determination, amounts fed could only be adapted at the following feeding. This resulted in differences between the F:C ratios planned and fed. For the LC ration, the real F:C ratio fed was 68.3 % forage and 31.7 % concentrate; for MC it was 49.8 % and 50.2 % and for the HC ration it was 35.2 % and 64.8 % on DM basis.

Diets applied in the present study were not formulated to be isonitrogenous and –caloric between different F:C ratios. The nutrient composition of each ration is given in Table 2, feed analyses were pooled over the course of the study for this calculation.

Table 2

Nutrient composition and energy content of the different rations fed ($n = 7$)

Nutrients g/kg DM	LC ¹		MC ²		HC ³	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
OM	938	3	940	2	941	2
CP	132	5	149	6	163	6
EE ⁴	28.4	4.7	27.5	3.7	26.7	3.0
CF ⁵	184	5	151	4	124	3
ADF	202	8	168	6	141	5
NDF	380	18	323	14	279	12
Starch	281	57	335	42	378	31
MJ ME / kg DM	11.20	0.04	11.67	0.04	12.04	0.03
Niacin, mg/kg DM	35.0	16.9	34.6	14.0	34.4	11.7

¹ LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis

² MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis

³ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis

⁴ EE = ether extract

⁵ CF = crude fibre

The native niacin concentration of the rations seemed to be nearly the same (Table 2). But especially for forage, there was a high variation in native niacin content between different batches (minimum = 21.5 mg/kg; maximum = 77.6 mg/kg). This is also indicated by the large standard deviation, especially in LC ration. Niacin content of concentrates was less variable (minimum = 27.3 mg/kg; maximum = 43.4 mg/kg). The arithmetic mean of organic matter intake (OMI) per day was almost equal for all rations and is shown in Table 3 together with the niacin intakes in the respective diets.

Table 3

Daily niacin and organic matter intake of the six experimental groups; arithmetic means, minimum- and maximum-values

Experimental group	Mean	Niacin intake g/d		Organic matter intake, kg/d	
		MIN - MAX	Mean	MIN - MAX	Mean
LC ¹	553	222 - 1133	12.1	7.0 - 15.5	
LC + NA ²	6449	6233 - 6839	12.4	7.0 - 15.5	
MC ³	325	177 - 412	12.3	6.7 - 16.3	
MC + NA	6337	6178 - 6426	12.6	6.7 - 16.3	
HC ⁴	476	233 - 838	12.2	6.4 - 16.3	
HC + NA	6370	6210 - 6509	12.4	6.4 - 15.6	

¹ LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis

² NA = nicotinic acid

³ MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis

⁴ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis

3.2 Rumen Fermentation Measurements

Because of the scope of this study, the effects of OM intake and time after feeding will not be presented in the following.

The results of ruminal measurements over the whole sampling time are shown in Table 4. As expected, the F:C ratio influenced almost all analysed variables. NA had a significant effect on ruminal ammonia concentration ($P < 0.001$), the molar proportions of iso-butyric acid ($P < 0.001$), iso-valeric acid ($P < 0.01$), valeric acid ($P < 0.01$) and the concentration of total SCFA in rumen fluid ($P < 0.001$). Ammonia concentration increased, whereas valeric acid and SCFA decreased with NA feeding. Interactions with F:C ratio were not significant for these variables.

Iso-valeric acid decreased with the LC, but increased with the HC ration, which resulted in a significant interaction between NA and concentrate level ($P < 0.001$). Another interaction was observed for molar proportion of iso-butyric acid ($P = 0.01$), because differences were very small with LC ration, but a distinct increase after NA supplementation was found with the MC and HC ration. A trend for an interaction ($P = 0.10$) was detected for propionic acid, because the molar proportion showed a numerical increase in LC ration due to NA feeding, but it decreased in the other two feeding strategies.

Table 4

Least square means and (standard error) of analysed ruminal variables over the whole sampling period

Item	LC ¹		MC ²		HC ³		CONC ⁵	NA	P CONC x NA	MIN ⁶ x CONC x NA
	- NA ⁴ (n = 8)	+ NA (n = 9)	- NA (n = 7)	+ NA (n = 7)	- NA (n = 9)	+ NA (n = 9)				
pH	6.36 (0.06)	6.37 (0.06)	6.33 (0.06)	6.35 (0.06)	6.25 (0.06)	6.35 (0.06)	0.16	0.12	0.37	0.97
Ammonia, mmol/L	6.51 (0.68)	8.01 (0.66)	7.06 (0.70)	9.49 (0.70)	6.33 (0.66)	8.48 (0.65)	0.04	< 0.001	0.49	< 0.01
Acetic acid, Mol%	62.7 (0.80)	63.1 (0.78)	64.1 (0.83)	64.3 (0.83)	58.1 (0.78)	59.0 (0.76)	< 0.001	0.24	0.76	1.00
Propionicacid, Mol%	18.1 (0.80)	18.4 (0.79)	18.1 (0.82)	17.8 (0.83)	21.8 (0.79)	20.4 (0.77)	< 0.001	0.20	0.10	0.99
Iso-butyricacid, Mol%	0.88 (0.04)	0.92 (0.04)	0.91 (0.04)	1.04 (0.04)	0.86 (0.04)	1.03 (0.04)	0.01	< 0.001	0.01	0.06
Butyric acid, Mol%	14.7 (0.45)	14.1 (0.43)	13.5 (0.47)	13.7 (0.47)	14.5 (0.43)	14.9 (0.42)	< 0.01	0.80	0.24	1.00
Iso-valeric acid, Mol%	1.73 (0.12)	1.67 (0.12)	1.63 (0.13)	1.63 (0.13)	1.45 (0.12)	1.93 (0.12)	0.57	< 0.01	< 0.001	0.50
Valeric acid, Mol%	1.98 (0.27)	1.86 (0.26)	1.86 (0.27)	1.47 (0.27)	3.30 (0.26)	2.77 (0.26)	< 0.001	< 0.01	0.20	1.00
SCFA ⁷ total, mmol/L	113.6 (3.61)	99.1 (3.47)	105.8 (3.77)	99.2 (3.78)	114.9 (3.47)	108.9 (3.35)	< 0.01	< 0.001	0.20	0.97

¹ LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis,

² MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis

³ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis

⁴ NA = nicotinic acid

⁵ CONC = level of concentrate

⁶ MIN = minutes after first feeding

⁷ SCFA = short chain fatty acids

Table 5

Nutrient flow at the duodenum and apparent ruminal digestibilities as well as the amount of fermented organic matter; LS MEANS and (standard error)

Item	LC ¹		MC ²		HC ³		P		
	- NA ⁴ (n = 8)	+ NA (n = 9)	- NA (n = 7)	+ NA (n = 7)	- NA (n = 9)	+ NA ⁵ (n = 9)	CONC ⁶	NA	CONC x NA
OM, kg/d	6.77 (0.28)	7.11 (0.27)	6.88 (0.29)	7.22 (0.29)	7.02 (0.27)	7.55 (0.27)	0.21	0.02	0.85
ARD ⁷ OM, %	46.9 (2.14)	43.4 (2.01)	44.6 (2.23)	43.3 (2.22)	45.2 (2.06)	41.5 (2.01)	0.48	0.03	0.70
NDF, kg/d	2.76 (0.19)	2.90 (0.18)	2.41 (0.20)	2.33 (0.20)	2.38 (0.18)	2.54 (0.18)	0.01	0.59	0.73
ARD NDF, %	46.6 (3.73)	45.0 (3.60)	44.1 (3.90)	47.0 (3.89)	39.0 (3.59)	37.8 (3.59)	0.01	0.99	0.69
ADF, kg/d	1.38 (0.12)	1.47 (0.11)	1.30 (0.12)	1.19 (0.12)	1.23 (0.11)	1.34 (0.11)	0.13	0.68	0.45
ARD ADF, %	49.2 (4.65)	47.5 (4.49)	42.8 (4.85)	48.1 (4.84)	37.8 (4.48)	36.4 (4.48)	< 0.01	0.79	0.53
Starch, kg/d	0.65 (0.09)	0.66 (0.09)	0.61 (0.10)	0.86 (0.10)	0.87 (0.09)	0.81 (0.09)	0.07	0.32	0.17
ARD Starch, %	84.6 (1.84)	83.2 (1.75)	86.9 (1.95)	83.0 (1.94)	83.0 (1.75)	83.8 (1.74)	0.63	0.24	0.35
FOM ⁸ , kg/d	7.34 (0.19)	7.21 (0.18)	7.60 (0.20)	7.30 (0.20)	7.51 (0.18)	7.44 (0.18)	0.36	0.20	0.76
FOM of OMI ⁹ , %	61.0 (1.43)	59.6 (1.37)	62.0 (1.51)	61.0 (1.51)	62.6 (1.37)	62.4 (1.37)	0.15	0.35	0.86

¹ LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis

² MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis

³ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis

⁴ NA = nicotinic acid

⁵ Values of one cow were excluded from this group, because she refused feed intake in duodenal sampling week

⁶ CONC = level of concentrate

⁷ ARD = apparent ruminal digestibility

⁸ FOM = fermented organic matter

⁹ OMI = organic matter intake

3.3 Nutrient Flow at the Duodenum

Nutrient flows at the duodenum are presented in Tables 5 and 6. OMI influenced most duodenal values, but this will as well not be presented.

The ruminal digestibility of fibre fractions and most measurements of nitrogen metabolism were affected by the F:C ratio. As shown in Table 5, the addition of NA to the respective ration led to an increased amount of OM arriving at the duodenum ($P = 0.02$). As a result, apparent ruminal OM digestibility decreased ($P = 0.03$) over all three rations fed. No other significant influences of niacin supplementation were observed for the nutrients mentioned in Table 5.

Several effects of niacin supplementation were observed on nitrogen metabolism (Table 6). Even though the proportion of microbial-N in NAN was not influenced by NA, the amount of N at the duodenum and NAN increased significantly during vitamin feeding ($P < 0.01$). Also, the amount of microbial protein increased ($P < 0.01$). As this increase was most pronounced with the HC ration (1,166 g MP without

and 1,412 g MP with NA), a trend for an interaction between NA and concentrate level was found ($P = 0.10$).

Furthermore, the amount of RUP arriving at the duodenum increased as well ($P = 0.01$) due to NA feeding, and it was also the case if it is expressed in percent of crude protein intake ($P < 0.01$). As uCP includes RUP and MP, uCP also rose after NA supplementation ($P < 0.01$).

Variables analysing the effectiveness of microbial protein synthesis were also influenced by the addition of NA. The amount of MP synthesized increased for all concentrate levels, either expressed per kg FOM ($P < 0.01$) or per MJ ME intake ($P < 0.01$). However, for MP per MJ ME also a trend for an interaction with F:C ratio was observed ($P = 0.10$), because differences were most pronounced with the HC ration (7.19 g/MJ ME without NA versus 8.68 g/MJ ME with NA) and only low with MC diet. Also, the amount of microbial protein per g RDP was increased after NA feeding ($P < 0.01$). A trend for an interaction with level of concentrate can be seen for this variable as well, as again the greatest difference was found with the

Table 6

N flow at the duodenum and efficiency of microbial protein synthesis; LS MEANS and (standarderror)

Item	LC ¹		MC ²		HC ³		P		
	- NA ⁴ (n = 8)	+ NA (n = 9)	- NA (n = 7)	+ NA (n = 7)	- NA (n = 9)	+ NA ⁵ (n = 9)	CONC ⁶	NA	CONC x NA
N, g/d	242 (16.3)	275 (15.6)	291 (17.2)	298 (17.2)	301 (15.6)	365 (15.5)	< 0.001	< 0.01	0.13
NAN ¹⁰ , g/d	230 (15.5)	262 (14.8)	277 (16.4)	283 (16.4)	286 (14.8)	347 (14.8)	< 0.001	< 0.01	0.13
Microbial-N, % of NAN	65.7 (0.77)	64.8 (0.75)	66.2 (0.79)	66.2 (0.79)	65.4 (0.75)	65.5 (0.75)	0.15	0.45	0.46
MP ⁷ , g/d	946 (66.8)	1053 (64.3)	1139 (70.0)	1163 (69.8)	1166 (64.2)	1412 (64.1)	< 0.001	< 0.01	0.10
MP:FOM ratio ⁸ , g/kg	125 (11.7)	146 (11.3)	151 (12.2)	159 (12.1)	150 (11.3)	183 (11.3)	< 0.01	< 0.01	0.31
MP:ME ratio, g/MJ	6.28 (0.41)	7.22 (0.40)	7.40 (0.43)	7.55 (0.43)	7.19 (0.40)	8.68 (0.40)	< 0.001	< 0.01	0.10
MP:RDP ratio, g/g	0.65 (0.06)	0.83 (0.06)	0.71 (0.06)	0.72 (0.06)	0.67 (0.06)	0.92 (0.06)	0.31	< 0.01	0.10
RUP, g/d	306 (34.4)	382 (32.8)	403 (36.4)	407 (36.4)	433 (32.7)	550 (32.7)	< 0.001	0.01	0.18
RUP, % of feed CP	17.1 (1.66)	22.7 (1.57)	19.3 (1.77)	19.6 (1.77)	19.5 (1.57)	25.3 (1.57)	0.11	< 0.01	0.15
uCP ⁹ , g/d	1253 (92.6)	1435 (88.2)	1539 (97.8)	1571 (97.6)	1599 (88.1)	1964 (88.0)	< 0.001	< 0.01	0.12

¹ LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis² MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis³ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis⁴ NA = nicotinic acid⁵ Values of one cow were excluded from this group, because she refused feed intake in duodenal sampling week⁶ CONC = level of concentrate⁷ MP = microbial protein⁸ FOM = fermented organic matter⁹ uCP = utilizable crude protein¹⁰ NAN = non-ammonia-nitrogen

HC ration (0.67 g/g without NA; 0.92 g/g with NA supplementation), whereas values for MC diet differed only marginally.

3.4 Niacin Flow at the Duodenum

The measured niacin flow and calculated apparent synthesis are presented in Table 7. The F:C ratio influenced all measurements except for NAM flow. The daily amount of NA arriving at the duodenum rose with increasing concentrate level ($P < 0.001$), but differences were small between MC and HC. Even though there was no effect of F:C ratio on NAM, the increasing NA flow led to a significant rise in total niacin ($P < 0.01$). The apparent synthesis was also influenced by the proportion of concentrate and was considerably lower with the LC ration than with MC or HC.

Addition of NA to the diet also influenced the niacin flow. The amount of NA reaching the duodenum was enhanced in all three rations after NA supplementation ($P < 0.001$). Even though NA was added, the NAM flow at the duodenum also

rose ($P = 0.05$) after NA feeding such as the total niacin flow ($P < 0.001$). There was a large effect of niacin addition on apparent niacin synthesis. For all supplemented groups, apparent synthesis of either total niacin or NA was below zero, indicating a substantial disappearance of the 6 g NA given. Concentrate level also had an effect, as disappearance of supplemental niacin was least with HC ration. Calculated from the LS MEANS given in Table 7, 88 % of the 6 g NA supplemented did not reach the duodenum in HC ration, whereas it was 94 % in MC and 93 % in LC diet.

4 Discussion

The effects of the F:C ratio on ruminal fermentation measurements have already been intensively investigated elsewhere (e.g., Yang et al., 2001; Moorby et al., 2006). Thus, they will only be discussed for duodenal niacin flows or if significant interactions with supplemental niacin occurred.

Table 7

Duodenal flow and apparent synthesis of niacin; LS MEANS and (standard error)

Item	LC ¹		MC ²		HC ³		P		
	- NA ⁴ (n = 8)	+ NA (n = 9)	- NA (n = 7)	+ NA (n = 7)	- NA (n = 9)	+ NA ⁵ (n = 9)	CONC ⁶	NA	CONC x NA
NA, mg/d	880 (128.1)	1242 (123.9)	1114 (133.3)	1395 (132.9)	1188 (123.6)	1762 (123.5)	< 0.001	< 0.001	0.25
NAM ⁷ , mg/d	724 (58.5)	779 (55.1)	780 (62.5)	831 (62.6)	707 (55.1)	871 (55.0)	0.61	0.05	0.49
Niacin total, mg/d	1602 (164.8)	2021 (158.3)	1886 (172.9)	2221 (172.5)	1895 (158.0)	2630 (157.8)	< 0.01	< 0.001	0.25
AS ⁸ NA, mg/d	335 (139.4)	-5199 (133.5)	804 (146.6)	-4915 (146.3)	713 (133.3)	-4608 (133.1)	< 0.001	< 0.001	0.22
AS niacin, mg/d	1057 (171.4)	-4419 (163.3)	1575 (181.1)	-4089 (180.9)	1421 (163.1)	-3738 (162.8)	< 0.01	< 0.001	0.22

¹ LC = low concentrate, 1/3 concentrate, 2/3 forage on DM basis
² MC = medium concentrate, 1/2 concentrate, 1/2 forage on DM basis
³ HC = high concentrate, 2/3 concentrate, 1/3 forage on DM basis
⁴ NA = nicotinic acid
⁵ Values of one cow were excluded from this group, because she refused feed intake in duodenal sampling week
⁶ CONC = level of concentrate
⁷ NAM = nicotinamide
⁸ AS = apparent synthesis, calculated as difference of amount arriving at the duodenum and intake

4.1 Rumen

Descriptions of the effects of a niacin supplementation on ruminal ammonia concentration in the literature are miscellaneous. As in this trial (Table 4), an increase in ammonia concentration after niacin supplementation was found in one study (F:C ratio 50:50; Riddell et al., 1980). Applying the same concentrate level, Madison-Anderson et al. (1997) detected only a trend for enhanced concentrations in niacin supplemented cows. Furthermore, Christensen et al. (1996) observed an interaction between content of fat in the diet and NA. NA feeding enhanced ammonia concentration in the rumen in high fat diets, but resulted in a decrease in low fat rations (F:C ratio 50:50). This decrease in ruminal ammonia concentration after niacin supplementation was also observed in other studies, *in vivo* (Samanta et al., 2000a) as well as *in vitro* (Shields et al., 1983; Samanta et al., 2000b). However, other *in vivo* experiments did not show an effect of a niacin supplementation on ruminal ammonia concentration (Arambel et al., 1986; Doreau and Ottou, 1996). No particular F:C ratio was obvious in these studies, where an effect in either direction was always seen. This is in accordance with the own results, because the augmentation of ammonia concentration occurred at all three concentrate levels.

Riddell et al. (1980) attributed the observed increase in ruminal ammonia concentration to an apparent stimulation of ureolytic activity in the rumen of niacin fed cows, because urea nitrogen contents were lowered in those animals.

Another explanation could be an effect on rumen protozoa. It is often assumed that niacin is beneficial for protozoa in the rumen, because they are not able to synthesize the vitamin and significant increases of protozoa in rumen fluid have been observed after niacin feeding (Horner et al.,

1988; Erickson et al., 1990; Doreau and Ottou, 1996). Fauna typically increases ruminal NH₃-N concentration (Firkins et al., 2007). Thus, niacin might have been advantageous for the protozoan population, resulting in higher ammonia concentrations in the rumen.

Supplementation of 6 g NA did not lead to significant changes in molar proportions of major SCFA (acetic, propionic and butyric acid; Table 4), which is in accordance with several other studies (Riddell et al., 1980; Campbell et al., 1994; Madison-Anderson et al., 1997). However, trends or significant differences in molar proportions of acetate (Christensen et al., 1996), butyrate (Arambel et al., 1986; Doreau and Ottou, 1996; Christensen et al., 1996) or propionate (Arambel et al., 1986; Samanta et al., 2000a) have been found after niacin supplementation as well. No particular F:C ratio could be identified from these trials, where effects were always or never present.

But a trend for an interaction of niacin and concentrate on the molar proportion of propionic acid was observed in the present experiment (Table 4). Molar proportions increased with LC, but decreased with MC and HC ration after niacin supplementation. Influences on propionate reported in the literature have been inconsistent. Samanta et al. (2000a), without specifying the F:C ratio, observed increased molar percentages of propionate after niacin feeding. NA supplementation increased molar percentage of propionic acid also in a ration containing toasted soybean meal, but decreased it, when untoasted soybean meal was used (Arambel et al., 1986; F:C ratio 55:45). This finding was not explained by the authors.

The already mentioned stimulating effect of niacin on rumen protozoa may be a reason for the observed trend for an interaction in the present trial. Fauna has been shown

to decrease molar proportions of propionate and increase acetate and butyrate (Eugene et al., 2004), because protozoa produce only very little amounts of propionate. As higher concentrate levels are detrimental for protozoa (Eugene et al., 2004), a stimulatory effect of niacin on protozoa might have been more important under these conditions.

The decrease in total SCFA concentration in niacin supplemented groups was not expected (Table 4). Others observed a significant increase (Samanta et al., 2000a; Kumar and Dass, 2005) or no effects (Campbell et al., 1994; Christensen et al., 1996; Madison-Anderson et al., 1997) after NA or NAM feeding. However, Arambel et al. (1986) fed 55 % forage and found an interaction between niacin and type of soybean processing. Total SCFA concentration increased after niacin feeding in the ration containing toasted soybean meal, whereas it decreased significantly in the rumen of cattle fed untoasted soybean meal. Riddell et al. (1980) observed a significant reduction of SCFA in the NA supplemented groups 6 h after feeding, when a ration containing 50 % forage was fed. But this effect was not significant if the whole measured time span of 12 h is considered. No F:C ratio was apparent which either always or never caused effects in these studies. This is also consistent with the own observations, because no interaction with F:C ratio was observed in the present trial.

The present results concerning SCFA concentration do not seem to be explainable with a probable effect of niacin on protozoa, as a decrease in ruminal SCFA concentration is usually observed in defaunated animals (Eugene et al., 2004). However in sheep, faunated animals also were found to have lower SCFA concentrations (Santra et al., 2007). Another explanation may also be that niacin supplementation influenced digesta kinetics. Duodenal liquid dilution rates have been shown to be higher in niacin supplemented cattle (Arambel et al., 1986). Furthermore, although not significant, the turnover of rumen fluid in mL/min was higher in niacin fed sheep and cows (Schussler et al., 1978). Schaetzel and Johnson (1981) also assumed that niacin might alter ingestas kinetics. However, in another study, no influence was found (Christensen et al., 1996).

4.2 Nutrient Digestibility

Apparent ruminal digestibility of nutrients was not significantly influenced by niacin supplementation, except for OM (Table 5). In other experiments, apparent total tract digestibility was calculated and showed as well no effects of niacin feeding on NDF or ADF digestibility (Arambel et al., 1986; Erickson et al., 1992; Ottou et al., 1995). Also no effect of niacin on apparent ruminal OM digestibility was observed in other studies (Doreau and Ottou, 1996; Christensen et al., 1996; 40 to 60 % concentrate). This is in contrast to the own results, because apparent ruminal OM digestibility was decreased in niacin fed groups, even though differences were small in MC ration. But the observed decline matches well with lowered concentration of SCFA in the rumen during NA supplementation. This might also indicate faster passage of ruminal contents to the duodenum, thus leaving less time for degradation in the rumen. Furthermore, microbial OM is also

included in OM at the duodenum. Hence, the increase in microbial growth due to niacin supplementation might also contribute to the increase in OM arriving at the duodenum in supplemented groups. Differences between groups are no longer significant if the amount of FOM at the duodenum is considered, thus supporting this hypothesis.

4.3 Duodenal N flow and Microbial Protein Synthesis

N, NAN and microbial protein flow at the duodenum were higher in niacin supplemented groups at all F:C ratios (Table 6). But a trend for an interaction was observed for microbial protein, because differences were most pronounced with the HC, and negligible with the MC ration. In the HC diet, approximately 250 g more microbial protein was synthesized per day in niacin fed animals. An increase in microbial protein synthesis has been observed in other studies after niacin supplementation (Riddell et al., 1980; Samanta et al., 2000a; Kumar and Dass, 2005). However, no effect was detected in other experiments (Campbell et al., 1994; Doreau and Ottou, 1996; Christensen et al., 1996). From the studies cited, no F:C ratio is obvious in leading always to an effect after niacin supplementation. This does not match with the own results, because we observed a trend to an interaction between niacin and concentrate level. But diets applied in the studies had F:C ratios between 40:60 and 60:40, which is less than the HC ration in the present trial.

The observed higher microbial protein synthesis despite higher ruminal ammonia concentrations seems to be controversial in the own experiment. But Riddell et al. (1980) also observed increases in ammonia and bacterial protein concentrations in the rumen after niacin supplementation. As already mentioned, they attributed this to a stimulation of ureolytic activity.

It is stated several times in the literature that an increase in protozoal numbers is responsible for an increase in microbial protein production after niacin supplementation (Dennis et al., 1982; Samanta et al., 2000a). But usually faunation results in a lower microbial protein flow to the duodenum due to degradation of bacteria by protozoa and thus greater N-recycling inside the rumen (Eugene et al., 2004). Yet more recent research suggests that the relative amount of bacterial N consumed by protozoa could be less than previously thought, especially *in vivo* in dairy cows (Firkins et al., 2006). For example starch grains are quickly engulfed, fill protozoa and therefore limit bacterial predation (Hristov and Jouany, 2005). This might explain the interaction of concentrate level and niacin in our trial, because effects were most pronounced in HC ration (Table 6). Furthermore, as we hypothesized an increase in digesta passage after niacin supplementation in the present trial, this may also reduce the protozoal degradation of bacteria. But it was also suggested that an increase in the passage rate directly influences microbial protein synthesis instead of a mediated effect through less degradation of bacteria (Firkins et al., 2007). Apart from protozoa, other ruminal micro-organisms have niacin requirements as well. Ford et al. (1958) showed this for several

Lactobacillus and Streptococcus strains isolated from the rumen of sheep. Thus, the NA supplementation might have directly influenced the bacterial population of the rumen as well, with highest benefits in the HC ration.

NA supplementation increased the amount of RUP at the duodenum, although differences were only small with the MC ration (Table 6). This increase observed in niacin fed cows seems to be contradictory to increased ruminal ammonia concentration and increased microbial protein synthesis in the same animals. However, a trend for an increase in dietary N flow in niacin fed animals was also observed by Doreau and Ottou (1996), feeding a diet with 55 % forage. It seems that even though less dietary protein was degraded in the present trial, it was used more efficiently for microbial protein synthesis, as may also be concluded from results of Schaetzel and Johnson (1981). Even though they observed no direct effect of NA addition to fermenters, TCA precipitable N was 25 % higher in fermenters, where the inoculum came from a niacin adapted animal compared to those inoculated from a non -adapted donor. Furthermore, this augmentation occurred despite less substrate disappearance. This might indicate a shift in microbial population due to niacin towards micro - organisms, which utilise nitrogen more efficiently. If it occurs together with an assumed enhancement in ingesta passage and a stimulation of ureolytic activity, an increase in undegraded feed protein, ruminal ammonia concentration and microbial protein seems possible.

As can be seen from all measurements for microbial fermentation, niacin supplementation increases the efficiency of microbial protein production (Table 6) This was also concluded by others (Shields et al., 1983). Furthermore, an interaction between niacin supplementation and level of concentrate might exist as well. A trend for this interaction was found, if the efficiency was expressed on a MJ ME or g RDP basis, because differences were most distinct with the HC ration and only marginal with the MC ration. These results seem to be suggestive of the same direction as if microbial protein synthesis is considered alone, namely a shift in microbial population, perhaps associated with a change in ingesta flow. Additionally, information is lacking on how degraded vitamins are used by rumen microbes (Schwab et al., 2006).

4.4 Niacin Flow at the Duodenum

In discussing the effects on vitamin flow at the duodenum it has to be kept in mind that different methods for niacin analysis can lead to different results. Santschi et al. (2005c) compared different sampling sites in the rumen and different sample preparation treatments for ruminal fluid, and found an effect of both factors on the niacin concentration. Thus, different studies might not be completely comparable.

In the present study, total niacin flows at the duodenum ranged from 1,602 mg/d with LC – NA until 2,630 mg/d with HC + NA (Table 7). Some older surveys were carried out with calves (Zinn et al., 1987), steers (Miller et al., 1986) or cattle (Riddell et al., 1985) and resulted in lower values for duodenal niacin flow, ranging from 85 mg/d (Riddell et al., 1985) to 813 mg/d (Miller et al., 1986). More recent studies under-

taken with lactating dairy cows, as in the own experiment, reported higher values (Campbell et al., 1994; Santschi et al., 2005a; Schwab et al., 2006). In these studies, total niacin flow lay between 1,908 mg/d (Schwab et al., 2006) and 2,946 mg/d (Santschi et al., 2005a). Campbell et al. (1994) measured niacin concentrations in duodenal fluid, but named average daily duodenal DM flow and DM content. If niacin flows are calculated from these values, they varied between 1,716 mg/d and 4,902 mg/d in that trial. Hence the own values are low to middle range, compared with those previously found in dairy cows.

In the present experiment, total niacin and NA flow to the duodenum increased with increasing proportion of concentrate, but differences between MC and HC ration were small in unsupplemented groups (Table 7). For total niacin, this increase is consistent with results of Schwab et al. (2006). If the ration contained 35 % instead of 60 % forage, these authors observed an increased flow of niacin to the duodenum. In contrast, Miller et al. (1986) observed no differences in duodenal niacin flow between a diet containing either 30 % or 89 % corn. The kind of niacin compound, which is influenced by the ration seems to vary. In the present experiment, NA flow increased with higher concentrate proportions, whereas NAM was not influenced (Table 7). But in the experiment of Schwab et al. (2006), also NAM flow to the duodenum increased, whereas there was only a trend for enhanced NA flow in the low-forage ration.

Amounts of NA, NAM and thus total niacin at the duodenum rose with vitamin supplementation in all three levels of concentrate (Table 7). Numeric increase after vitamin supplementation was also observed in the work of Zinn et al. (1987). In other studies, the augmentations were significant (Riddell et al., 1985; Campbell et al., 1994). These results were confirmed in sheep as well (Kollenkirchen et al., 1992). But findings concerning NAM are controversial in the few studies differentiating between the vitamers NA and NAM. Campbell et al. (1994) did not detect NAM in duodenal fluid, which disagrees with the own results and those of Kollenkirchen et al. (1992). Santschi et al. (2005a) also stated, that NAM could be detected, if the whole duodenal content is taken.

In the present trial, the amounts of NAM reaching the duodenum were enhanced when supplemental NA was fed. Kollenkirchen et al. (1992) also observed an increase in duodenal NAM concentration after an intraruminal infusion of 2 mmol NA in sheep. Additionally, these authors described that 2 mmol supplemental NAM disappeared rapidly from the rumen. This finding was interpreted to result from hydrolysis of NAM to NA, which was also found elsewhere (Campbell et al., 1994). Furthermore, NAM also seems to disappear or be converted to NA, if it is given postruminally. In the work of Santschi et al. (2005a), abomasal infusion of NAM did not change the duodenal flow of NAM, but an increase was observed in the amount of NA reaching the small intestine. These authors concluded that the acidic environment in the abomasum leads to the conversion of NAM to NA. Thus, the amounts of NAM arriving at the duodenum obviously do not represent the total amount of NAM synthesized.

The apparent synthesis was calculated by subtracting the amount reaching the duodenum from the intake. No other surveys with a niacin supplementation to diets with different F:C ratios and calculation of apparent synthesis are known. But several studies exist where niacin was added to one ration. As found in the present trial, apparent niacin synthesis always became negative in these cases. Riddell et al. (1985) fed 6 g NA. Apparent synthesis was calculated by us, and resulted in -5,922 mg/d. Furthermore, if these calculations were also done for results of Zinn et al. (1987), where either 0, 200 or 2,000 mg niacin per d were supplemented for feedlot calves, apparent synthesis was 210 mg/d, -60 mg/d or -1,666 mg/d. Thus, substantial amounts of a supplementation disappeared before the duodenal cannula. There seems to be a specific rate of vitamin degradation (plus absorption) and a specific rate of microbial synthesis. There out a specific point and concentration exists where both processes compensate each other resulting in 0 net synthesis. Below this level, synthesis will occur and above it, niacin is degraded by bacteria (Hannah and Stern, 1985; Riddell et al., 1985). This is supported by the fact that even *in vitro*, net niacin synthesis was found to be negative if niacin was supplemented (Hannah and Stern, 1985).

Compared to LC ration, apparent synthesis of total niacin as well as of NA increases with higher proportions of concentrate in the diet in unsupplemented groups (Table 7). However, apparent synthesis was higher with the MC than with the HC diet, due to a lower intake with the MC ration and an intermediate flow at the duodenum. For cows receiving a supplementation, this was not observed since the HC ration had the least negative values. This may indicate that degradation of supplemental niacin is reduced at higher concentrate level.

The increase in apparent synthesis of total niacin and NA is not concordant with the work of Schwab et al. (2006), who observed an influence of the non fibre carbohydrate (NFC) content in the ration, whereas the F:C ratio only had an effect on the amount reaching the duodenum, and not on apparent synthesis. But niacin intake differed largely between different NFC contents in that study, which obviously had an impact on apparent synthesis. However, higher concentrate proportions are also associated with higher NFC content in the own trial, as diets were not formulated to be equal in NFC content but different in F:C ratio. Thus, a differentiation between NFC and F:C ratio effects is not possible from the own study. Miller et al. (1986) compared either 11 % alfalfa meal and 89 % corn grain or 70 % alfalfa meal and 30 % corn grain in rations of steers. These authors concluded as well that apparent synthesis was not influenced by the level of concentrate. Yet values for the ration containing only 11 % alfalfa meal were numerically higher than for the low – concentrate diet (485 mg/d vs. 439 mg/d). But more information is lacking. No other studies using different F:C ratios and measuring duodenal niacin flow exist. Also the mechanisms behind the stimulatory effects on synthesis or inhibitory effects on degradation are completely unknown, irrespective if the reasons are different NFC contents or F:C ratios.

5 Conclusions

Feeding 6 g supplemental NA caused an increase in ammonia concentration in the rumen, whereas total SCFA concentration decreased. Furthermore, molar proportions of some minor SCFA were influenced as well. It is suggested that this might be due to a positive effect of niacin on protozoa, other shifts in microbial population or changes in ingesta passage. But further research is needed to prove this theory.

There was a distinct effect on N flow at the duodenum towards more microbial protein in niacin supplemented groups, either expressed in g/d, g/MJ ME or g/g RDP. But a trend for an interaction was found between niacin and F:C ratio, because the increase in microbial protein synthesis and efficiency was highest with the HC ration and least with the MC diet. Thus, it seems that a niacin supplementation is more advantageous for microbial populations in rations containing high levels of concentrate.

The vitamin flow at the duodenum was also influenced by F:C ratio and niacin supplementation, towards increasing niacin flows with higher proportions of concentrate and in supplemented groups. However, apparent synthesis of niacin in unsupplemented groups was highest with the MC ration. From the present experiment, it can thus be concluded that synthesis of niacin is less in rations containing a high proportion of forage, but mechanisms are unknown and further research is needed. Furthermore, apparent synthesis of niacin becomes negative if NA is supplemented. Depending on the ration fed, 88 % to 94 % of the amount added did not reach the duodenum. This indicates degradation in the rumen or absorption before the duodenal cannula. But the contribution of either factor to the disappearance of supplemental niacin is unknown as well. Hence, also in this area further research is needed and it would be interesting to compare the NA used in the present study with a rumen-protected NA with different F:C ratios in future studies.

Acknowledgements

The assistance of the co-workers of the Institute of Animal Nutrition and the experimental station of the Friedrich-Loeffler-Institute, Braunschweig, Germany in performing the experiment and the analysis is gratefully acknowledged.

References

- Anonymous (1998) DIN 38406-E5-2. In: Wasserchemische Gesellschaft (ed) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. 40. Lieferung. Weinheim: Wiley-VCH ; Berlin: Beuth
- Arambel MJ, Bartley EE, Dennis SM, Riddell DO, Camac JL, Higginbotham JF, Simons GG, Dayton AD (1986) Effect of toasted soybean meal with or without niacin on rumen fermentation, passage rate of duodenal digesta and digestibility of nutrients. Nutr Rep Int 34(6):1011-1020
- Bender DA (1992) Niacin. In: Bender DA (ed) Nutritional biochemistry of the vitamins. Cambridge: Cambridge University Press, pp 185-222
- Brandt M, Rohr K (1981) Beiträge zur Quantifizierung der N-Umsetzung in den Vormägen von Milchkühen : 1, Bestimmung des Mikrobenstickstoffs im

- Duodenalchymus mit Hilfe von N15. Z Tierphysiol Tierernähr Futtermit-
telkd 46:39-48
- Campbell JM, Murphy MR, Christensen RA, Overton TR (1994) Kinetics of niacin supplements in lactating dairy cows. J Dairy Sci 77(2):566-575
- Christensen RA, Overton TR, Clark JH, Drackley JK, Nelson DR, Blum SA (1996) Effects of dietary fat with or without nicotinic acid on nutrient flow to the duodenum of dairy cows. J Dairy Sci 79(8):1410-1424
- Dennis SM, Arambel MJ, Bartley EE, Riddell DO, Dayton AD (1982) Effect of heated or unheated soybean meal with or without niacin on rumen protozoa. J Dairy Sci 65(8):1643-1646
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (1997) DLG-Futterwerttabellen Wieder-
küter. 7. Auflage. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 212 p, ISBN 3-7690-0547-3
- Doreau M, Ottou JF (1996) Influence of niacin supplementation on in vivo digest-
ibility and ruminal digestion in dairy cows. J Dairy Sci 79(12):2247-2254
- Erickson PS, Murphy MR, Clark JH (1992) Supplementation of dairy cow diets
with calcium salts of long-chain fatty acids and nicotinic acid in early lactation. J Dairy Sci 75(4):1078-1089
- Erickson PS, Trusk AM, Murphy MR (1990) Effects of niacin source on epi-ne-
phrine stimulation of plasma nonesterified fatty acids and glucose con-
centrations, on diet digestibility and on rumen protozoal numbers in lac-
tating dairy cows. J Nutr 120(12):1648-1653
- Eugène M, Archimède H, Sauvant D (2004) Quantitative meta-analysis on the
effects of defaunation of the rumen on growth, intake and digestion in
ruminants. Livest Prod Sci 85(1):81-97
- Firkins JL, Hristov AN, Hall MB, Varga GA, St-Pierre NR (2006) Integration of ru-
minal metabolism in dairy cattle. J Dairy Sci 89(Suppl. 1):E31-51
- Firkins JL, Yu Z, Morrison M (2007) Ruminal nitrogen metabolism: Perspectives
for integration of microbiology and nutrition for dairy. J Dairy Sci 90(Sup-
pl. 1):E1-16
- Ford JE, Penny KD, Briggs CAE (1958) Nutrition of lactic acid bacteria isolated
from the rumen. J Gen Microbiol 18(1):273-284
- Geissler C, Hoffmann M, Hickel B (1976) Ein Beitrag zur gaschromatischen Be-
stimmung flüchtiger Fettsäuren. Arch Anim Nutr 26:123-129
- GfE-Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (2001) Empfehlungen zur Ener-
gie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchtrinder. Frank-
furt am Main: DLG-Verlag, 136 p,
ISBN 3-7690-0591-0
- GfE-Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (1991) Leitlinien für die Bestim-
mung der Verdaulichkeit von Rohnährstoffen an Wiederkäuern. J Anim
Physiol Anim Nutr 65(1-5):229-234
- Goering HK, Soest PJ van (1970) Forage fiber analyses: Apparatus, reagents,
procedures and some applications. Washington DC: Agricultural Re-
search Service, USDA, 20 p, Agric Handbook 379
- Hannah SM, Stern MD (1985) Effect of supplemental niacin or niacinamide
and soybean source on ruminal bacterial fermentation in continuous cul-
ture. J Anim Sci 61(5):1253-1263
- Horner JL, Coppock CE, Moya JR, Labore JM, Lanham JK (1988) Effects of ni-
acin and whole cottonseed on ruminal fermentation, protein degradability,
and nutrient digestibility. J Dairy Sci 71(5):1239-1247
- Hristov AN, Jouany JP (2005) Factors affecting the efficiency of nitrogen utili-
zation in the rumen. In: Pfeffer E, Hristov AN (eds) Nitrogen and phosphorus
nutrition of cattle. Wallingford : CAB International, pp 117-166
- Kollenkirchen U, Kuhnligk C, Breves G, Harmeyer J (1992) Effect of niacin sup-
plementation on the concentration of niacin in rumen and duodenal di-
gesta and in whole blood of sheep. Zentralbl Vet Med A 39(9):696-703
- Kumar R, Dass RS (2005) Effect of niacin supplementation on rumen metabolites in
Murrah Buffaloes (*Bubalus bubalis*). Asian-Australas J Anim Sci 18(1):38-41
- Lebzien P, Paul C (1997) Use of near infrared reflectance spectroscopy for the
estimation of the microbial portion of non-ammonia-nitrogen in the du-
odenum of dairy cows. Anim Feed Sci Tech 68:225-233
- Lebzien P, Voigt J (1999) Calculation of utilizable crude protein at the duode-
num of cattle by two different approaches. Arch Anim Nutr 52(4):363-369
- Madison-Anderson RJ, Schingoethe DJ, Brouk MJ, Baer RJ, Lentsch MR (1997)
Response of lactating cows to supplemental unsaturated fat and niacin. J
Dairy Sci 80(7):1329-1338
- Miller BL, Meiske JC, Goodrich RD (1986) Effects of grain source and concen-
trate level on B-vitamin production and absorption in steers. J Anim Sci.
62(2):473-483
- Moorby JM, Dewhurst RJ, Evans RT, Danelon JL (2006) Effects of dairy cow
diet forage proportion on duodenal nutrient supply and urinary purine
derivative excretion. J Dairy Sci 89(9):3552-3562
- Naumann C, Bassler R (1976) Die chemische Untersuchung von Futtermitteln.
Methodenbuch. Bd. 3 mit Ergänzungslieferungen 1983, 1988, 1993, 1997
2004 und 2006. Darmstadt: VDLUFA-Verlag
- NRC (2001) Vitamins. In: National Research Council (ed) Nutrient Require-
ments of dairy cattle. Washington D.C : National Academy Press, pp 162-
177, ISBN 0-309-06997-1
- Ottou JF, Doreau M, Chilliard Y (1995) Duodenal rapeseed oil infusion in mid-
lactation cows. 6. Interaction with niacin on dairy performance and nutri-
tional balances. J Dairy Sci 78(6):1345-1352
- Riddell DO, Bartley EE, Arambel MJ, Nagaraja TG, Dayton AD, Miller GW (1985)
Effect of niacin supplementation on ruminal niacin synthesis and degra-
dation in cattle. Nutr Rep Int 31(2):407-413
- Riddell DO, Bartley EE, Dayton AD (1980) Effect of nicotinic acid on rumen fer-
mentation in vitro and in vivo. J Dairy Sci 63(9):1429-1436
- Riemeier A (2004) Einfluss der ruminalen Stickstoffbilanz (RNB) auf die Pan-
senfermentation, mikrobielle Proteinsynthese, Menge des am Dünndarm
anflutenden nutzbaren Proteins (nXP) sowie die Stickstoffausscheidung.
Hannover, 158 p, Hannover, Tierärztliche Hochschule, Diss
- Rohr K, Brandt M, Lebzien P, Schafft H (1984) Measurement of duodenal flow
in dairy cows by either total collection or spot sampling, using a special
cannula. Can J Anim Sci 64(5):116-117
- Samanta AK, Kewalramani N, Kaur H (2000a) Effect of niacin supplementation
on VFA production and microbial protein synthesis in cattle. Indian J
Dairy Sci 53(2):150-153
- Samanta AK, Kewalramani N, Kaur H (2000b) Influence of niacin supplemen-
tation on in vitro rumen fermentation in cattle. Indian J Anim Nutr
17(3):243-245
- Santra A, Karim SA, Chaturvedi OH (2007) Rumen enzyme profile and fermenta-
tion characteristics in sheep as affected by treatment with sodium lau-
ryl sulfate as defaunating agent and presence of ciliate protozoa. Small
Rumin Res 67(2-3):126-137
- Santschi DE, Berthiaume R, Matte JJ, Mustafa AF, Girard CL (2005a) Fate of
supplementary B-vitamins in the gastrointestinal tract of dairy cows. J
Dairy Sci 88(6):2043-2054
- Santschi DE, Chiquette J, Berthiaume R, Martineau R, Matte JJ, Mustafa AF, Gi-
rard CL (2005b) Effects of the forage to concentrate ratio on B-vitamin
concen-trations in different ruminal fractions of dairy cows. Can J Anim
Sci 85(3):389-399
- Santschi DE, Chiquette J, Berthiaume R, Matte JJ, Mustafa AF, Girard CL (2005c) Ef-
fects of methods of collection and sample preparation on the concentration
of B-vitamins in ruminal fluid of dairy cows. Can J Anim Sci 85(3):417-420
- Schaetzel WP, Johnson DE (1981) Nicotinic acid and dilution rate effects on in
vitro fermentation efficiency. J Anim Sci 53(4):1104-1108
- Schafft H (1983) Untersuchungen zur Quantifizierung des Abbaus von Futter-
rohrprotein in den Vormägen von Milchkühen. Göttingen, 132 p, Göttin-
gen, Universität, Diss
- Schussler SL, Fahey GC, Robinson JB, Masters SS, Loerch SC, Spears JW (1978)
The effect of supplemental niacin on in vitro cellulose digestion and pro-
tein synthesis. Int J Vitam Nutr Res 48(4):359-367
- Schwab EC, Schwab GC, Shaver RD, Girard CL, Putnam DE, Whitehouse NL
(2006) Dietary forage and nonfibre carbohydrate contents influence B-vi-
tamin intake, duodenal flow, and apparent ruminal synthesis in lactating
dairy cows. J Dairy Sci 89(1):174-187
- Shields DR, Schaefer DM, Perry W (1983) Influence of niacin supplementation
and nitrogen source on rumen microbial fermentation. J Anim Sci
57(6):1576-1583
- Williams CH, David DJ, Lismaa O (1962) The determination of chromic oxide in
faeces samples by atomic absorbtion spectrophotometry. J Agric Sci
59(3):381-385
- Yang WZ, Beauchemin KA, Rode LM (2001) Effects of grain processing, forage
to concentrate ratio, and forage particle size on rumen pH and digestion
by dairy cows. J Dairy Sci 84(10):2203-2216
- Zinn RA, Owens FN, Stuart RL, Dunbar JR, Norman BB (1987) B-vitamin sup-
plementation of diets for feedlot calves. J Anim Sci 65(1):267-277

Einfluss von Drosselventilquerschnittfläche und Durchflussmenge auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze bei viertelgetrennten Melksystemen

Sandra Rose-Meierhöfer*, Ulrich Ströbel*, Andy Bauermeister*, Christin Jaroszynski*, Christian Ammon* und Reiner Brunsch*

Zusammenfassung

Um den Melkprozess in Zukunft schonend und trotzdem zügig gestalten zu können, ist es sinnvoll, das Melkvakuum an jedem Euterviertel individuell zu steuern. Ziel dieser Studie war es zu ermitteln, wie im Detail die Öffnungsquerschnittfläche und die Durchflussrate im Milchschauch einen Einfluss auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze in der Vakuum- und Druckphase der Pulsation (b- und d-Phase) haben und wie die Verhältnisse sich unter Nutzung eines eigens entwickelten Vakuumdrosselventils (VDV) im Detail verändern. Es wurden verschiedene Öffnungsquerschnittsflächen und Durchflussraten im Melksystem MultiLactor® (IMPULSA AG, Deutschland) simuliert und das Vakuum mit Hilfe des Messgerätes MilkoTest MT52 erfasst. Festgestellt wurde, dass sowohl die Öffnungsquerschnittsfläche als auch die Durchflussrate die Vakuumhöhe beeinflussen. Das Vakuum an der Zitzen spitze senkt sich sowohl bei einer verringerten Öffnungsquerschnittsfläche als auch bei einer erhöhten Durchflussrate. Bei konstantem Durchfluss und bei Verminderung der Öffnungsquerschnittsfläche sinkt das Vakuum an der Zitzen spitze signifikant. Je höher die Durchflussrate wird, desto größer ist auch die Absenkung des Vakuums bei gleichbleibender Öffnungsquerschnittsfläche. Durch den Einsatz des VDV kann die Vakuumhöhe an der Zitzen spitze somit aktiv und viertelindividuell dem vorkommenden Durchfluss angepasst werden.

Schlüsselwörter: Vakuumsteuerungssystem, Vakuumabfall, Vakuumschwankung, Durchflussmenge, Zitzen spitze

Abstract

Effects of cross-sectional area in a vacuum control valve and flow rate on the teat-end vacuum in individual quarter milking systems

For providing a more sensitive and fast milking process in the future, it is useful to control the teat-end vacuum individually at each udder quarter. The aim of this study was to determine whether the cross-sectional area and the flow rate in the milk tube has an influence on the milking vacuum at the teat end in b- and d-phase (vacuum- and pressure-phase) in the milking process. With a developed vacuum control valve (VDV), different cross-sectional-areas and flow rates were simulated in the milking system MultiLactor® (IMPULSA AG, Germany) and vacuum were recorded with the help of MT52 vacuum recording device. It was found a significant effect of the cross-sectional area as well as of the flow rate, on the teat-end vacuum level. The teat-end vacuum was decreased by decreasing of the cross-sectional-area, when the liquid flow was increasing. During a decrease of the cross-sectional-area with a constant flow rate, the vacuum at the teat-end shows a significant decrease. The higher the flow rate, the higher is the vacuum reduction at a constant cross-sectional area. By using the VDV, the teat-end vacuum height can be adapted active and quarter individually in respect to the liquid flow rate.

Keywords: vacuum control system, vacuum reduction, vacuum fluctuations, milk flow, teat end

* Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Technik in der Tierhaltung, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

Kontakt: ustroebel@atb-potsdam.de

1 Einleitung

Die Weiterentwicklung der Melktechnik ist Grundvoraussetzung, um die Anforderungen der Konsumenten zu erfüllen und um die Belastung für das Tier zu minimieren (Rose, 2006). Viele Studien dienen dazu, den Melkvorgang zu verbessern und vor allem das Wohlergehen der Tiere zu steigern. Gleichzeitig werden höchste Anforderungen an die Milchqualität gestellt. Moderne viertelindividuelle Melksysteme können die Bedingungen für Melker und Kühe verbessern (Ströbel et al., 2012). Während in konventionellen Melksystemen die ermolkene Milch aus den vier Eutervierteln beim Melken bereits hinter den Zitzenbechern über ein Sammelstück zusammengeführt wird, ermöglichen viertelindividuelle Melksysteme eine separate Ableitung der Milch aus vier einzelnen Eutervierteln über vier Einzelschläuche (Ströbel et al., 2012). Aufgrund dieser Technik kann die optimierte Anpassung des Melkvakuums pro Euterviertel technisch wesentlich leichter erfolgen, als dies in konventionellen Melksystemen möglich gewesen wäre. Daher wurden Versuche zur Auswirkung der Querschnittsflächenöffnung auf das zitzenendige Vakuum im jeweiligen Milchschauch durchgeführt, um die Grundlagen für die Entwicklung einer automatischen, viertelindividuellen Vakuumregelung messen zu können.

Um die Tiergesundheit und im speziellen die Eutergerundheit zu gewährleisten und zu verbessern, ist eine genaue Betrachtung des zitzenendigen Melkvakuums nötig, wobei für letzteres kein optimaler Wert bekannt ist. Rasmussen et al. (2006) kamen zu der Beobachtung, dass große Vakuumsschwankungen und instabiles Vakuum bei konventionellen Melksystemen mit langen Milchschnüren häufig vorkommen. Weiter zeigten Hamann et al. (2001), dass das Melken mit Überdrucksystem in der Druckphase (d-Phase) zu signifikant kleineren Zitzen spitzen durchmessern nach dem Melken, im Vergleich zur Melkung mit einem konventionellen Melksystem, führt. Dies wird durch andere Untersuchungen bestätigt, welche angeben, dass ein durchschnittlich hohes Melkvakuum die Melkdauer zwar verkürzt, aber für eine wesentlich längere Öffnung der Strichkanäle an der Zitze sorgt, was zu einer hohen Belastung der Zitzen spitzen führt und das Eintrittsrisiko von Keimen erhöht (Reinemann et al., 2001). Ein Beispiel für unerwünschte Veränderungen der Zitzen spitzen sind Hyperkeratosen. Diese behindern die Abwehrreaktionen der Zitze bei Erregerbefall. In den beschädigten Zitzen spitzen bei vorhandenen Hyperkeratosen wurde ein erhöhter bakterieller Befall nachgewiesen (Michel et al., 1974; Kemper-Krämer, 1983; Graf und Gedek, 1983). Eine signifikante Korrelation zwischen Hyperkeratosen und Mastitis Infektionen konnte von den zuvor genannten Autoren jedoch nicht nachgewiesen werden. In einer Studie von Neijenhuis et al. (2001) wurde hingegen eine Korrelation zwischen beschädigten Zitzen spitzen und klinischer Mastitis festgestellt. Eine schonende Behandlung der Zitzen spitzen und eine exaktere Vakuumseinstellung an dieser Stelle im Melksystem erscheinen deshalb als sinnvoller Entwicklungsbedarf.

Das Melksystem MultiLactor® (Siliconform GmbH und IMPULSA AG, Deutschland) schließt die Marktlücke zwischen

konventionellem Melksystem mit Sammelstück und automatischem Melksystem, indem es die aus automatischen Melksystemen bekannte viertelgetrennte Milchableitung auch in konventionellen Melkanlagen ermöglicht (Rose-Meierhöfer et al., 2010) und indem es sammelstücklos für eine gleichmäßige Kräfteverteilung der Gewichts- und Zugkräfte der Melkbecher am Kuheuter sorgt (Rose, 2006). Die Melkbecher des MultiLactors® sind dabei mit Lufteinlassventilen für periodischen Lufteinlass, den BioMilker®-Ventilen, ausgestattet. Diese Ventile sorgen in der Entlastungsphase der Pulsation für einen gezielten periodischen Lufteinlass unter der Zitzen spitze. Die BioMilker®-Technologie sorgt für eine Verringerung der Strömungs- und Vakuumverluste in der Sauphase um bis zu 70 % im Vergleich zu konventionellen Melkzeugen (Guler, 2006). Das Betriebsvakuum von Melksystemen mit BioMilker®-Ventilen kann somit zwischen 36 und 42 kPa oder sogar noch niedriger eingestellt werden (Guler, 2006).

Durch die Ermittlung des Einflusses der Querschnittsfläche des Vakuumdrosselventils (VDV) und des Durchflusses auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze, können mögliche Aussagen darüber getroffen werden, welche Vakuumseinstellungen ausreichend sind, um die Milch so schonend wie möglich zu gewinnen, ohne mit einer relevanten Erhöhung der Melkdauer rechnen zu müssen. Weiterhin bilden die in dieser Studie gewonnenen Daten die Grundlage zur Konstruktion eines Online-Vakuumregelungssystems. Aufgrund des vorhandenen Vorwissens zur Entstehung von Euterkrankungen kann vermutet werden, dass die Etablierung des Vakuumregelungssystems dazu beiträgt, die Belastung des Euter gewebes deutlich zu minimieren. Im Rahmen dieser Studie wurde deshalb die folgende Hypothese formuliert:

- Die exakte Kenntnis der Werte von Öffnungsquerschnitt, Vakuumhöhe an der Zitzen spitze und Durchfluss im Versuchsmelksystem ermöglicht eine exaktere Einstellung des zitzenendigen Melkvakuums in diesem System

2 Material und Methoden

Die vorliegenden Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses von Querschnittsfläche und Durchfluss auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze wurden am Labormelkstand des Leibniz-Institutes für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) durchgeführt.

Der Labormelkstand am ATB ist ein Fischgrätenmelk stand 33° mit 2 x 3 Plätzen. Dieser ist unter anderem mit dem viertelgetrennten Melksystem MultiLactor® (Siliconform GmbH und IMPULSA AG, Deutschland) ausgestattet (Abbildung 1).

In den MultiLactor® wurden vier Vakuumdrosselventile (VDV) eingebaut, welche die Querschnittsflächen im Inneren des Milchschauchs zwischen 35,0 mm² und 0,00 mm² verändern können. Die vollständige Vakuumregeleinheit bestand aus vier Sensoren, die eine Schätzung der Durchflussmenge ermöglichen, aus einer Computerschnittstelle und aus vier Aktoren (VDV). Beim VDV handelt es sich um ein Drosselventil, das es ermöglicht, die Öffnungsquerschnittsfläche in

jedem viertelindividuellen Milchschauch mit Hilfe eines elektrischen Schrittmotors individuell einzustellen. Es ist ein Prototyp, der im Verlauf von vorangegangen Versuchsreihen entwickelt, hergestellt und optimiert wurde.

Zur Erfassung der Messwerte wurde das Messsystem MilkoTest MT52 (System Happel GmbH, Friesenried, Deutschland) genutzt. Dieses misst mit Hilfe von vier Drucksensoren das Vakuum an vier Stellen im Melksystem: an der Zitzen spitze einer Kunstzitze nach DIN ISO 6690 (2007), im Puls schlauch, am Drosselventilgehäuse und am Messpunkt des Betriebsvakuums. Die Messpunkte wurden von den Autoren festgelegt.

Zur Simulation des Durchflusses wurde die Nassmess methode nach DIN ISO 6690 (2007) angewendet, wobei die Kuh durch einen Versuchsaufbau aus vier ISO Kunstzitzen (DIN ISO 6690, 2007), einem Wasserbehälter und vier Durch flussreglern ersetzt wurde. Als Testflüssigkeit wurde Wasser verwendet. Die Durchflussregler simulierten die vier Euter viertel einer Kuh. Es ist möglich, stufenlos Durchflüsse von 0,0 l/min/Viertel bis 2,0 l/min/Viertel bei einer Messgenauig keit von $\pm 2\%$ einzustellen. Um die Ermittlung des Einflusses von Durchflussrate und Querschnittfläche auf das Melkva kuum an der Zitzen spitze mit den benannten Bestandteilen des Versuchsaufbaus durchzuführen, wurden 14 verschie dene Durchflussraten von 0,0 l/min/Euter bis 6,5 l/min/Euter betrachtet. Bei jeder dieser Durchflussraten wurden 33 mit dem VDV einstellbare Öffnungsquerschnitte zwischen 35,0 mm² und 0,00 mm² Öffnungsquerschnittsfäche untersucht. Damit wurden 476 kombinierte Einstellungen untersucht. Zu jeder Einstellung wurden acht Wiederholungen vorgenommen.

Zur Berechnung der Öffnungsfläche am VDV in Korrela tion zu den Öffnungswegen (siehe Abbildung 2 – Stellung

des Ventilstöbels) wurden die in der Betriebsanweisung der Vaku umregeleinheit der IMPULSA AG (Anonymus, 2010) ge nannte Wertetabelle zu Öffnungsweg und -fläche verwen det. Der Zusammenhang zwischen Öffnungsweg (x) und der Öffnungsquerschnittsfäche (y) am VDV kann mit folgender Regressionsgleichung beschrieben werden:

$$y = 18,0249x - 0,5675x^2$$

Am elektronischen Steuerungsterminal der VDVs kann tech nisch derzeit nur die Höhe des Ventilstöbels eingestellt wer den, der die Öffnungsquerschnittsfäche des Milchschauchs stu fenlos verändert (Abbildung 2). Für jede mögliche Höhen einstellung des Ventilstöbels kann mit der oben genannten Gleichung die entsprechende Öffnungsquerschnittsfäche berechnet werden.

Für die statistische Auswertung der Einflussgrößen Quer schnittsfäche Q und Durchflussrate F auf das Vakuum an der Zitzen spitze wurde ein zweifaktorielles Varianzanalyse modell mit Wechselwirkungen gewählt:

$$y_{ijk} = \mu + Q_i + F_j + (Q \times F)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

mit

- y_{ijk} beobachtetes Vakuum an der Zitzen spitze bei Quer schnitt i , Durchflussrate j und Wiederholung k ($k = 1, \dots, 8$),
- μ mittleres Vakuum an der Zitzen spitze,
- Q_i Effekt des i -ten Querschnitts Q ($i = 1, \dots, 33$),
- F_j Effekt der j -ten Durchflussrate F ($j = 1, \dots, 7$),
- $(Q \times F)_{ij}$ Effekt der Wechselwirkung zwischen Querschnitt i und Durchflussrate j ,
- ε_{ijk} Residuum.

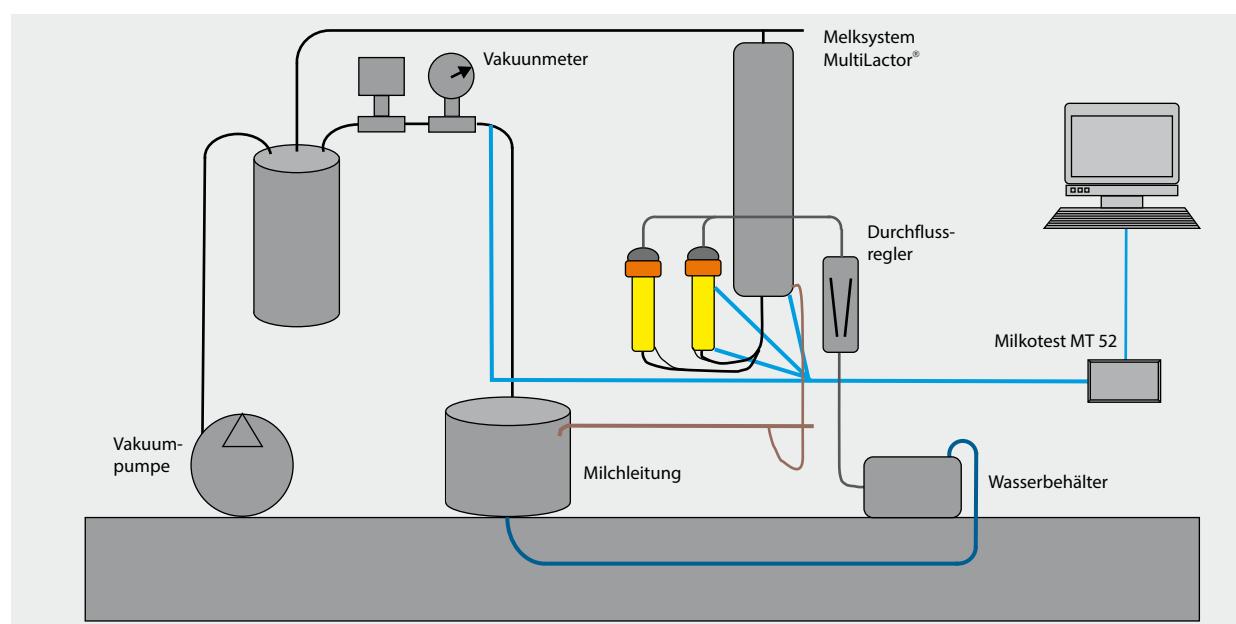


Abbildung 1

Schematischer Aufbau des Versuchsmelkstands (geändert nach Rose, 2006)

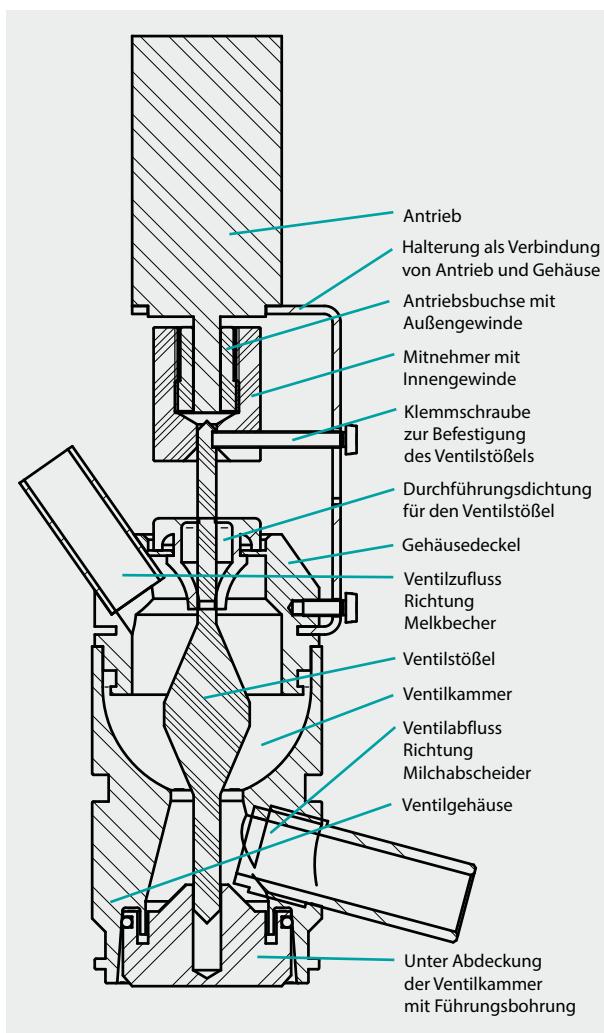


Abbildung 2
Vakuumdrosselventil (VDV) mit Antrieb (geändert nach Ströbel et al., 2011)

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Auswirkung der Querschnittverringerung auf das Vakuum

Ein Einfluss von Querschnittsfläche und Durchflussrate auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze konnte mit dieser Studie nachgewiesen werden. Auch die Hypothese dieser Studie konnte mit der Messung bestätigt werden. Eine exaktere Einstellung des zitzenendigen Melkvakuums und mehr Einstellungsmöglichkeiten durch Nutzung des VDV konnten belegt werden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass mit Verringerung der Querschnittsfläche das Vakuum an der Zitzen spitze gesenkt wird ($P < 0,0001$). Die Abbildungen 3 und 4 zeigen dies im direkten Vergleich zwischen sich verringernden Querschnitten in der b- und d-Phase des Melkprozesses.

Schon Worstorff (1977) hat in seiner Arbeit den Einfluss der Öffnungsquerschnittsfläche im Milchschlauch auf das Vakuum beschrieben, indem er feststellte, dass bei einer Vergrößerung der genannten Fläche auch das Vakuum ange-

hoben wird. Auch Rose (2006) stellt fest, dass die Öffnungsquerschnittsfläche im Milchschlauch bei viertelindividuell geführten Melksystemen einen Einfluss auf das Vakuum an der Zitzen spitze hat. Je größer die Öffnungsquerschnittsfläche ist, desto mehr nehmen auch Vakumschwankungen ab. Demnach ist zu schlussfolgern, dass das Vakuum an der Zitzen spitze höher sein muss, je größer die Öffnungsquerschnittsfläche ist. Auch die Autoren Ströbel et al. (2011) haben in einem Patent dargestellt, dass eine Reduzierung der Querschnittsfläche eine Vakuumabsenkung zur Folge hat.

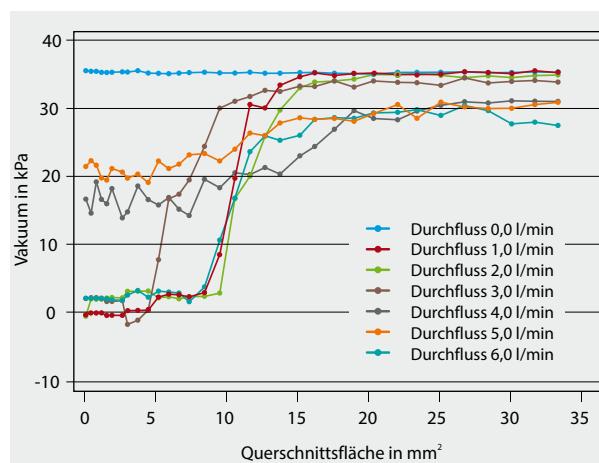


Abbildung 3
An der Zitzen spitze gemessene Vakuumwerte ausgewählter Durchflussraten und Ventileinstellungen in der Vakuumphase (b-Phase)

Die Effekte einer Vakuumabsenkung traten in der vorliegenden Studie beim Durchfluss 0,0 l/min/Euter nur sehr gering auf. Die Annahme, dass das Vakuum mit geschlossenen VDV bei 0,0 kPa liegt, konnte nicht nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass das VDV nicht komplett zu schließen scheint. Ungünstig gewählte Materialien könnten der Grund dafür sein, dass trotz geschlossenem VDV eine Lücke im Öffnungsquerschnitt bleibt, durch die das Betriebsvakuum grundsätzlich mit teilweise verminderter Stärke zur Zitze durchdringen kann.

3.2 Einfluss der Durchflussrate auf das Vakuum

Die Messwerte des Versuches zeigen, dass die Durchflussrate einen Einfluss auf das Vakuum hat ($P < 0,0001$). Der Einfluss verändert sich abhängig von der Querschnittsfläche, d. h. es gibt signifikante Wechselwirkungen ($P < 0,0001$). Je größer der Durchfluss ist, desto geringer ist tendenziell die Vakuumhöhe an der Zitzen spitze.

Je höher die Durchflussrate wird, desto größer ist die Absenkung des Vakuums bei gleichbleibender Öffnungsquerschnittsfläche. Die Ergebnisse zeigen auch, dass bei konstantem Durchfluss und bei Verminderung der Öffnungsquerschnittsfläche das Vakuum an der Zitzen spitze sinkt.

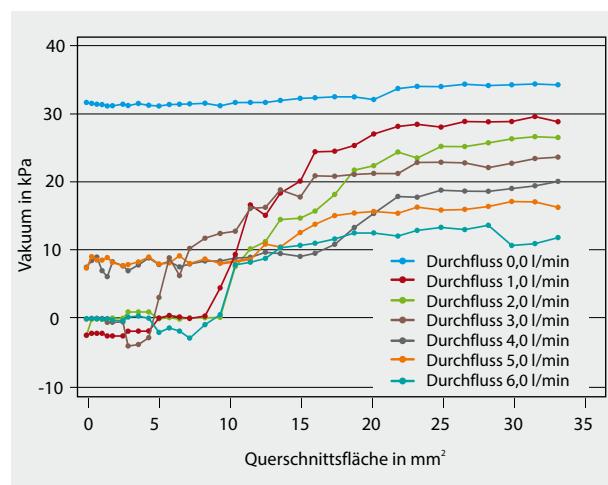


Abbildung 4
An der Zitzen spitze gemessene Vakuumwerte ausgewählter Durchflussraten und Ventileinstellungen in der Druckphase (d-Phase)

Die gemessenen Vakuumwerte unterscheiden sich bei Durchflussraten von 0,0 l/min/Euter und 6,5 l/min/Euter in der b-Phase um 5 kPa und in der d-Phase um 24,1 kPa. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Vakuum nicht mehr ungehindert in voller Höhe von 35 kPa bis zur Zitze wirken kann, je höher die Milchmenge im Milchschlauch ist. Es wurde bereits von Worstorff (1977) festgestellt, dass bei einem steigenden Flüssigkeitsdurchsatz von 0,0 l/min/Euter auf 5,0 l/min/Euter eine durchschnittliche Vakuumabsenkung von 4 kPa bei niedrig verlegten Milchleitungen, und bis zu 10 kPa bei hoch verlegten Milchleitungen auftritt. Einen hohen Vakuumabfall von bis zu 10 kPa bei höheren Durchflüssen beschreibt auch Schlaiß (1994). Rose (2006) untermauerte dies, indem sie erkannte, dass das mittlere Vakuum unter der Zitze mit steigendem Durchfluss abnimmt. Sie ermittelte einen Vakuumabfall von bis zu 12 kPa. Auch Öz et al. (2010) bestätigen, dass bei steigendem Durchfluss das Vakuum an der Zitzen spitze gesenkt wird. Die Autoren ermittelten bei zunehmender Durchflussrate Vakuumabfälle von bis zu 6,5 kPa in der b- und 27 kPa in der d-Phase.

Werden nur die Werte der vorliegenden Studie bei unterschiedlichen Öffnungsquerschnitten verglichen, dann bestätigt sich, dass der Vakuumabfall bei kleinen Öffnungsquerschnittsflächen, besonders in der d-Phase, etwas größer ist als bei großen Öffnungsquerschnittsflächen. Grundsätzlich steigt bei steigendem Durchfluss auch der Vakuumabfall an.

3.3 Auswirkung der Ergebnisse auf die Zitze und den Melkprozess

Nach Betrachtung der Einstellmöglichkeiten die sich durch die Nutzung von VDV ergibt wird klar, dass drei bis fünf fixe mögliche Einstellungen am VDV für eine wesentlich exaktere Einstellung des Vakuums an der Zitzen spitze sorgen könnten. Bei Milchflüssen über 3,5 l/min/Euter ist das volle Betriebsvakuum von 35 kPa wünschenswert und demnach eine

VDV-Einstellung von mindestens 35 mm² Öffnungsquerschnittsfläche einzustellen. Die große Menge an Flüssigkeit im System bei dieser VDV-Einstellung muss schnell genug abtransportiert werden, um einem zu großen Vakuumabfall entgegenzuwirken. Bei Milchflüssen zwischen 3,5 l/min/Euter und 2,0 l/min/Euter sollte ein Vakuum von rund 25 kPa ausreichend sein. Dieser Wert wird bei VDV-Öffnungsquerschnittsflächen von 9,22 mm² bis 13,07 mm² erreicht. Dieser Vakuumwert muss jedoch weiter in einem Praxisversuch verifiziert werden. Bei Milchflüssen unter 2,0 l/min/Euter wird ein Vakuum von kleiner 20 kPa erreicht. Auch die Sinnhaftigkeit dieser Einstellung muss noch in geeigneten Praxisversuchen getestet werden. Das Vakuum sollte nicht unter 10 bis 15 kPa sinken, um das Abfallen der Melkbecher zu vermeiden (Luhdo, 2013). Dies würde Öffnungsquerschnittsflächen von 5,71 mm² bis 8,17 mm² entsprechen.

Welchen Einfluss das Senken des Vakuums an der Zitzen spitze auf die Eutergesundheit hat, wird von vielen Autoren diskutiert. Thiel und Mein (1979) haben festgestellt, dass ein geringes Vakuum bei niedrigen Milchflüssen fast immer einen positiven Einfluss auf die Eutergesundheit hat. Sie bemerkten aber auch, dass hohes Vakuum zu einer verkürzten Melkdauer führt aber dass die Euter dadurch schlechter ausgemolken werden. Reinemann et al. (2001) geben an, dass ein niedriges Melkvakuum einen positiven Effekt auf den Zitzenzustand hat, jedoch die Melkdauer moderat verlängert. Außerdem merkten sie an, dass die längere Melkdauer das Mastitisrisiko erhöht, da die Melkbecher länger Kontakt zur Zitze haben. Sie sagen aber auch weiter, dass ein hohes Vakuum die durchschnittliche Melkdauer nur mäßig verkürzt, aber die Anzahl offener Zitzen spitzen nach dem Melken, sowie deren Zeit sich wieder zu schließen erhöht. Häussermann und Hartung (2010) berichten, dass geringes Vakuum in der d-Phase die Gefahr von Hyperkeratosen senkt.

Rasmussen und Madsen (2000) kommen zu dem Ergebnis, dass grundsätzlich ein hohes Vakuum über 37 kPa in allen Melkphasen die Zitzenbelastung steigern und die Häufigkeit des Auftretens offener Zitzen spitzen nach dem Melken erhöhen kann, was wiederum das Eindringen von Krankheitserregern fördert. Hier wurde jedoch ein Vergleich zwischen hoch- und tief verlegter Melkleitung durchgeführt, was die Vergleichbarkeit mit der vorliegenden Messung beschränkt. Rasmussen und Madsen (2000) geben zu bedenken, dass ein niedrigeres Vakuum von 26 bis 30 kPa im Vergleich zu einem höheren Vakuum von 33 bis 39 kPa die Melkdauer erhöht. Unbegrenzte Vakuumseinwirkung auf das Zitzengewebe hat eine negative Auswirkung auf die Eutergesundheit (IDF, 1994), wobei auch hier keine Angaben zur Vakuumhöhe an der Zitzen spitze gemacht wurden, was mit der in dieser Studie entwickelten Technik, in Zukunft in der Praxis, genauer untersucht werden kann.

4 Schlussfolgerungen

Diese Studie ergab, dass mit Hilfe des Vakuumdrosselventils das Vakuum an der Zitzen spitze gemessen und aktiv an die Durchflussmenge angepasst werden kann, wobei der

Öffnungsquerschnitt als Einflussfaktor genutzt wurde. Es konnte bestätigt werden, dass die Verringerung des Querschnitts und die Erhöhung des Durchflusses eine Vakuumssenkung zur Folge hat. Dadurch wird es möglich sein, die Euterbelastung durch das Vakuum zu reduzieren, um den Melkprozess schonender zu gestalten. Das Problem der induzierten Eutererkrankungen durch den Melkprozess kann voraussichtlich verringert werden. Die Studie liefert wertvolle Ergebnisse über die exakt benötigten Öffnungsquerschnitte in einem Vakuumdrosselventil (VDV) für das untersuchte Melksystem. Anhand dieser Daten kann die Entwicklung einer vollautomatischen Vakuumreglungseinheit voran gebracht werden.

- Rose-Meierhöfer S, Ströbel U, Müller AB, Brunsch R (2010) Vorteile ohne Sammelstück. Neue Landwirtsch 21(10):64-66
- Schlaiß G (1994) Einfluss von modifizierter Zitzengummibewegung auf Milchabgabeparameter und zyklische Vakumschwankungen. Stuttgart-Hohenheim, 117 p, Forschungsber Agrartechnik Arbeitskr Forsch Lehre MEG 255
- Ströbel U, Rose-Meierhöfer S, Brunsch R, Zieger E, Maier J, Hatzack W (2011) Verfahren und Kit zum automatischen Melken von Tieren. Deutsches Patent Nr. 10 2011 075 138.6. Registration: 03.05.2011
- Ströbel U, Rose-Meierhöfer S, Müller AB (2012) Vier Viertel sind mehr als ein Ganzen. Forschungsbericht Ernähr Landwirtsch Verbrauchersch 23 (1):20-23
- Thiel CC, Mein GA (1979) Action of the cluster during milking In: Thiel CC, Dodd FH (Eds) Machine Milking. Reading: National Institute for Research in Dairying (NIRD), pp 116-155
- Worstorff H (1977) Experimentelle Untersuchungen zur Stabilisierung des Vakuums in der Melkeinheit. München, 147 p, München-Weihenstephan, Technische Universität, Habil

Referenzen

- Anonymus (2010) Bedienanleitung MultiLactor® Melkautomatisierung PULSATRONIC M Melkkarussell, Elsterwerda: Impulsa AG
- DIN ISO 6690 (2007) Milking machine installations - mechanical tests, International Organization for Standardization, Genève: ISO, 40 p
- Graf R, Gedek W (1983) Melkmaschinenbedingte Läsionen der Zitzenenden des Rindes – Beziehungen zur Eutergesundheit. Tierärztl Umschau 38:75-80
- Guler C (2006) Die Natur als Vorbild. Grüne Zeitg 10:32-35
- Hamann J, Bronzo V, Moroni P, Casula A, Zecconi A (2001) Conventional and positive pressure pulsation effects on bovine teats and on immunological components of different milk fractions. Milchwissenschaft 56(8):423-427
- Häussermann A, Hartung E (2010) A field study on teat-end vacuum in different milking systems and its effect on teat condition. In: The First North American Conference on Robotic Milking, 02.-05.03.2010, Canada, pp 226-227
- IDF - International Dairy Federation (1994) Teat tissue reactions to machine milking and new infection risk. Brussels: IDF-FIL General Secretariat, 43 p, Bull IDF 297
- Kemper-Krämer G (1983) Untersuchungen über das Keratin des Strichkanals von Kühen unter Berücksichtigung morphologischer Zitzenmerkmale. Gießen, 111p, Gießen, Universität, Diss
- Luhdo T (2013) Quantitative Modelle zum Melkprozess. Potsdam, 51 p, Potsdam, Universität, Diplomarb
- Michel G, Seffner W, Schulz J (1974) Hyperkeratosis of teat duct epithelium in cattle. Monatsh Veterinärmed 29:570-574
- Neijenhuis F, Barkema, HW, Hogeveen H, Noordhuizen JPTM (2001) Relationship between teat-end callosity and occurrence of clinical mastitis. J Dairy Sci 84(12):2664-2672
- Öz H, Rose-Meierhöfer S, Ströbel U, Ammon C (2010) Comparison of the vacuum dynamics of conventional and quarter individual milking systems. J Agr Sci 16:162-168
- Rasmussen MD, Madsen NP (2000) Effects of milkline vacuum, pulsator airline vacuum, and cluster weight on milk yield, teat condition, and udder health. J Dairy Sci 83(1):77-84
- Rasmussen MD, Wiking L, Bjerring M, Larsen HC (2006) Influence of air intake on the concentration of free fatty acids and vacuum fluctuations during automatic milking. J Dairy Sci 89(12): 4596-4605
- Reinemann DJ, Davis MA, Costa D, Rodriguez AC (2001) Effects of milking vacuum on milking performance and teat condition. In: AABP-National Mastitis Council Proceedings International Symposium on Mastitis and Milk Quality, 13-15.9.2001, Vancouver, Canada
- Rose S (2006) Untersuchung mechanischer Belastungen am Euter bei verschiedenen Melksystemen. Potsdam-Bornim: Leibniz-Institut für Agrartechnik, 246 p, Forschungsber Agrartechnik Arbeitskr Forsch Lehre MEG 436

The Romanian Tsigai sheep breed, their potential and the challenges for research

Elena Ilișiu*, Stelian Dărăban**, Răducu Radu***, Ioan Pădeanu****, Vasile-Călin Ilișiu*****, Constantin Pascal***** and Gerold Rahmann*****

Abstract

With 24.3 % of all sheep, the Tsigai is the second most important sheep breed in Romania. Nevertheless, until 1989 it was mainly kept for wool production as well as milk and meat. Since 1989, the number of Tsigai sheep has decreased by 44 % to 2.1 million head. The reason is the loss of profitability of wool production. Nowadays, lamb and milk are the most important products.

In a empirical study carried out in 2011, it was found that 77 % of the sheep farmers in the traditional Tsigai sheep region plan to continue to improve the genetic performance and the number of heads of the sheep herds by breeding with East Friesian milk sheep (for milk) and Suffolk (for meat). Due to this trend, the number of traditional Tsigai sheep is still decreasing and the Tsigai is in danger of becoming a rare breed.

Together with the sheep farmers and the farmers' associations, the future goals of the research by the national Tsigai Research Station in Reghin were identified and the focus of the work defined. It was decided to preserve the Tsigai sheep breed with the development of new functions (landscape management), the use of added values in marketing (endangered local breed) and premium products (organic). This will be the future focus of the Tsigai Research Station in Reghin.

Keywords: *Tsigai sheep breed, milk, meat, research, Romania, Organic Farming*

Zusammenfassung

Die rumänische Schafrasse Tsigai, ihr Potenzial und die Herausforderungen für die Forschung

Das einheimische Tsigai-Schaf ist die zweithäufigste Schafrasse in Rumänien. Ihr Anteil beträgt 24,3 % aller Schafe in dem Land. Bis 1989 wurde das Tsigai-Schaf vor allem für die Erzeugung von Wolle gehalten, Milch und Fleisch waren Nebenprodukte. Seit 1989 ist die Anzahl an Tsigai-Schafen aber um 44 % auf ca. 2,1 Millionen Mutterschafe zurückgegangen, da Wolle an Wert verloren hat. Die Lammfleisch- und Milchproduktion sind heutzutage die wichtigsten Produkte, die Wollproduktion ist praktisch bedeutungslos geworden.

In einer empirischen Studie wurde 2011 festgestellt, dass 77 % der befragten Schafhalter in der traditionellen Region der Tsigai-Schafe beabsichtigen, ihre Herden mit neuer Genetik (Ostfriesisches Milchschaaf für Milch, Suffolk für Fleisch) umzuzüchten und dabei auch zu vergrößern. Damit besteht die Gefahr, dass die traditionelle Rasse im Bestand weiter abnimmt und gefährdet wird.

Unter Beteiligung der Schäfer und der Interessenverbände wurden deswegen für die staatliche Tsigai-Schaf-Forschungsstation Reghin zukünftige Ziele identifiziert und die Schwerpunkte der Arbeit definiert. Es wurde festgelegt, dass für die Erhaltung der Tsigai-Schafrasse wirtschaftliche Haltungsverfahren insbesondere durch neue Funktionen (Kulturlandschaftspflege), Nutzung von added values (gefährdete Rasse) und in der Premiumproduktion (Ökologisch) zu entwickeln sind. Hieran arbeitet zukünftig die Forschungsstation in Reghin.

Schlüsselwörter: *Tsigai-Schaf, Milk, Fleisch, Forschung, Rumänien, Ökologischer Landbau*

* Research and Development Station for Sheep and Goat Reghin,
11 Dedradului Street, 545300 Reghin, Mureş County, Romania

** University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj – Napoca,
Faculty of Animal Science and Biotechnology, 3 - 5 Mănăstur Street,
400372 Cluj – Napoca, Romania

*** Research and Development Institute for Sheep and Goat Palas – Constanța,
248 I.C. Brătianu Street, Constanța County, Romania

**** Banat University of Agronomical Sciences and Veterinary Medicine
Timișoara, Faculty of Animal Science and Biotechnologies, 119 Aradului
Street, 300645 Timișoara, Timiș County, Romania

***** County Association of Sheep and Goat Breeding Sâncrăiana,
23 Vâنătorilor Street, 545300 Reghin, Mureş County, Romania

***** Ion Ionescu de la Brad University of Agronomical Sciences and Veterinary
Medicine Iași, Faculty of Animal Husbandry, 3 M. Sadoveanu Street,
700490 Iași, Romania

***** Johann Heinrich von Thünen Institute, Institute of Organic Farming,
Trenthorst 32, 23847 Westerau, Germany

Contact: gerold.rahamann@ti.bund.de

1 Introduction

Sheep keeping was, is and will continue to be important part of Romanian agriculture. About 20 % of the country's land areas and about 30 % of Romanian agricultural areas are covered by permanent pasture (about 5 million ha) (Marușca, 2011). This area, other marginal land and marginal agricultural products can feed 12 to 16 million sheep. Today less than nine million sheep are kept in Romania. Moreover in Romania there is still a great tradition of and experience with sheep production with adapted local and multi-purpose breeds.

Sheep-raising became unprofitable in Romania due to the wool capitalization at an extremely low price. The profitability of the sheep husbandry is difficult in the precarious socio-economic conditions characteristic for the transition period to the market economy where wool recovery is showing difficulties, (Mierlită, 2001).

State support for this sector is almost non-existent, which led the sheep breeders to seek solutions to make their own farms profitable. Given the demand for mutton meat at both the national level and the foreign market, sheep breeders have resorted to crossing local breeds and imported sheep breeds for meat production.

The Tsigai sheep is the second most important sheep breed in Romania with 24.3 % of the national sheep herds (the first is the Turcana sheep with 52.4 %). Tsigai breeds are kept extensively in mountainous and sub-mountainous regions with large pasture areas. Like Turcana, Tsigai sheep is a multi-purpose breed with focus on cheese production. Lamb production has become of more interest in the last years due export opportunities in the EU. The article focuses on the Tsigai sheep breed because the risk of losing the Tsigai pure breed due to cross-breeding practices has become observable in the last years.

Having to face the Twentieth Century challenge to change from and to the market economy, Romanian sheep production is now at a turning point with no clear future. This paper will try to explain the recent performance and the future prospects for the Tsigai breed. It is desirable to know the current state of Tsigai breed and to define and design strategies to rescue this local breed with new functions and performance. The role and the challenges for research to develop and protect this adapted breed will be derived in the context of the socio-economic framework conditions in Romania.

2 Sheep breeding in Romania

The first statistical data on sheep flocks breeding in Romania dates from 1860 (Table 1). In that year, a total number of 4.4 mio heads were counted. The number increased until 1985 up to 18.6 mio, the numbers already dropped significantly before the fall of the communist powers. Since 1986, the numerical evolution of the total sheep number raised in Romania started a downward slope. Among the causes of the

decline are the expansion of arable land, reduced pasture, adversity of the sheep farmers to sheep herds, especially transhumance, the hard life of shepherds, lower prices of other animal products (poultry, pigs and even cattle) and a relative increase in the price of sheep products (Drăgănescu, 2006). In 2010 only 9.141 thousand heads were kept. The reasons for this include the dissolution of large livestock state farms and cooperative farms after the end of the communist period on the one hand, and a change of land ownership on the other hand, as well as the membership in the EU. Under these conditions, large breeders without own agricultural land, pastures or meadows have started to decrease livestock, including sheep. Thus, due to diminishing interest in wool production and lower sales of biological reproduction material, valuable sheep flocks belonging of the elite core established for each local and imported breeds were recovered for meat production, delivered up to a 90 % as live animals on traditional markets in the Near East and Middle East countries.

Table 1:
The evolution of sheep flocks in the period 1860 to 2010
(thousand heads)

Year	Sheep flocks
1860	4.411
1890	5.002
1920	8.700
1938	10.086
1966	13.125
1985	18.637
2000	8.121
2010	9.141

Source: Nica, 1965; Ștefănescu, 1973; FAOSTAT, 2010a

In Romania there are two autochthon native breeds: Turcana, named also Zackel ("mountain peasant", "Romanian") or Walachian ("Romanian"), is the sheep of Sibiu transhumant shepherds, and Tsigai, the sheep of Braov and Covasna transhumant shepherds. Both are well adapted to the conditions of Romania, but Turcana may be better adapted to the alpine pasture. Tsigai, comprising 24.3 % of Romanian sheep, is a medium-wool breed, with good milk and good meat production. Turcana (52.4 %), a long coarse-wool breed, have good milk production, but poor meat production. From the Romanian breeds formed by crossing, Romanian merino breeds (Transylvanian Merino, Merino of Palas, Merino of Cluj) (9 %) and Karakul (5.4 %) are now more important from a numerical point of view. Crossbreeds (8.5 %) are scattered almost all over the country, and the difference of 0.4 % is comprised of other races (Raducuță and Ghiță, 2009).

3 The history of the Tsigai breed

Tsigai, a sedentary breed characterized by transhumance and related to Merino sheep, was initially the breed of Carpathians Bend Romanian transhumance shepherd, perhaps descendants of some Romans colonized there. They have white wool, brown, reddish or white face and legs (Picture 1 and Picture 2). In 1986, about 20 % of sheep in Romania, 1.9 mio, were Tsigai (Drăgănescu, 1998; Country report, 2003).



Picture 1
Tsigai Breed Ram (photo: Dărăban)



Picture 2
Tsigai Breed Sheep (photo: Dărăban)

The Tsigai, related to Merino and British Meat Sheep, is – from an economic point of view – one of the most important native sheep breeds in Central, South-Eastern and Eastern Europe (Drăgănescu, 1998). The breed is marked by the degree of improvement in group in “transition races”, making the transition from rustic to improved breeds (Pop et al., 1983; Dărăban 2006).

The Tsigai was apparently originally a sheep breed of the Carpathian Bend (Central Romania) long distance transhumance shepherds.

4 Milk, meat and wool production

4.1 Milk production

Today, sheep of the Tsigai breed are kept in Romania for their dairy products, for the slaughtered young lambs (4 to 6 weeks, 10 to 12 kg), and for wool production. The ewes are milked. The performance of some Romanian sheep breeds for milk production and milk composition is shown in Table 2.

Table 2
The performance of some Romanian sheep breeds

Breed	Milk production (liters/lactation)	Fat (%)	Protein (%)	Solid (%)
Turcana	100 - 140	7.7	6.0	16.65
Tigaia	70 - 90	7.0	6.5	15.02
Merinos de Cluj	85 - 95	7.4	6.31	13.49

Source: Lujerdean et al., 2009

Sheep's milk is consumed only as a processed (either traditional or industrial) product in the form of feta cheese, sheep cheese or other products obtained only from sheep or sheep's milk mixed with cow's milk. Cheese consumption in Romania is around $2.5 \text{ kg year}^{-1} \text{ person}^{-1}$ (Nistor et al., 2010). Most of the milk production is traditionally processed, and is for family consumption or for sale on tourist markets or peasant markets through direct marketing channels. A small amount of milk is delivered to processing companies. The marketing channel in this case is short, consisting of processor, intermediary and consumer (Manole, 2011). The main traditional products made from sheep's milk are: „caș” (cheese), „brânza de burduf” (a strong, salty and kneaded cheese kept in the stomach/skin of the sheep), „brânza în coajă de brad” (kneaded cheese kept in pine bark), telemea (a fresh, whole feta-type cheese), „urda” – is made with the whey of the „caș” (cheese). It is like ricotta, relatively high in protein and low in fat.

Milk production and its transformation into different products are important activities that contribute to the supplementation of farm income, but, unfortunately, the sale of dairy products is poorly organized. An important outlet could be the foreign market, where products obtained by traditional methods enjoy high appreciation, with growing demand. A new strand of organic production is appearing. Organic sheep cheese farms are more professional compared to traditional production.

4.2 Meat production

In Romania, sheep meat consumption is very low, the population demand for this product is only 4 % of total meat consumption, $2.5 \text{ kg year}^{-1} \text{ person}^{-1}$ respectively (FAOSTAT, 2007). The type of sheep meat depends largely on the age of lambs

to slaughter, traditions and consumer preferences (Taftă, 1983). Regarding the age of slaughter, there are two categories of lambs: milk lamb and fattened lamb.

Milk lamb is the most requested meat type of sheep in Romania. This meat comes from lambs slaughtered at 6 to 8 weeks and 8 to 15 kg live weight, the carcasses weighing 4 to 8 kg or less. Milk lambs are slaughtered every year in Romania in March to April at the Easter holidays. This shows that sheep meat consumption is seasonal, amounting to about 2 to 2.5 kg year⁻¹ person⁻¹ (FAOSTAT, 2007).

Meat of fattened lambs is obtained from young males and females who are eliminated from breeding, they are usually 14 to 15 kg at weaning and are fattened under semi-intensive or intensive systems (with high amounts of concentrates). They are slaughtered at a live weight of 35 to 40 kg, carcasses weigh on average 15 to 22 kg.

In the past 16 years, Romania was ranked first place in Europe regarding live animals exported for slaughter. In 2004 the maximum number of exported animals exceeded two million (Ilișiu et al., 2010). Over 97 % of the volume of exports is made up of young sheep of the Turcana race and the difference of 3 % is comprised of young sheep of the Tsigai breed (Ilișiu et al., 2011). The main destination of these exports is the West European countries (Italy, Spain), and Muslim countries (Saudi Arabia, Libya) (FAOSTAT, 2010b).

4.3 Wool production

From 1950 to 1989 wool production played an important role in sheep-raising in Romania. Wool prices were supported by the Romanian state, being three to four times higher than the world market.

Since 1989, wool prices decreased to the world market level and the income of all sheep owners has decreased dramatically.

The removal of producer and consumer subsidies, privatisation of state enterprises, price liberalisation and reform of the financial sector had important implications for the structure of sheep farming and hence raw wool production in Romania. The privatisation programs have meant that many of the large state farms have been broken up into smaller land holdings. The large cooperative farms have been broken up into numerous small scale farms averaging only 1.6 hectares.

The decrease of wool prices had the effect of reducing the number of sheep in Romania. Most affected were former state farms (reduction of four times of sheep number) (Drăgănescu, 1998). Private sheep breeders could better face this situation, because their extensive production is cheaper and their production was more diversified with dairy and meat products, and continues to operate with low income. In 1992 to 1993 greasy wool production in Eastern Europe was 80 000 tonnes, of which 34 % was produced in Romania (Barett et al., 1993). Per person consumption of wool in Romania was 0.5 kg in the years 1987 to 1990 (Barrett et al., 1993). Today, wool production is not particularly important, and due to lower prices, the wool price received fails to cover expenses related to labor to achieve sheep herding.

5 Productive potential of Tsigai breed

Tsigai sheep are a multipurpose sheep breed with a live weight of 79 to 90 kg. They produce milk (individual variation 53 to 248 kg per 210 days); meat (4.1 to 4.3 birth weight, fecundity some 90 %, prolificacy some 115 %, natality some 105 %; the Turkish prefer it for meat quality), wool sheep (2.48 kg from 18,743 females in 1993; 4.47 kg from 807 males) (Drăgănescu, 1998).

Tsigai wool is white, rarely black, semi-fine uniform (28 to 32 microns) (Dărăban, 2006), with brown, reddish, white or spotted face and legs (polymorphism, less group, population characteristic). It is supposed that the white face Tsigai was produced in the 19th century by some cross with Merino during the transhumance in the Crimea and North Caucasus. Tsigai has angular form, is of medium size, with a long, thin tail. Rams are horned or polled (2 to 3 %) (long spiral horns as in Merino), ewes are polled or have small horns.

Because the Tsigai race is a rustic breed, over time research attempted to improve milk and meat production, most work was based on the use of industrial crossings with specialized imported breeds.

Thus, to improve the milk production of the Tsigai breed, studies at the Research Institute of Palas Constanța focused on industrial crossing between local Tsigai breed with rams from Awassi and East-Friesian sheep breeds in the period 1975 to 1983. Although the yields obtained from female crossbreeds were superior to the Tsigai breed, introducing a crossing program was not possible because the breeds used in the experiment were difficult to adapt to environmental conditions in our country (Păunescu et al., 1985).

Research conducted in Romania to improve meat production was focused on increasing prolificacy, improving skills for meat production and carcass quality. To improve the prolificacy of the Tsigai breed, experimental works have been performed to achieve prolific crossbred females by crossing of Tsigai breed with rams of a Finnish breed. Results obtained to improve prolificacy were a real possibility to increase the number of lambs for meat production, but as for imported breeds to improve milk production, the Finnish race was not resistant to local conditions (Ursescu, 1978).

Specialized breeds were imported for meat production to improve the skills of fattening and carcass quality, namely: Suffolk, Ile de France, Merinofleisch, German Blackface. The obtained results were in all cases higher than those obtained from the Tsigai breed (Ciolca and Timariu, 1972; Pop et al., 1976; Rău, 1998; Ilișiu and Rău, 2008), but under the potential of improved breed (for lamb).

6 Keeping in the past and present of Tsigai sheep in Romania – a study

From 1950 to 1989, wool was the main production objective of the Tsigai breed. Today it is no longer of great importance, so that the production function of the race has changed.

Socio-political changes and economic reforms that have taken place in Romania had caused significant changes in growth and exploitation of Tsigai sheep, including: a drastic reduction of sheep number and level of wool, meat and milk production; change in the direction of exploitation; cancellation of work to improve the herd through the disappearance of populations with determinant role in the genetic evolution of sheep flocks.

Changes that occurred in sheep-keeping were determined by many limiting economic, technical and social factors, including: increased operating costs opposite the very low recovery rates of production, size of farms or herds limit the introduction and application of the technical activities of reproduction, improved livestock and production of breeding material, lack of laws and regulations to support and protect the sheep breeders.

After 1990, the focus was on milk production, but since the Tsigai is a breed with modest milk production, fed under medium quality pasture, they do not bring the income needed for the sheep farmers. Also, since 2006, there were a series of experiments at the research stations and the sheep associations, experiments which were based on crossings between Tsigai breed with rams of specialized breeds for meat production German Blackface, Suffolk. The obtained results were in all cases higher than those obtained from the Tsigai breed (Ilișiu et al., 2010), but under the potential of improved breed (for lamb). The risk of losing the pure breed Tsigai is relevant and becomes evident because many sheep herders would like to increase the genetic quality of these high performance breeds in their herds.

Under these conditions, the maintenance of local sheep populations, as a reserve of genes, requires the adoption of measures for conservation.

Taking into account the low production indices that led to decreasing number of this population, it is necessary to give compensation to the sheep breeders who maintain this genetic stock.

Economic motivation would be the best starting point to avoid the cessation of the raising of the Tsigai breed, meaning decent incomes for families of sheep breeders. As noted, the most important reason for increasing the national sheep flock since 2002 has been grants awarded for animals under the *Official Control of Production* (OCP), and since 2007 by providing animal and land area payments, which has been beneficial for farm development.

In this context, finding new niches to bring added value to sheep farms would be a good approach for the breed preservation and husbandry.

6.1 Material and method

Visits to sheep breeders' farms, surveys and telephone interviews were conducted to collect information.

6.1.1 Collecting data on sheep farms

Data collection was conducted with visits to farms and telephone interviews with 30 small, medium and large sheep farms

(ten from each category). The investigations were conducted in November and December 2011. The addresses of surveyed sheep farms were obtained from breeders' associations.

To prepare for the survey a questionnaire was conducted comprised 55 questions grouped into seven categories as follows: data on the farm (twelve questions), farm management with questions related to milk, meat and wool production (nineteen questions), market and marketing (four questions), the existence and necessity of research units (nine questions), research and development (one question), education and extension (five questions), organic agriculture (five questions).

The interviews lasted between 15 and 45 minutes, the average was estimated at about 20 to 25 minutes. At the end, the opinion of sheep breeders regarding survey questions and points of view that were not included in the questionnaire was requested.

The statistical analysis was carried out with the aid of the Winstatistical program. Mean is shown with standard error.

6.2 Results

6.2.1 General information on sheep farms

Table 3 provides an overview of the number of farms surveyed and their distribution in different counties.

Table 3

Number of farms surveyed and their distribution in different counties

County	Number of surveyed farms	Sheep number	$X \pm s_x$	Minimum number of sheep	Maximum number of sheep
Alba	2	700	350 ± 201	150	550
Arad	5	1,400	280 ± 108	100	700
Brasov	6	10,500	$1,750 \pm 615$	500	4,000
Cluj	5	910	182 ± 33	100	300
Covasna	6	1,963	280 ± 112	30	800
Mures	6	2,800	467 ± 81	200	800
Total	30	18,273	609 ± 160	1,080	7,150

Source: own data

In total 30 farms were surveyed which have 18 273 sheep of Tsigai breed (average 609 ± 160 sheep). Turcana breed can be found alongside the Tsigai breed in 43 % of the surveyed farms.

Of the total surveyed farms, 77 % predict that they will increase the sheep number in the future. A percentage of 33 % of the farms were included in the Official Control of Production (OCP).

Regarding the mode of land ownership, 93 % of total questioned farms are both land owners and renters, the average area of land/ farm is shown in Table 4.

Table 4

Grassland area owned of sheep farms (mean ± standard error)

County	Number of surveyed farms	Total land (ha)	Owned land (ha)	Rent land (ha)
Alba	2	72 ± 34	17 ± 13	55 ± 21
Arad	5	32 ± 6	19 ± 5	13 ± 4
Brasov	6	881 ± 251	248 ± 101	633 ± 154
Cluj	5	125 ± 34	32 ± 54	93 ± 28
Covasna	6	90 ± 37	28 ± 10	62 ± 27
Mures	6	109 ± 15	26 ± 7	83 ± 14
Total	30	247 ± 77	70 ± 25	177 ± 52

Source: own data

In terms of direct payments per area, 90 % of breeders receive payments/land area, 7 % do not receive payments, and 3 % received payments only on one part of the land which they have rented.

Although all surveyed breeders believe that their farms will exist in the next 10 years, 37 % believe that without payments, they would not practice this activity.

Practicing this activity provides a decent living for 70 % of farm families, those who can't generate a decent family living by practicing this activity are generally farms with up to 350 sheep, and only one farm with over 800 sheep. 73 % of surveyed farms have foreign staff employed at farm, with work being carried out, both in winter and summer, by family members.

Currently, the tendency of sheep-raising is for milk-meat for 77 % of the surveyed farms. In the future, significant changes are expected in the direction of the Tsigai breed for meat-milk production (53 %).

The main reason for the orientation of sheep breeders toward meat-and-milk production is the lack of human resources. Farmers believe that if sheep-raising is oriented to meat production, labor volume is much lower (by removing the milking and leaving lambs to suck up to the end of August). On the other hand, the increasing demand for meat production and satisfactory prices obtained from the lambs capitalization is a strong enough motivation for them to strengthen this production.

6.3 Production management

6.3.1 Milk production

In terms of milk production, 93 % of the farmers are satisfied with the milk production obtained from the Tsigai breed. Although farmers believe that milk yield from Tsigai sheep is good, 77 % want to improve this production in the future by crossing it with specialized breeds for milk production (39 %) or selection (61 %).

More than a half of the farms included in the survey process the milk in their own farms (70 %), while 27 % deliver it directly to a processor. From the milk obtained and processed in farms, breeders made traditional products, the first among manufactured products is telemea (a fresh, whole feta-type cheese), which is produced in 85 % of the farms, followed by sheep's cheese („caș”). In general, more than one dairy product is produced at the farm level. Therefore, 57 % of the farms that produce traditional dairy products make three products:

„Telemea”(feta-type cheese) + „Caș”(cheese) + „Urda”(67 %), „Telemea + „Brânză frământată”(kneaded cheese) + „urda”(25 %) or „Caș” + „Brânză frământată” + „Urda”(8.33 %). In 97 % of surveyed farms, products are both for market and consumption.

6.3.2 Meat production

Even if 67 % of the breeders consider that the Tsigai pure breed could be efficiently exploited just for meat production, they apply crossbreeding with breeds specialized in meat production, the most frequently encountered being German Black-face breed. Only 33 % of surveyed farms do not accept breeding with rams of meat breeds. Lamb fattening is realized mostly in an extensive system (77 %), followed by the intensive system (17 %). The mean weight at the valorification of the lambs is 25 to 20 kg at 50 % of the studied exploitations and 30 to 35 kg in 23 % of the exploitations. Rarely were valorifications found to contain between 35 to 40 kg (10 %) and 40 to 50 kg (10 %). Sales of the lambs are performed live in all farms included in the study, the period of capitalization is very varied, as follows: August to September (53 %), March to May (37 %) and June to July (10 %).

With regard to the potential of Tsigai breed for meat production, 57 % of the breeders believe it would be more efficient to keep the pure breed for meat than for milk production. 93 % of the questioned breeders have considered that using crossbreeding of the foreign breeds specialized by meat production for half-breed lamb production would make the growth of the Tsigai breed more efficient. Because of the adaptability and the high resistance of the Tsigai breed, 77 % of the breeders would not give up growing Tsigai breed in exchange for one foreign breed specialized for meat or milk production.

6.3.3 Wool production

The wool sector has been insignificant in the last years because the lack of the demand and the low prices obtained by the sales. 53.33 % of the questioned exploitations believe that there is no demand for wool production, and incomes achieved from wool valorification are approximately equal to the sum paid for the shearing realized in 50 % of the exploitations and less in 30 % of the exploitations included in the study. Only 20 % of the breeders make a profit from the wool capitalization.

In this context, 70 % of the exploitations do not want to improve the wool production in the future, while 30 % want to improve this production just if the price were to grow and if demand would grow for this product.

6.3.4 Market and marketing

Regarding the sale of dairy products obtained from sheep, the majority of breeders sell their products directly, either at markets or fairs (33 %), directly from home (13 %) or through intermediaries (20 %). Just a small number of breeders (7 %) capitalize their products in supermarkets. The main reason that the breeders can't capitalize their products in supermarkets is that only 7 % from the exploitations have products with trademarks.

90 % from those interviewed would in the future like to realize regional products with trademark at the association level to which they belong. Dairy regional products with trademark are desired by 63 % of the breeders, while the meat products are desired by from 22 %. The capitalization prices obtained from sheep are reproduced in Table 5.

6.3.5 The existence and the necessity of the research units

The existence of the Research Institute for Sheep and Goats Palas Constanta are known by 63 % of those questioned, and existence of Research Station for Sheep and Goat Reghin is known by 57 % of breeders. 13 % of the breeders have participated at meetings realized by this research unit, and only 7 % have been visited by experts from this research stations. The breeders' contact with the Research Station for Sheep and Goats Reghin was very reduced (10 % from exploitations), even if they appreciate in a very high percentage (93 %) of the information that could be provided by the experts from the research stations, which could help them to obtain higher economic results in their own exploitations, compared to what they obtain at present.

97 % from the breeders appreciate that the Research Station for Sheep and Goat Reghin is necessary, the most frequent motivations for this being: the transfer of information to the breeders; for the news brought into the research; the Tsigai breed preservation, and the furnishing of the valuable breeding material. This has not recently been fulfilled to this extent.

6.3.6 Research

Regarding the domains to which it should be currently directed the research, 40 % from the questioned, consider that the research should focus on the production of meat with an accent on the carcass and meat quality, followed by researches for milk quality (27 %). The research for product quality is expressed by 10 % of the breeders, as the research for the improve milk production, improve meat production and the growing technologies are expressed equally (7 %). Least important for the breeders seems to be the research regarding animals health (3 %).

6.3.7 Education and extension

All the questioned farmers want the experts from the research stations to contact them and offer them information. 67 % of sheep breeders believe that the contact with specialists should take place every three months, while 27 % believe that contact with specialists should take place every two months.

In terms of the professional preparation in the sheep domain, this is owned by 57 % by the breeders. The desire to participate in professional training courses by those who do not possess this qualification was expressed by 92 %. Regarding exploitation efficiency, 77 % of the breeders without qualifications consider that they could obtain better economic results than they presently obtain, if they had a professional training in this domain.

Table 5
Price of the products obtained from sheep

Product	Price (lei/Euro)					
	Maximum price		Minimum price		Average price	
	lei	euro	lei	euro	lei	euro
Wool (kg)	3.5	0.81	0.8	0.19	2.0 - 2.5	0.48 - 0.6
Meat (kg)	11.0	2.62	7.0	1.67	9.0 - 9.5	2.14 - 2.26
Milk (l)	2.2	0.52	1.8	0.43	2.0 - 2.1	0.48 - 0.50
Cheese curd („caș de oaie”) (kg)	20.0	4.76	9.0	2.14	13.0 - 14.0	3.1 - 3.33
Kneaded cheese („brânză frământată”) (kg)	30.0	7.14	15.0	3.57	20.0 - 21.0	4.76 - 5.0
Cottage cheese („telemea”) (kg)	20.0	4.76	13.0	3.1	13.0 - 13.5	3.1 - 3.22
Cheese („cascaval”) (kg)	35.0	8.33	22.0	5.24	25.0	5.95
Soft cheese („urda”) (kg)	12.0	2.86	8.0	1.91	9.0 - 9.5	2.14 - 2.26

*The price calculation in euro has been made taking into account 1 Euro = 4.2 lei.

Source: own data

In general, the breeders belong to a professional association (93 %) which supports them in their activity by supplying information, negotiating prices for meat, milk, wool and the purchasing cheaper medicines and feed.

6.3.8 Organic agriculture

97 % of the questioned farms practice conventional agriculture, just one farm being in conversion (3 %). In general, the breeders' knowledge about organic agriculture is minimal (80 % of those questioned) and is limited at the fact that they know that using chemical fertilizer and pesticides would be forbidden should they practice organic agriculture. The reasons why they don't practice organic agriculture vary, but in the most cases are invoked by the lack information (28 %), lack of land ownership (21 %), the documentation volume for the exploitation certification (10 %), and on the same level (7 %) is the low animal effectiveness with the lack of organic feed.

The strongest motivation for practicing organic agriculture could be of economic nature (34 %), meaning the income obtained in the practice of the organic agriculture would be superior to what they have at present. Not only the economic factors play an important role making this decision, but also owning their own land (17 %) and the existence of the organic certificate feed (14 %). In the same measure (3 %) are said to simplify the documentation, the existence of other breeders who practice organic farming, and better knowledge of the situation of organic farming.

Regarding the problems of sheep breeders which could meet requirements for practicing organic farming, 31 % of those surveyed do not know what problems they would encounter, 28 % believe that the lack of certified organic feed would be the main problem they would face, 14 % think that there would be no problems, while equally 7 % of those surveyed believe that treatments, lack of demand and market products could be major problems.

7 Research and extension demand

7.1 Resources

Currently, the Research Station for Sheep and Goat Reghin has a 961 heads of sheeps and goats, of which 707 heads are sheep (416 sheep mothers) of the Tsigai breed and crossbreed German Blackface x Tsigai and 254 heads goats (117 goat mothers) of the local Carpathian race and crossbreed Saanen x Carpathian.

The land under management for fodder achievement and grazing is an area of 217 ha, of which an area of about 52 ha can be used for feed production, the rest is very poor quality. To complete the grazing needs, but also for enhancement of the feed resources in the mountain area, the unit has leased 130 hectares pasture located in Caliman Mountains at an altitude of 1500 m.

Regarding the ongoing research projects, currently our research station participates as collaborator to a single research project (collaborator of Research Institute for Sheep

and Goats Palas – Constanta). A lack of research projects and the necessary funding hampers research and technology transfer. Since 2009, research funding was much reduced due to economic crisis, making it almost impossible to carry out the needed activities.

The Research Institute for Sheep and Goats Palas – Constanta, as scientific and technical coordinator of the research units in the field, submitted a thematic research plan, stemmed from frequent consultations with the breeders associations regarding their requirements, to the Academy for Agricultural and Forestry Sciences Bucharest (ASAS) in 2011. Requirements focused mainly on genetic improvement, on improving the morpho-productive performance of the sheep and goats breeds that they hold, and optimization of husbandry technologies according to production direction: meat, milk, wool.

7.2 Research objectives

Given the requirement of sheep breeders and the need to save the Tsigai breed, future research objectives of Research Station for Sheep and Goat Reghin should be the following:

- increasing production performance for meat and milk – dual purpose – of Tsigai sheep – 53 %;
- improved organic lamb production – 47 %;

The future research objectives of our research station are in accordance with proposals by advisory board made up of farmers, sheep breeders associations, stakeholders, academics specialized in sheep and researchers from research units.

8 Conclusions

In order to improve sheep husbandry in Romania, and especially to preserve the local Tsigai breed, it will be necessary to take direct action involving both researchers, sheep breeders and other decision makers, with actions materialized in:

- 1) Establishing dairy premium products, identifiable by quality labels and geographical origin (PDO) and their inclusion in a chain of organic production for adding more value to the race.
- 2) Improving the marketing of the product by conducting activities to help strengthen the product profile, creating a regional image and informing customers about product quality, production conditions and conservation benefits of the Tsigai breed.
- 3) Recovery of feed resources on sub-mountainous and mountainous pastures by extensive grazing with an effect on landscape conservation and the maintenance of valuable plant species in the vegetal cover, leading to regeneration and nature conservation.
- 4) Involvement of decision makers to provide the state aid regarding the use of genetic resources of endangered animals.

References

- Barrett D, Roper H, Abdalla A (1993) Eastern Europe and Australian wool exports [online]. To be found at <http://adl.brs.gov.au/data/warehouse/pe_abarebrs90000279/rr93.20_eastern_europe_wool.pdf> [quoted 27.07.2012]
- Ciolcă N, Timariu S (1972) Aptitudinile pentru producția de carne la rasele și varietățile de oi crescute în România. Lucrari Stiintifice Institutul de Cercetare Dezvoltare pentru Cresterea Ovinelor și Caprinelor Palas- Constanța 4:177-184
- Country report for SoW-An-GR (2003) [online]. Romanian strategy for a sustainable management of farm animal genetic resources : [online] To be found at <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1250e/annexes/CountryReports/Romania.pdf>> [quoted 27.07.2012] <http://faostat.fao.org>
- Dărăban S, Mireșan E (2002) Optimizarea creșterii-exploatării și valorificarea producțiilor de la ovine. Cluj-Napoca : Ed Risoprint, 161 p
- Dărăban S (2006) Tehnologia creșterii ovinelor. Cluj-Napoca : Ed Risoprint, 44 p
- Drăgănescu C (1998) Romanian sheep production spectacular past, decline, uncertain future. REU Technical Ser 50:178-187
- Drăgănescu C (2006) Productia ovinelor in Romania la rascrucea tranzitie – dileme si strategii [online]. To be found at <http://www.ibna.ro/pdf/ana/Anale_22_2006%20pdf/Anale%20IBNA%2022_14%20%20Draganescu.pdf> [quoted 23.03.2013]
- FAOSTAT (2007) Data Food and Agriculture Organization of the United Nations, Food Supply, 2007. [online] <<http://faostat.fao.org/site/610/default.aspx#ancor>> [quoted 25.01.2013]
- FAOSTAT (2010a) Data Food and Agriculture Organization of the United Nations, Production, 2010. [online] <<http://faostat.fao.org/site/573/default.aspx#ancor>> [quoted 25.01.2013]
- FAOSTAT (2010b) Food and Agriculture Organization of the United Nations,Trade, 2010. [online] <<http://faostat.fao.org/DesktopModules/Faostat/WATFDetailed2/watf.aspx?PageID=536>> [quoted 25.01.2013]
- Ilișiu E, Rău V (2008) Research regarding capacity of fattening of lambs from Tigaie breeds, half-breeds Suffolk x Tigaie and half-breeds Blackface x Tigaie. Bull USAMV Anim Sci Biotechnol 65(1-2):440
- Ilișiu E, Dărăban S, Neacșu MG, Ilișiu VC, Rahmann G (2010) Improvement of lamb production in Romania by crossbreeding of local Tsigai breed with high performance breeds. Landbauforsch 60(4):259-265
- Ilișiu E, Rău V, Miclea V, Rahmann G, Ilișiu VC, Dărăban S (2011) Carcass conformation and tissue composition of Tsigai and crossbred lambs by Suffolk and German Blackface breed. Bull USAMV Anim Sci Biotechnol 68(1-2):173-178
- Lujerdean A, Bunea A, Pica EM (2009) Characterization of Turcana, Tigaie and Merinos de Cluj sheep milk in early and late lactation period. Bull USAMV Anim Sci Biotechnol 66(1-2):26-31
- Manole V (2011) Filierele produselor obținute de la ovine în România [online]. To be found at <<http://oeconomica.org.ro/files/pdf/79.pdf>> [quoted 30.07.2012]
- Marușca T (2011) O nouă lege a pajistilor [online]. To be found at <<http://revista-farma.ro/autori-teodor-maru-ca/o-noua-lege-a-pajistilor.html>> [quoted 03.09.2012]
- Mierlită D. (2001) Nutriția și alimentația ovinelor supuse îngrășării. Ed. AcademicPres, Cluj-Napoca Mierlită D. (2001) Nutriția și alimentația ovinelor supuse îngrășării. Ed. AcademicPres, Cluj-Napoca
- Nistor E, Bampidis V, Pet L, Cioc V (2010) Milk and dairy products in Romania before and after EU accession [online]. To be found at <http://www.usabtm.ro/fileadmin/fzb/Simp%202010/VOL%202/PROCESSING_OF_ANIMAL_PRODUCTION/Nistor%20E%2020.pdf> [quoted 30.07.2012]
- Nica Th (1965) Creșterea oilor. București : Ed Agro-Silvică, 435 p
- Păunescu J, Ionescu A, Copăceanu V, Maltopol M, Barbu D, Năstase L, Mladin L, Dragoș T (1985) Cercetări privind ameliorarea oilor pentru lapte. Lucrările Științifice ale I.C.P.C.O.C Palas-Constanța 5:93-99
- Pop A, Taftă V, Lăbușcă I, Mochnacs M (1976). Creșterea ovinelor și caprinelor. București : Ed didactica pedagogica
- Pop A, Taftă V, Lăbușcă I, Mochnacs M, Petrescu Rodica (1983). Tehnologia creșterii ovinelor și caprinelor. București : Ed didactica pedagogica
- Raducuță I, Ghiță E (2009) Research regarding the situation of sheep size exploitations and sheep breed structure in Romania [online]. To be found at <http://www.eaap.org/Previous_Annual_Meetings/2009Barcelona/Papers/41_Raducuta.pdf> [quoted 30.07.2012]
- Rău V (1998) Cercetări privind sporirea producției de carne la ovine prin încrucișarea rasei Tigaie cu rasa Germană de carne cu capul negru. Cluj-Napoca : USAMV
- Ştefănescu C (1973) Zootehnia româniei : vol.III: Ovine. București : Ed Academiei
- Taftă V (1983) Creșterea și exploatarea intensivă a ovinelor. București : Ed Ceres
- Ursescu AI (1978) Producerea de oi prolifică prin încrucișarea raselor prolific din import cu oile locale pentru obținerea mieilor de carne : referat tehnic Institutul de Cercetare Dezvoltare pentru Cresterea Ovinelor și Caprinelor Palas- Constanța

Evaluierung der schlaginternen Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen für den Praktiker

Rainer Duttman*, Joachim Brunotte** und Michaela Bach***

Zusammenfassung

Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist die Quantifizierung des im Zuge einer Silomaisernte anfallenden Transportstreckenaufwandes und die räumliche Abbildung der feldinternen und -externen Befahrungsintensität. Zu diesem Zweck wurde jedes Fahrzeug mit einem GPS-Empfänger ausgestattet, der die Positionsdaten kontinuierlich aufzeichnete. Basierend auf den erfassten Daten wurde ein Schätzverfahren zur Bestimmung des Wegeaufwandes bei der Silomaisernte entwickelt. Es kann einerseits der Optimierung der Transportdistanzen dienen und andererseits zur Vorauskalkulation der Maschinenbetriebskosten beitragen.

Der zweite Teil der Untersuchung beschäftigt sich mit der Erfassung der feldinternen Befahrungsintensität. Als Indikatoren werden neben dem Spurflächenanteil und der Überrollhäufigkeit die spurbezogen berechneten Radlasten verwendet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Spurflächenanteil der Ernte- und Transportfahrzeuge je nach Größe und Form des Ackerschlages mehr als 60 % der Schlagfläche ausmachen kann, wobei einzelne Spurabschnitte in den Vorgewenden und den Feldzufahrten mehr als vierzig Mal überrollt werden können. Ein erheblicher Flächenanteil mit hohem Lasteintrag entfällt auf die Abfuhr des Erntegutes. Mit Blick auf die Reduzierung der mechanischen Bodenbelastung und des Verdichtungsrisikos liegt hier erhebliches Optimierungspotenzial.

Schlüsselwörter: Ackerverkehr, Biomasselogistik, Spurflächenanteil, Überrollhäufigkeit, Verdichtung

Abstract

Evaluation of soil stress due to field traffic and development of a decision support tool

This study aimed at the quantification of the transportation effort during a silage maize harvest and at the spatial analysis of traffic intensity on and off a field. In the first part of this study we introduce an easy to handle method for estimating the transportation effort during harvest. This method may assist in optimizing the transport distances prior to tillage and estimating the operational costs in advance. The second part of this study focused on the assessment of traffic intensity due to the harvest, using the wheel track area and the number of rolling overs as indicators. We also modeled the spatial patterns of field traffic within a Geographical Information System. It was found that more than 60 % of the field area had been wheeled by the harvester and the transportation vehicles, where two thirds of the total track area had been rolled over more than twice. Moreover the results reveal that some wheel track sections in the headlands and close to the field gate had been rolled over more than 40 times. A considerable track area percentage trafficked at high wheel load is related to the return routes of fully loaded transport vehicles, which can cover about 25 % of the field area. This share could be reduced by adapting the load of the transporters to the actual soil properties or by rearranging the field geometry.

Keywords: field traffic, biomass logistics, wheel track area, rolling-over frequency, soil compaction

* Christian Albrechts-Universität, Geographisches Institut, Lehrstuhl für Physische Geographie – Landschaftsökologie und Geoinformation
Ludewig-Meyn-Straße 14, 24098 Kiel

** Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50,
38116 Braunschweig

*** Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Bundesallee 50,
38116 Braunschweig

Kontakt: michaela.bach@ti.bund.de

1 Einleitung

Die aus erneuerbaren Ressourcen erzeugte Energie nimmt derzeit einen Anteil von 12,2 % am Gesamtenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland ein (BMU, 2011). Eine wachsende Bedeutung kommt dabei der aus Biogas erzeugten elektrischen Energie zu. Wurden im Jahr 2010 etwa 14,5 TWh elektrischer Energie aus Biogas produziert, so waren es im Jahr 2011 bereits 15,5 TWh. Dies entspricht einem Anteil von ca. 2,9 % am gesamten Stromverbrauch (BMU, 2011). Das mengenmäßig wichtigste Co-Substrat für die Biogasproduktion ist Silomais. Dessen Anbaufläche wuchs im Zeitraum von 2005 bis 2011 um 62 % auf 2,03 Mio. Hektar (Statistisches Bundesamt). Etwa ein Viertel dieser Fläche dient der Erzeugung von Biogas. Da die erneuerbaren Energien spätestens 2020 einen Anteil von mindestens 35 % an der Stromproduktion in Deutschland erreichen sollen (BMU, 2011), kann von einer weiteren Expansion der Anbaufläche für Silomais ausgegangen werden.

Eine nachhaltige und ressourcenschonende Land- und Biomassenutzung muss auch die Ernährungssicherung einer stetig wachsenden Weltbevölkerung im Blick behalten. Das Umweltbundesamt kommt daher in seinem jüngsten Positionspapier zu dem Schluss: „Der Anbau von Biomasse eigens für die energetische Nutzung als Beitrag zur Deckung der hohen Energieverbräuche in den Industrieländern beansprucht unverhältnismäßig große Anteile produktiver Ackerflächen“ (Jering et al., 2012, S. 84).

Während die Auswirkungen eines intensivierten Anbaus von Silomais auf Biodiversität, Bodennährstoffhaushalt und Wasserqualität in zahlreichen Studien untersucht worden sind (s. Ahl et al., 2007; Scholz et al., 2001; Senbayram, 2009; Svoboda, 2011; WBGU, 2009; Wilms et al., 2007), beschäftigen sich nur wenige Arbeiten mit den Umweltwirkungen des bei der Energiemisernte stattfindenden Ernte- und Transportverkehrs. So ist zwar bekannt, dass Bodenverdichtungen im Silomaisanbau vor allem durch die hohen Lasteinträge der Erntefahrzeuge verursacht werden, die wegen des späten Erntetermins häufig auf (zu) feuchten Böden zum Einsatz kommen (s. Nevens u. Reheul, 2003). Über die feldinternen Befahrungsintensitäten und die damit verbundenen Lasteinträge bei der Silomaisernte liegen dagegen so gut wie keine

Kenntnisse vor. Ebenfalls nur wenige Arbeiten wie die von Blazej und Soucek (2011) beschäftigen sich mit dem im Einzugsgebiet von Biogasanlagen stattfindenden erntebezogenen Transportverkehr, dessen Quantifizierung sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus umweltökonomischer Sicht von Bedeutung ist.

Die vorliegende Untersuchung stellt einen Ansatz zur Bilanzierung des Befahrungsaufwandes auf Straße und Feld vor und untersucht die feldinterne Befahrungsintensität durch die Ernte- und Transportfahrzeuge. Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

1. Welche Gesamtdistanzen werden für die Ernte und den Transport zurückgelegt?
2. Wie häufig werden welche Teilflächen des Schlages überrollt?
3. Wo finden besonders hohe Lasteinträge durch wiederholte Überrollungen statt?

Als Beratungshilfe für die Praxis entwickelt die Untersuchung ein einfaches Schätzverfahren zur Bestimmung der Transportstreckenlänge bei Silomaiserntekampagnen.

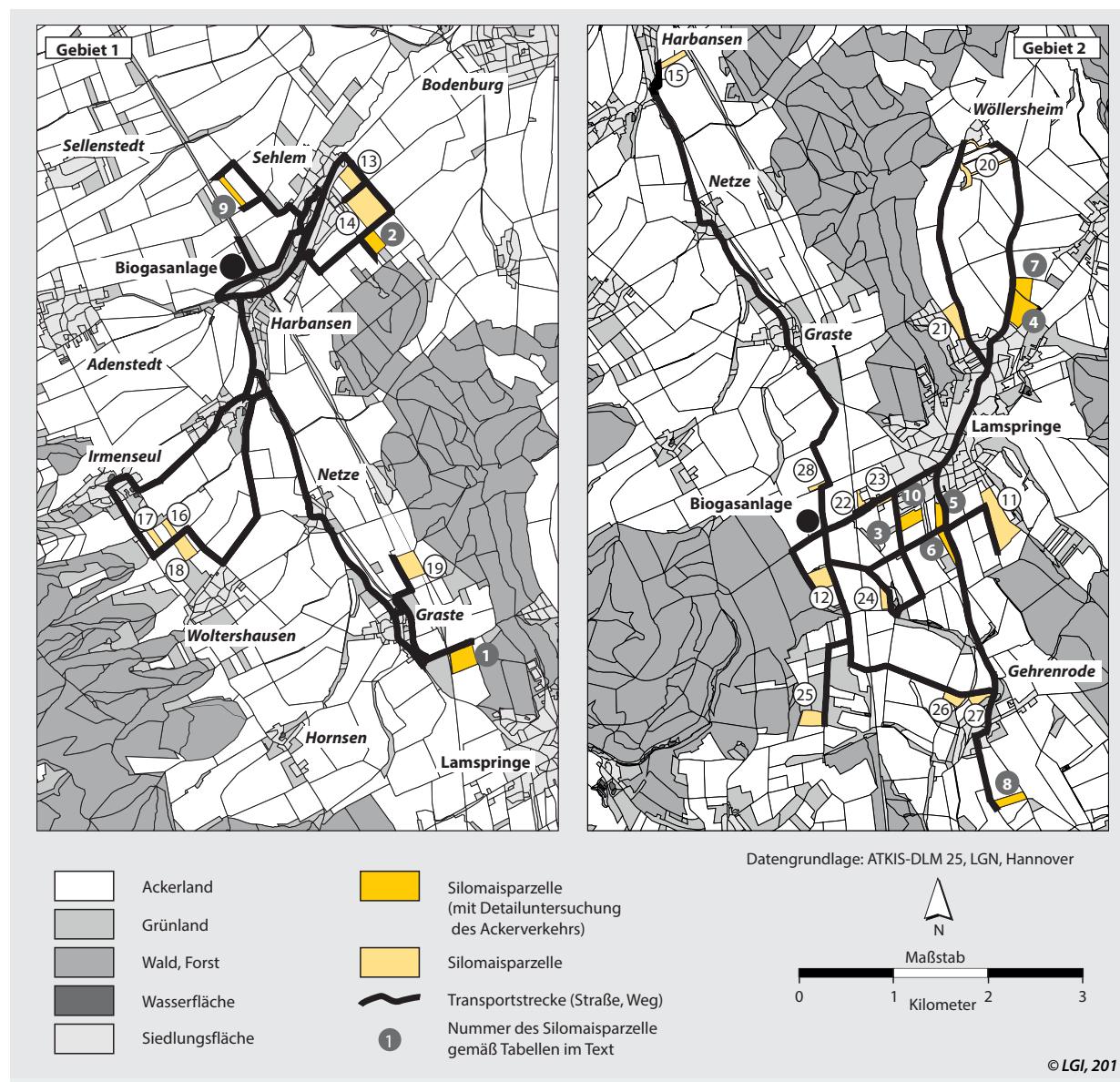
2 Untersuchungsgebiet und Methoden

Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Silomaisernte für zwei Biogasanlagen im Raum Lamspringe-Sehlem (Landkreis Hildesheim) durchgeführt. Eine Übersicht über die Lage der beiden Biogasanlagen, die Verteilung der Ernteschläge und das beim Transport des Erntegutes befahrene Wegenetz gibt Abbildung 1.

Bei der Erntekampagne wurden ein Maishäcksler und drei Abfuhrgespanne eingesetzt. Die für die Berechnung der Spurflächen und Radlasten relevanten Fahrzeugeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Häcksler und Zugmaschinen waren jeweils mit einem GPS-Empfänger (Trimble JunoST) ausgestattet, deren Antennen über der Achsmitte auf dem Kabinendach montiert wurden. Die Positionen aller Fahrzeuge wurden während der gesamten Kampagne in 1-Sekunden-Intervallen mit einer Lagegenauigkeit von 1 bis 3 m erfasst und die aufgezeichneten Daten nach Abschluss der Fahrten in ein Geographisches Informationssystem (ArcGIS Vers. 9.3.1; ESRI) überführt und dort weiterverarbeitet.

Tabelle 1
Technische Daten der eingesetzten Fahrzeuge

Fahrzeug	Ladevolumen	Reifentyp vorne hinten	Luftdruck	Spurweite vorne / hinten	Reifenbreite	Radlast leer	Radlast beladen
Häcksler	m ³		kPa	mm	mm	kN	kN
		800/65R32 700/50R26,5	110 / 100	2.800 / 2.600	800 / 700	59,4 / 18,6	59,4 / 18,6
Traktor		600/70R34 710/65R32	100 / 100	2.000 / 2.000	650 / 710	16,7 / 29,4	15,2 / 34,3
Silowagen (Tandem)	50	750/45R26,5	100 / 100 230 / 230 Straße	2.100 / 2.100	750 / 750	22,1 / 22,1	54,0 / 54,0

**Abbildung 1**

Übersicht über die untersuchten Testparzellen und Transportstrecken (grau hinterlegte Parzellennummern beschreiben Intensivuntersuchungsflächen)

Das prinzipielle Vorgehen bei der Modellierung des Ernte- und Transportverkehrs auf Straße und Feld stellt Abbildung 2 dar.

Berechnung des gesamten Wegeaufwandes im Einzugsgebiet von Biogasanlagen mit GIS

Die zurückgelegten Gesamtdistanzen können aus den GPS-Daten für alle Ernte- und Transportfahrten berechnet werden. Hierfür ist zunächst der Aufbau einer Netzwerktopologie aus den als Punktinformation aufgezeichneten Fahrzeugkoordinaten notwendig. Aus dem Streckennetzwerk und der zeitlichen Abfolge der GPS-Daten können Distanzen, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit der eingesetzten Maschinen für unterschiedliche Streckenanteile ermittelt werden.

Räumliche Abbildung und Bestimmung der schlaginternen Befahrungsintensität

Zur Bestimmung der Spurflächenanteile wurden die jeweils in Achsmitte erfassten xy-Positionen der einzelnen Fahrzeuge zunächst in Linienzüge überführt (s. Abbildung 2). In einem weiteren Schritt wurden die Verläufe der Achsmittellinien der Einzelfahrzeuge entsprechend der Spurweite ihrer Vorder- und Hinterachse und der Reifenbreite ihrer Vorder- und Hinterräder (s. Tabelle 1) in Fahrspurpolygone überführt. Auf diese Weise können die Fahrspuren der einzelnen Fahrzeuge lagegetreu abgebildet und deren Spurfläche berechnet werden. Durch die Verschneidung der Fahrspuren aller auf dem Schlag eingesetzten Fahrzeuge lassen sich schließlich Gesamtspurfläche, Spurflächenanteile und Überrollhäufigkeiten berechnen.

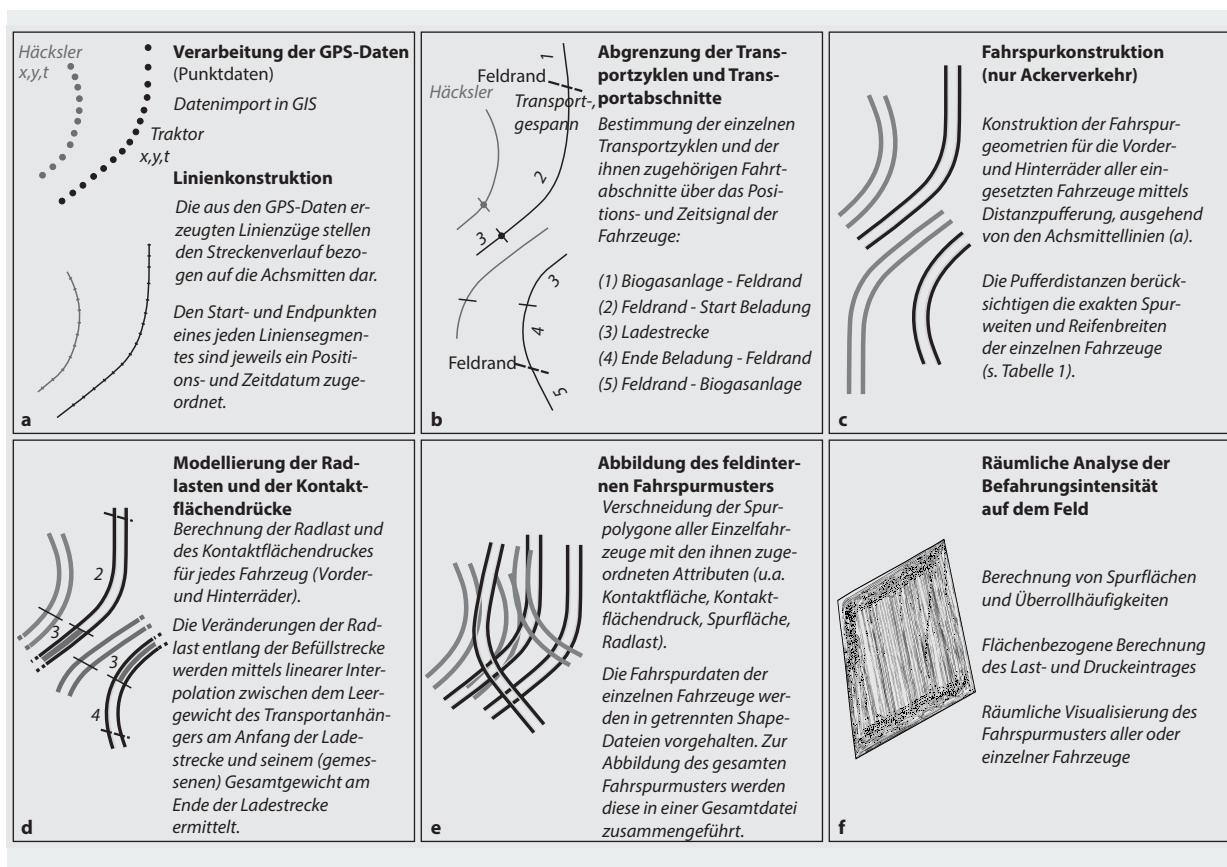


Abbildung 2

Modellierung des Ernte- und Transportverkehrs in einem Geographischen Informationssystem (Duttmann et al., 2013, S.103)

In Verbindung mit den technischen Fahrzeugeigenschaften, wie Reifeninnendruck und Radlast kann auf die mechanische Belastung der betrachteten Teilfläche des Schlagtes geschlossen werden. Die Auswirkungen auf die mit unterschiedlicher Intensität befahrenen Feldabschnitte können anschließend sowohl mit punktuellen bodenphysikalischen Methoden als auch mit einer ganzflächigen Ertragskartierung quantifiziert werden.

Begriffsbestimmungen

Der Begriff Transport- oder Abfuhrgespann wird für die Kombination aus Traktor mit angehängtem Silowagen verwendet. Die Gesamtstrecke der Transportgespanne beschreibt die bei Beladung auf dem Schlag, im Transfer zwischen Schlagzufahrt und Ladebeginn/-ende sowie beim Transport zwischen Substratlagerplatz und Erntefläche gefahrene Strecke.

Die Gesamtstrecke der Transportfahrzeuge wird in Erntestrecke und Transportstrecke untergliedert. Mit dem Begriff Erntestrecke wird der Streckenanteil der Beladung des Silowagens auf dem Schlag beschrieben. Die Transportstrecke der Abfuhrgespanne umfasst die auf der Straße zurückgelegten Distanzen und die feldinternen Fahrten von der Feldzufahrt zum Ladebeginn am Häcksler und zwischen Lade-end- und Feldausfahrt.

Die Fahrstrecken des Häckslers werden in die Erntestrecke und die Umsetzfahrten unterteilt. Als Umsetzfahrt wird die

Fahrt des Häckslers von einer Erntefläche zur nächsten bezeichnet.

Der Zeit- und Streckenabschnitt zwischen Verlassen des Substratlagerplatzes (Silowagen leer), Fahrt zur Erntefläche, Transferfahrt auf dem Schlag zum Häcksler, Beginn der Überladung bis Ladeende, Transferfahrt auf dem Schlag zur Feldausfahrt und Rückfahrt zum Substratlagerplatz (Silowagen voll) wird als Transportzyklus bezeichnet. Als Erntezyklus oder Beladungszyklus wird die im Transportzyklus enthaltene Teilstrecke der Beladung des Silowagens mit dem Erntegut verstanden, sie entspricht also der Distanz, die notwendig ist, um den Silowagen mit Maishäcksel zu befüllen.

3 Bilanzierung des erntebezogenen Transportverkehrs

Die bei der Ernte zurückzulegende Transportstrecke ist abhängig von der angebauten Kultur, dem Biomasseertrag und dem eingesetzten Ernteverfahren sowie von der Entfernung zwischen der Erntefläche und dem Lager- oder Umschlagplatz. In Bezug auf die Silomaisernte lassen sich folgende Verkehrsanteile voneinander unterscheiden: der eigentliche Erntevorgang durch den Häcksler und der Verkehrsanteil der Abfuhrgespanne. Letzterer lässt sich weiter untergliedern in

(a) den flächenexternen Verkehr zwischen Substratlagerplatz und Schlag, (b) den flächeninternen Verkehr unterteilt in Ladeverkehr und Transferstrecke sowie (c) den flächenexternen Streckenanteil zurück zum Substratlagerplatz.

3.1 Transportaufwand auf Straße und Feld

Eine Übersicht über die hier im Detail untersuchten Ernte- und Transportfahrten gibt Tabelle 2. Diese Intensivuntersuchungsflächen sind in Abbildung 1 durch die grau hinterlegten Parzellennummern gekennzeichnet.

Der Anteil des durch die Transportfahrzeuge feldintern zurückgelegten Streckenanteils an der Gesamtstrecke ist abhängig von der Entfernung der Erntefläche zum Substratlagerplatz. Je kürzer die Distanz zwischen Substratlager und

Erntefläche, desto größer der Anteil des feldinternen Transportverkehrs. Wie Tabelle 2 zeigt, hat Schlag 8 eine einfache Distanz zum Substratlager von 4,85 km. Auf den feldinternen Transportverkehr (Summe (b)) entfallen 12,48 km (8 %) der Gesamtstrecke der Transportfahrzeuge, mit 135,73 km (92 %) trägt der feldexterne Verkehr ((a)+(c)) jedoch den weit aus größeren Teil zur Gesamtstrecke bei. Vergleicht man diese Werte mit Schlag 3, dessen einfache Distanz zum Substratlagerplatz lediglich 1,02 km beträgt, entfallen hier 34 % des Verkehrs auf den feldinternen Transport, der feldexterne Streckenanteil macht hingegen 66 % (57,3 km) aus. Im Mittel der untersuchten Fahrten ist der feldinterne Transportverkehr mit rund 18 % an der Gesamtstrecke der Abfuhrgespanne beteiligt. Mehr als 80 % der Fahrstrecke entfallen auf die Fahrten zwischen Erntefläche und Substratlagerplatz.

Tabelle 2

Gesamtstrecken und absolute bzw. relative Streckenanteile von Ernte- und Transportfahrten für ausgewählte Intensivuntersuchungsflächen

Nr.	Fläche	Schlag	Transportfahrzeuge						Häcksler	
			Teilstrecken ²⁾						Gesamtstrecke (a)+(b)+(c)	Gesamt- strecke
			Straße (a)		Feld (b)		Straße (c)			
Nr.	Fläche	einfache Distanz Substrat- lager – Schlag	Substratlager bis Feld- grenze	Feldgrenze bis Lade- beginn	Lade- beginn bis Ladeende	Ladeende bis Feldgrenze	Feldgrenze bis Substratlager	Gesamtstrecke (a)+(b)+(c)	Gesamt- strecke	
	ha ¹⁾	m	m	m	m	m	m	m	m	
1	6,4	6.180	138.210	6.460	14.720	4.690	145.730	309.810	14.640 ²⁾ 14.160 ³⁾	
			45 %	2 %	5 %	1 %	47 %	100 %		
2	4,1	3.530	56.260	2.980	10.360	2.880	42.610	115.090	10.700 ²⁾ 9.070 ³⁾	
			49 %	3 %	9 %	2 %	37 %	100 %		
3	6,3	1.020	29.500	10.070	13.070	6.750	27.800	87.190	12.740 ²⁾ 14.080 ³⁾	
			34 %	11 %	15 %	8 %	32 %	100 %		
4	6,5	3.440	84.440	5.600	15.930	6.080	87.430	199.480	15.360 ²⁾ 14.520 ³⁾	
			42 %	3 %	8 %	3 %	44 %	100 %		
5	2,3	1.890	24.140	3.920	5.260	1.550	21.190	56.060	5.160 ²⁾ 5.200 ³⁾	
			43 %	7 %	9 %	3 %	38 %	100 %		
6	2,8	1.940	31.310	5.560	5.700	4.060	24.070	70.700	5.750 ²⁾ 6.320 ³⁾	
			44 %	8 %	8 %	6 %	34 %	100 %		
7	3,4	3.680	50.970	2.960	8.010	2.430	43.910	108.280	7.640 ²⁾ 7.480 ³⁾	
			47 %	3 %	7 %	2 %	41 %	100 %		
8	2,7	4.850	66.170	2.900	6.160	3.420	69.560	148.210	6.930 ²⁾ 6.080 ³⁾	
			45 %	2 %	4 %	2 %	47 %	100 %		
9	2,7	2.200	27.610	6.730	6.780	3.300	27.630	72.050	7.030 ²⁾ 6.000 ³⁾	
			38 %	9 %	10 %	5 %	38 %	100 %		
10	3,6	1.460	23.770	5.150	8.300	2.650	27.310	67.180	8760 ²⁾ 8070 ³⁾	
			35 %	8 %	12 %	4 %	41 %	100 %		

¹⁾ gerundet

²⁾ aus GPS-Daten berechnete Strecke

³⁾ berechnet aus Schlaggröße ÷ Arbeitsbreite (hier 4,5 m)

Betrachtet man die Gesamttransportstrecke in Relation zur Erntefläche, so zeigt sich, dass im Falle des hier untersuchten Gebietes, die Transportfahrzeuge im Mittel 30,27 km/ha Erntefläche zurücklegen. Die pro Hektar Erntefläche zurückzulegende Distanz für den Transport des Erntegutes verhält sich umgekehrt proportional zum feldinternen Streckenanteil an der Gesamttransportstrecke und korreliert direkt mit der Arbeitsbreite des Häcklers.

3.2 Feldinterner Transportaufwand

Die Streckenlänge für die feldinternen Zu- und Abfahrten der Transportgespanne wird beeinflusst durch die Schlagfläche, die Schlaggeometrie und den Biomasseertrag, letzterer hier dargestellt anhand der mittleren einfachen Länge einer Erntefahrt. Auch der Ausbau des landwirtschaftlichen Wegenetzes und die Anzahl der Feldzufahrten haben einen Einfluss auf den feldinternen Transportanteil. Dieser Aspekt soll in der hier vorgestellten Untersuchung jedoch vernachlässigt werden.

Wie in Tabelle 3 dargestellt beträgt das Verhältnis von Transport- zu Erntestrecke bei Schlag 8 näherungsweise 1 (1,03), d. h. die feldintern zurückgelegte Wegstrecke teilt sich zu etwa gleichen Teilen auf in den Ladeverkehr und die Transferfahrten zwischen Schlagzufahrt und Beginn bzw. Ende der Beladung. Betrachtet man Schlag 6 im Vergleich, beträgt der Quotient aus Transport- zu Erntestrecke 1,69, d. h. Transport- und Erntestrecke stehen im Verhältnis 2:1, der feldinterne Transportaufwand ist doppelt so hoch wie die für die Ernte zurückgelegte Wegstrecke.

Hohe Transportstreckenanteile stehen in engem Zusammenhang mit einer ungleichmäßigen Schlaggeometrie, bzw. einer ungünstigen Erschließung des Schlages durch das landwirtschaftliche Wegenetz. Je unregelmäßiger ein Schlag geformt ist und je weiter sein Längen-Breiten-Verhältnis,

desto größer ist die pro Erntefläche (ha) zurückzulegende gesamte, flächeninterne Fahrtstrecke. Dies verdeutlicht Abbildung 3.

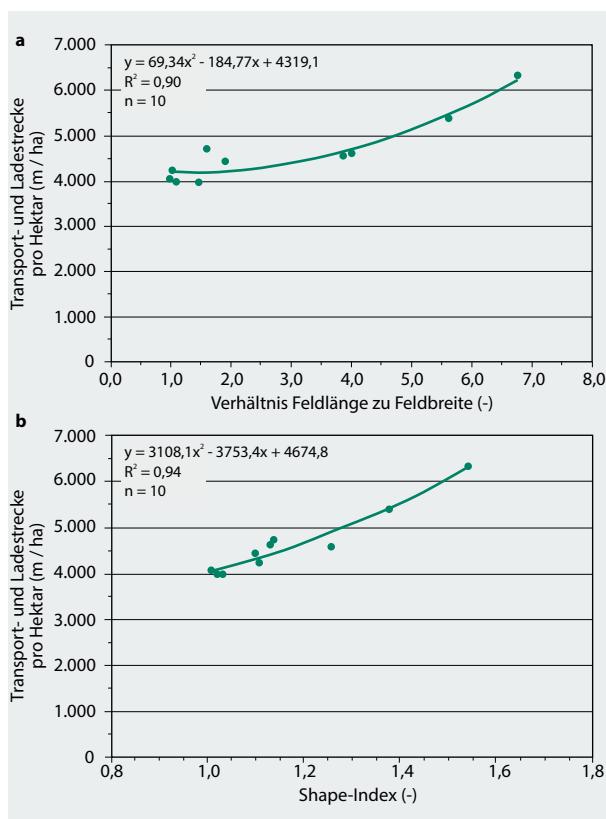


Abbildung 3
Zusammenhang zwischen der Länge der feldinternen Transportstrecke und der Schlaggeometrie (a: Verhältnis Schlaglänge/Schlagbreite; b: Formindex)

Tabelle 3

Feldinterner Verkehr in ausgewählten Schlägen, differenziert nach Teilstrecken für Transport und Beladung

Nr.	Schlag	Erntefahrten		Teilstrecken auf dem Schlag				Streckenverhältnis (1+3):(2)
		Fläche	mittlere, einfache Länge	Anzahl	Feldgrenze bis Ladebeginn (1)	Ladebeginn bis Ladeende (2)	Ladeende bis Feldgrenze (3)	
		ha	m	n	m	m	m	-
1	6,4	640	23	6.460	14.720	4.690	25.870	0,76
2	4,1	740	14	2.980	10.360	2.880	16.230	0,57
3	6,3	480	27	10.070	13.070	6.750	29.890	1,29
4	6,5	640	25	5.600	15.930	6.080	27.610	0,73
5	2,3	440	12	3.920	5.260	1.550	10.730	1,04
6	2,8	410	14	5.560	5.700	4.060	15.320	1,69
7	3,4	570	14	2.960	8.010	2.430	13.400	0,67
8	2,7	470	13	2.900	6.160	3.420	12.480	1,03
9	2,7	570	12	6.730	6.780	3.300	16.810	1,48
10	3,6	460	18	5.150	8.300	2.650	16.100	0,94

Der in Abbildung 3 verwendete Formindex f (in Anlehnung an Hulshoff, 1995) setzt den Flächenumfang eines Schläges mit dessen Flächengröße in Beziehung und drückt die Verlängerung der Umrisslinie im Verhältnis zu derjenigen eines Quadrates aus. Er errechnet sich aus

$$f = \frac{\text{Umfang}[m]}{\sqrt{\text{Fläche}[m^2]} \times 4}$$

Ackerschläge mit Formindizes nahe „1“, d.h. annähernd gleichlangen Seitenverhältnissen, weisen den geringsten feldinternen Transportaufwand in Bezug auf die abzuerntende Fläche auf, während zunehmende Formindizes mit einem wachsenden Streckenaufwand einhergehen (Abbildung 3b). Gleichtes gilt für die Zunahme des Verhältnisses von Feldlänge zu Feldbreite. Ergibt sich für ein Längen-Breiten-Verhältnis von „1“ rechnerisch eine feldinterne Transportstrecke von etwa 4,2 km/ha, so nimmt diese bei Annahme eines Verhältniswertes von „5“ auf ca. 5,1 km/ha zu (s. Abbildung 3a).

3.3 Schätzverfahren zur Ermittlung der Transportstreckenlänge bei Erntekampagnen

Die zurückzulegende Gesamtstrecke ist ebenso wie die feldinterne Fahrstrecke von der Anzahl der Transport- und Erntezyklen abhängig. Letztere steht ihrerseits in direktem Zusammenhang mit dem Flächenertrag an Biomasse, der Arbeitsbreite des Häckslers und der Ladekapazität des Transportanhängers.

Bei gegebener Maisgebissbreite und bekannter Ladekapazität lässt sich die Anzahl der Ernte- und Transportzyklen unter Berücksichtigung des erwarteten Flächenertrages und der Schüttichte des Häckselgutes für einzelne Schläge abschätzen. Die mittlere Länge der einfachen Erntestrecke ergibt sich dabei näherungsweise aus der Division der Schlaggröße (m^2) durch die Arbeitsbreite (m) und durch die Anzahl der Erntezyklen (s. Abbildung 4). Die auf diese Weise zu ermittelnde durch den Häcksler zurückgelegte Gesamtstrecke stimmt in der Größenordnung gut mit den im Rahmen der Untersuchungen gemessenen GPS-Strecken überein (Tabelle 2).

Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurden für den Praktiker Nomogramme abgeleitet, die eine Abschätzung des Gesamtstreckenaufwandes mit Hilfe der beiden Größen „einfache Entfernung zum Ernteschlag“ und „Größe des Ernteschlages“ gestatten (Abbildung 5 und 6).

Ihnen liegen die folgenden Bedingungen und Annahmen zugrunde:

1. die Arbeitsbreite des Maishäckslers beträgt 4,5 m (Abbildung 5) bzw. 6 m (Abbildung 6),

2. das Ladevolumen des Transportanhängers beträgt 50 m³,
3. die Schüttichte für Silomaishäcksel wird mit 276 kg/m³ angenommen (vgl. Leurs, 2006, S. 42 und DLZ-Agrarmagazin 06/2010, S. 4),
4. ein zu erwartendes Ertragsniveau für Silomais von gering (40 t FM/ha), mittel (50 t FM/ha) und hoch (60 t FM/ha) (s. KTBL, 2009, S.973),
5. die Ernteschläge besitzen annähernd gleiche Seitenlängen bzw. quadratische Form. Für Schläge mit abweichendem Längen-Breiten-Verhältnis oder ungleichmäßiger Form sind Zuschläge nach Tabelle 4 vorzunehmen:

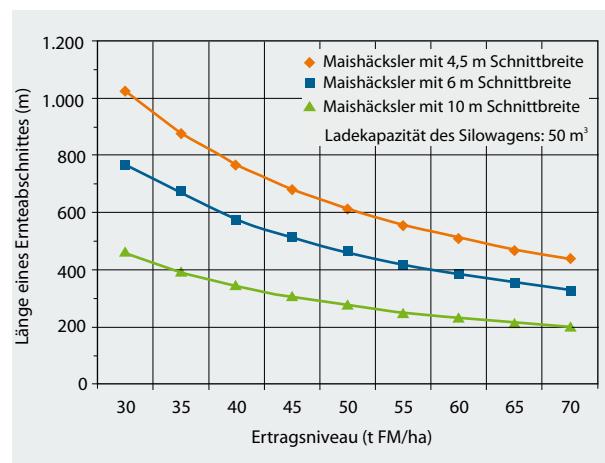


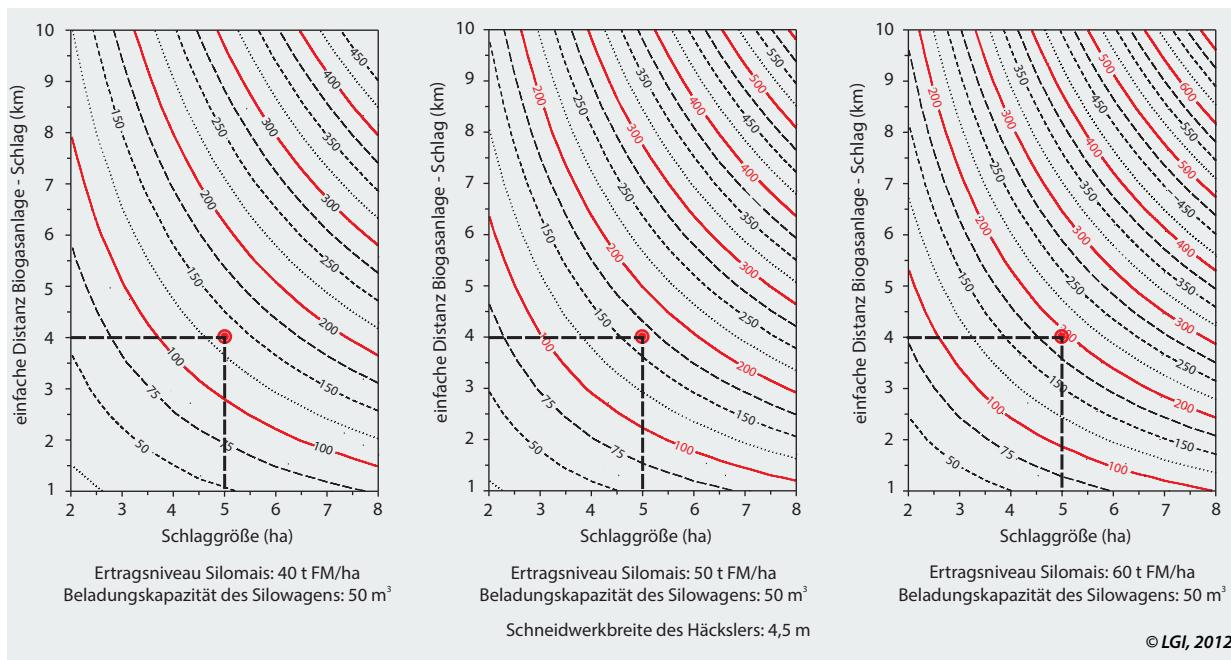
Abbildung 4

Abschätzung der Streckenlängen eines Ernteabschnittes in Abhängigkeit vom Ertragsniveau und der Arbeitsbreite für ein Transportvolumen von 50 m³ (angenommene Schüttichte der Maishäcksel: 276 kg/m³)

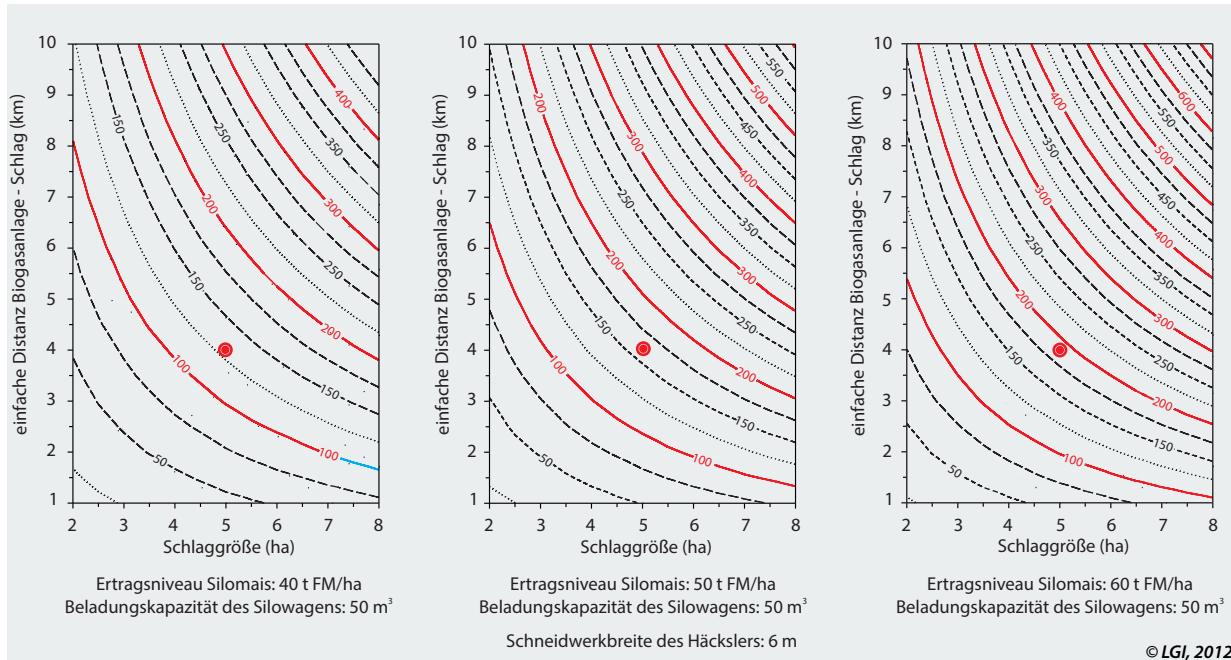
Tabelle 4

Zuschläge für nicht-quadratische Schlagformen basierend auf dem Quotienten Feldlänge zu Feldbreite oder auf dem Formindex f (siehe Kapitel 3.2)

Verhältnis Feldlänge/Feldbreite	Zuschlag auf Gesamtstrecke (m/ha)	Formindex	Zuschlag auf Gesamtstrecke (m/ha)
3	400	1,2	600
4	900	1,3	1.000
5	1.600	1,4	1.500

**Abbildung 5**

Nomogramm zur Abschätzung der Gesamttransportstrecke (km) (Straßen-, Wege- und Feldbefahrung) bei der Silomaisernte in Abhängigkeit von Ertragsniveau, Entfernung zur Biogasanlage und Schlaggröße für eine Arbeitsbreite von 4,5 m (Markierung: Beispiel für die Bestimmung des Befahrungsaufwandes bei einer Schlaggröße von 5 ha und einer Entfernung von 4 km zwischen Erntefläche und Substratlagerplatz bzw. Biogasanlage sowie dem Flächenertrag: 134 km (bei 40 t/ha), 166 km (bei 50 t/ha) und 198 km (bei 60 t/ha))

**Abbildung 6**

Nomogramm zur Abschätzung der Gesamttransportstrecke (km) (Straßen-, Wege- und Feldbefahrung) bei der Silomaisernte in Abhängigkeit von Ertragsniveau, Entfernung zur Biogasanlage und Schlaggröße für eine Arbeitsbreite von 6 m (Markierung: Beispiel für die Bestimmung des Streckenaufwandes bei einer Schlaggröße von 5 ha und einer einfachen Entfernung zwischen Erntefläche und Substratlagerplatz bzw. Biogasanlage von 4 km))

3.4 Abschätzung der Gesamtfahrstrecken von Ernte- und Transportfahrten im Einzugsgebiet von Biogasanlagen

Die für die beiden Biogasanlagenstandorte „Sehlem“ (Gebiet 1) und „Lamspringe“ (Gebiet 2; vgl. Abbildung 1) ermittelten Streckenbilanzen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Standorte unterscheiden sich durch die Größe ihres Einzugsgebietes sowie durch die räumliche Verteilung und die Gesamtfläche ihrer Silomaisschläge. Für die Anlage des Gebietes Sehlem wurden rund 42 ha Maisfläche geerntet, demgegenüber 71 ha Fläche für die Anlage am Standort Lamspringe (Tabelle 5).

Anlagenkonzepte mit dezentralen Substratlagerplätzen verlagern einen Teil des anfallenden Transportverkehrs aus der Erntekampagne heraus in den täglichen Anlagenbetrieb. Das Konzept der dezentralen Biogasanlage wurde hier nicht näher differenziert untersucht und beurteilt.

Entsprechend der größeren Distanzen zwischen den Schlägen und der Biogasanlage zeichnet sich das Gebiet Sehlem durch einen vergleichsweise hohen Streckenaufwand, d. h. durch ein deutlich ungünstigeres Verhältnis von Transportstrecke zu Erntefläche aus (s. Tabelle 5). Dieses liegt unter Annahme eines mittleren Flächenertrages von 50 t FM/ha bei etwa 35 km/ha. Dagegen ergibt sich für das Gebiet Lamspringe aufgrund der stärkeren Arrondierung der Schläge um die Biogasanlage herum ein wesentlich günstigerer Befahrungsaufwand von 24 km/ha. Bei einem für beide Gebiete angenommenem Silomaisertrag von 60 t FM/ha nimmt der Streckenaufwand im Gebiet Sehlem auf 41 km/ha und im Gebiet Lamspringe auf 29 km/ha zu. Die Werte machen deutlich, dass sich durch eine stärkere Konzentration der Silomaisschläge um die Biogasanlage herum eine deutliche Verringerung des Wege-, Zeit- und Kostenaufwandes erreichen ließe.

Unter Annahme eines mittleren bis hohen Flächenertrages ergeben sich für das Gebiet Sehlem rechnerisch Gesamttransportdistanzen von 1.473 km bis 1.728 km. Die gesamte vom Erntefahrzeug (Häcksler mit 4,5 m Arbeitsbreite) zurückgelegte Strecke beträgt 118 km. Entsprechend der größeren Anzahl und Fläche der Ernteschläge variiert die Transportdistanz im Gebiet Lamspringe in Abhängigkeit vom Ertragsniveau zwischen 1.724 km bei mittlerem Flächenertrag (50 t FM/ha) und

2.018 km bei einem hohen Ertrag von 60 t FM/ha. Für den Maishäcksler ergibt sich eine Gesamtstrecke von etwa 197 km.

4 Befahrungsintensitäten und Befahrungs-muster in ausgewählten Ernteschlägen

4.1 Spurfläche und Überrollhäufigkeiten

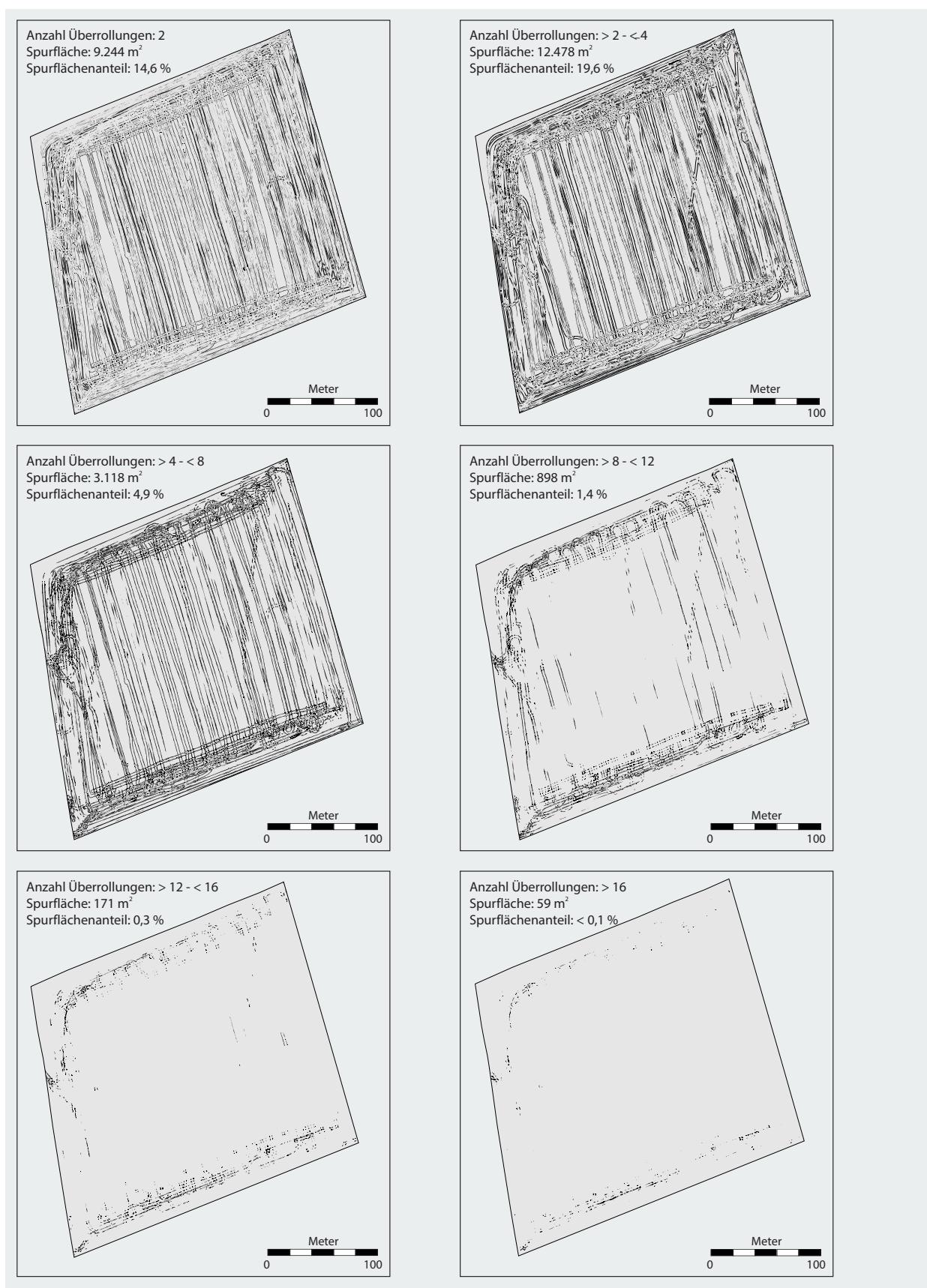
Die räumliche Verteilung der Spuren und die mit dem Ackerverkehr verbundenen Überrollhäufigkeiten sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 für zwei Schläge mit unterschiedlicher Form und Größe dargestellt. 14,6 % der Fläche des Schlags 1 (vgl. Abbildung 7) werden zwei Mal überrollt. Im Beispiel von Schlag 8 mit einem eher länglichen Grundriss gegenüber der annähernd quadratischen Schlagfläche 1, werden 21,1 % der Fläche zwei Mal überrollt (vgl. Abbildung 8). Je höher die Anzahl der Überrollungen, desto stärker nimmt der Flächenanteil an der Gesamtschlagfläche ab. Hohe Überrollhäufigkeiten treten insbesondere im Vorge-wende der Flächen, den längsseitigen Zufahrtstrecken und im Bereich der Feldzufahrten auf. Dies wird besonders in Abbildung 8 deutlich (vgl. Detailkarte rechts unten). Wie Tabelle 6 verdeutlicht, wurden mit der durchgeföhrten Unter-suchung Maximalwerte von mehr als 40 Überrollungen aufgezeichnet und räumlich verortet.

Eine Übersicht über die Spurflächenanteile der einzelnen Fahrzeuge und des gesamten feldinternen Ernte- und Transportverkehrs gibt Tabelle 6. Danach nimmt die Gesamtspur-fläche auf Schlag 8 einen Anteil von 63 % an der Schlagfläche ein. Betrachtet man die Spurfläche des Maishäckslers isoliert, so macht diese 35,7 % der Schlagfläche aus. Der alleinige Spurflächenanteil der Zugmaschinen beläuft sich auf etwa 40 %, derjenige der Transportanhänger auf rund 41 % (vgl. Tabelle 6). Die im Vergleich zum Häcksler höheren Spurflächenanteile des Abfuhrgespanns erklären sich aus den Transferfahrten auf dem Schlag. Beim Beladen begleiten Traktor und Silowagen den Häcksler, es fällt ungefähr die Wegstrecke des Erntefahrzeuges an. Hinzu kommen die Streckenanteile für die Fahrten zwischen Feldzufahrt und dem Beginn bzw. Ende der Überladung.

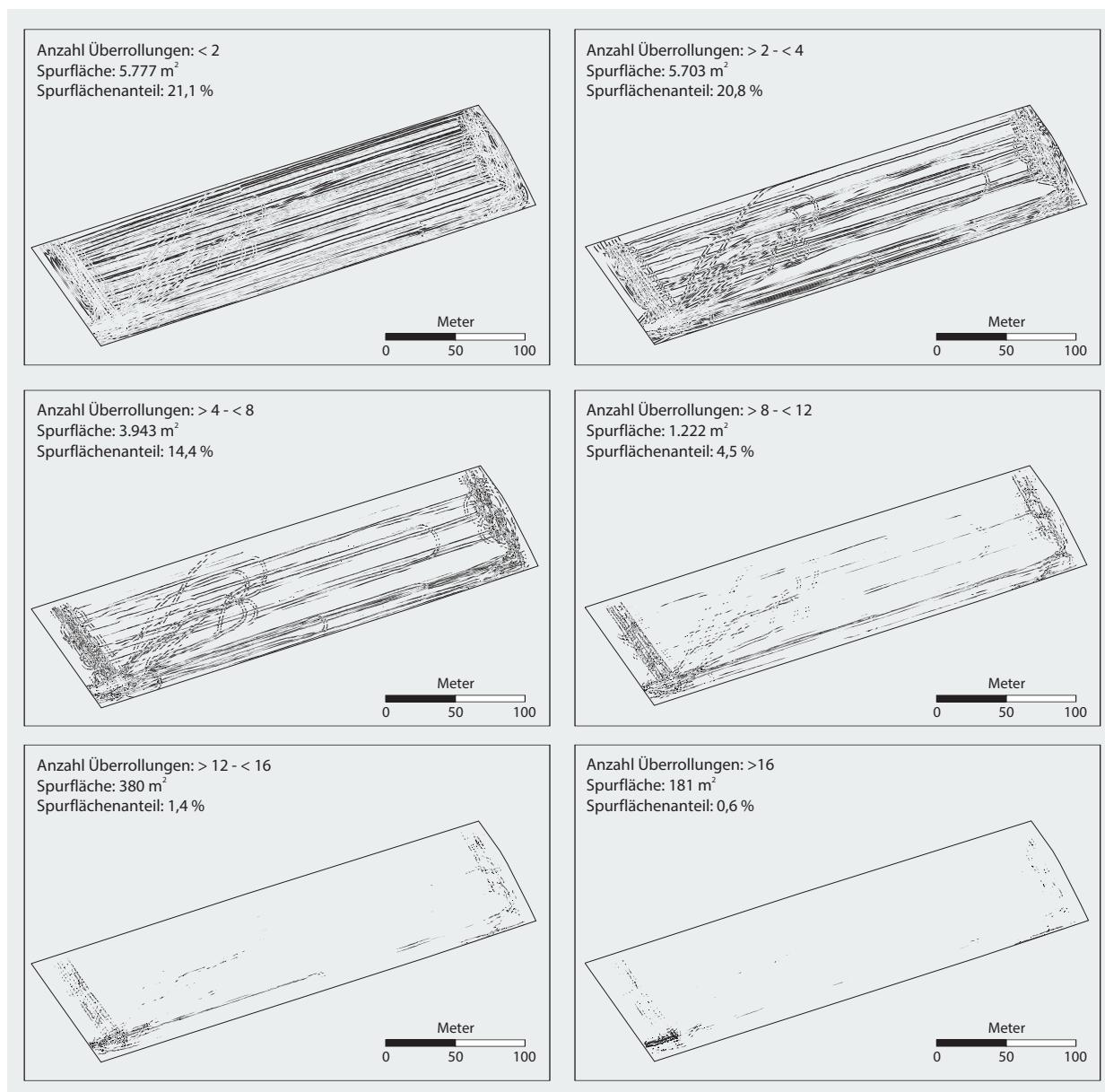
Tabelle 5

Gesamtfahrstrecke (km) und Streckenaufwand (km/ha Erntefläche) der Ernte- und Transportfahrzeuge in den Einzugsgebie-ten der Biogasanlagen Sehlem und Lamspringe in der Übersicht

Einzugsgebiet	Ernteschläge		Fahrstrecke	Transportzyklen, Transportstrecken und Streckenaufwand bei einem Ertragsniveau von					
				Häcksler			50 t FM/ha		
	Anzahl	Fläche	Ernte- und Umsetz-fahrten	Anzahl	Gesamt-strecke	Strecken-aufwand	Anzahl	Gesamt-strecke	Strecken-aufwand
	n	ha	km	n	km	km/ha	n	km	km/ha
Sehlem	9	42	118	152	1.473	35	182	1.728	41
Lamspringe	19	71	197	255	1.724	24	308	2.018	29

**Abbildung 7**

Spurfläche und Überrollhäufigkeiten von Ernte- und Transportfahrzeuge bei der Silomaisernte auf einem Schlag mit quadratischer Form (Schlag 1)

**Abbildung 8**

Spurfläche und Überrollhäufigkeiten von Ernte- und Transportfahrzeugen bei der Silomaisernte auf einem Schlag mit ungleicher Feldlänge und Feldbreite (Schlag 8)

Die aufgezeichneten Fahrspuren und die ermittelten Überrollhäufigkeiten machen deutlich, dass mit Blick auf die Verminderung und Vermeidung von Bodenverdichtung der Optimierung des Ackerverkehrs in den genannten Bereichen somit zentrale Bedeutung zukommt. Im Fokus stehen dabei insbesondere die mit hohen Radlasten wiederholt überrollten Teilflächen.

Die in Tabelle 6 dargestellte addierte (kumulierte) Spurfläche aller Fahrzeuge erscheint insgesamt hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Häcksler und Transportfahrzeuge in getrennten Spuren gefahren sind. Unter den gegebenen Bodenfeuchtebedingungen ist diese Abfuhrlogistik allerdings als sinnvoll zu betrachten, wie die parallelen Messungen von Bodenfunktionen (Luftkapazität, Wasserleitfähigkeit) im Unter-

boden belegen (s. Brunotte, 2013). Wären die Abfuhrge spanne der Spur des Häckslers gefolgt, wäre es zu einer Erhöhung der Spurfläche mit 6-facher Überrollung und damit zu einer entsprechend starken Beeinträchtigung der Bodenfunktionen im Unterboden gekommen – auch wenn sich die Gesamtspurfläche des Ackerschlags reduziert hätte. Das bedeutet, dass sich die Abfuhrlogistik, d. h. die Entscheidung zur Erhöhung des Spurflächenanteils und Verringerung der Überrollhäufigkeit oder zur Konzentration des Lasteineintrages auf weniger Spurfläche immer an den aktuellen Bodenfeuchtebedingungen orientieren muss. Eine einfache Formel, welcher Weg aus Sicht des vorsorgenden Bodenschutzes sinnvoll ist, kann hier nicht gegeben werden und muss immer als Einzelfallentscheidung getroffen werden.

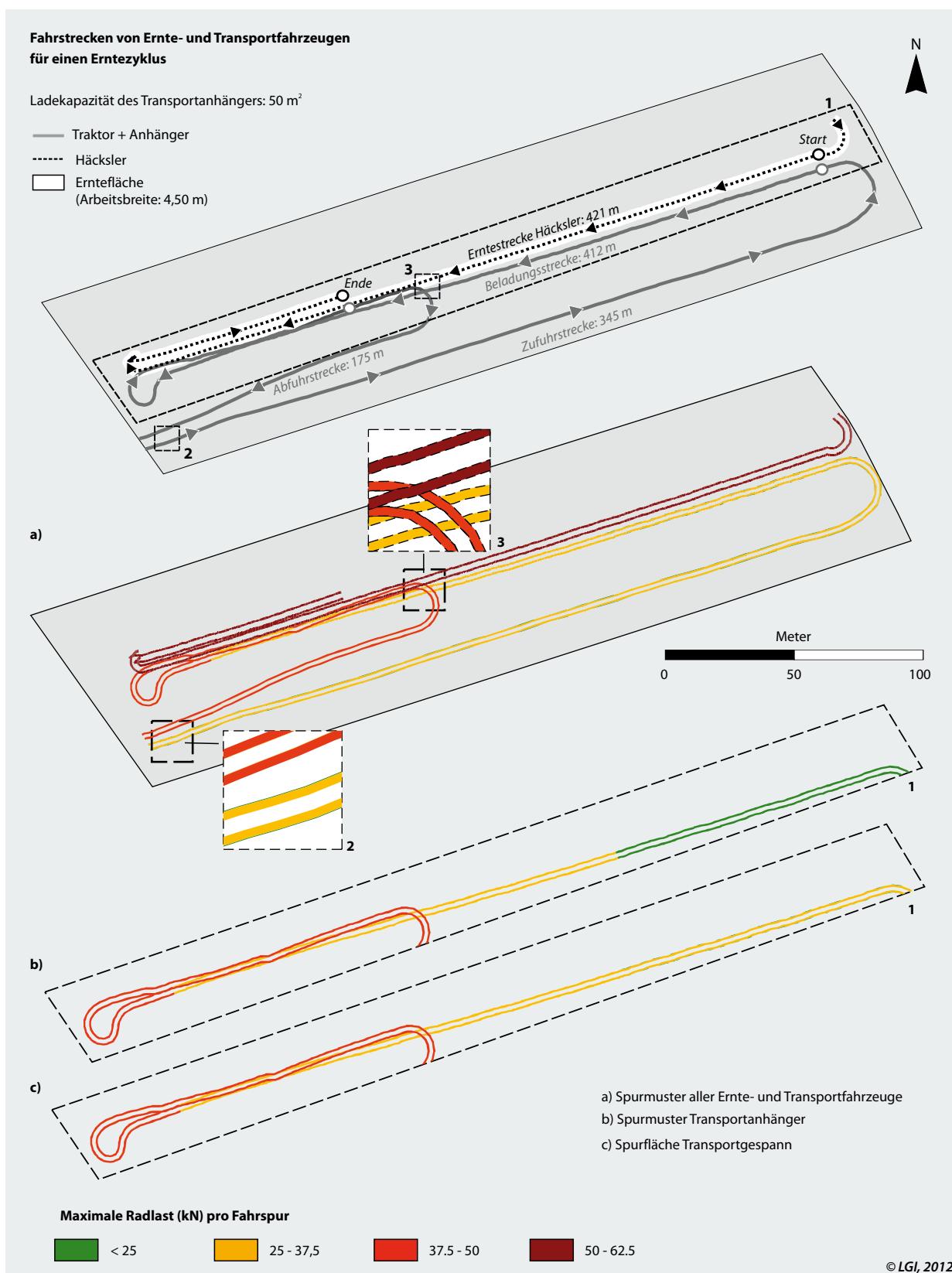


Abbildung 9

Räumliche Verteilung der maximal in einer Fahrspur auftretenden Radlast, dargestellt für einen Erntezyklus (Schlag 8)

Tabelle 6

Spurflächenanteile und Überrollhäufigkeiten der Ernte- und Transportfahrzeuge auf Schlag 8

Fahrzeug	Überrollte Fläche in % Feldfläche			Überrollungen max. Anzahl	
	Anzahl Überrollungen				
	2	4	> 4		
Häcksler	30,7	4,2	0,8	35,7	
Traktor	29,1	8,0	2,5	39,6	
Silowagen	29,6	8,7	3,0	41,3	
alle Fahrzeuge	21,1	20,8	20,9	62,8	
				42	

4.2 Räumliche Verteilung der Radlasten

Die Radlast kann u.a. als möglicher Indikator zur Beurteilung der potentiellen Bodenfunktionsgefährdung durch den Ackerverkehr herangezogen werden. Mit Hilfe des Verteilungsmusters der Radlasten können Fahrspurabschnitte mit einer hohen mechanischen Belastung des Bodens durch den Ackerverkehr lokalisiert und räumlich sichtbar gemacht werden.

Abbildung 9 stellt die für einen Ernte- und Transportzyklus exemplarisch berechneten Radlasten fahrspurbezogen dar. Bei den dort abgebildeten Radlasten handelt es sich um die in einer Spur mindestens einmal eingetragene maximale Radlast. Sie berücksichtigen die im Zuge des Beladungsvorganges erfolgende Zunahme der Anhängerradlast (dynamische Radlastentwicklung) mit. Die Radlaständerung während der Beladung wurde unter Annahme einer gleichmäßigen Fahrgeschwindigkeit über eine lineare Interpolation zwischen dem Leergewicht des Transportanhängers am Startpunkt und dem Gesamtgewicht am Ende der Transportstrecke berechnet.

Unter den hier gegebenen Bedingungen beträgt die maximal in einer Fahrspur eingetragene Radlast etwa 60 kN. Diese Radlasten sind kennzeichnend für die Vorderräder des

Häckslers. Der Silowagen übt bei voller Beladung eine Radlast von etwa 54 kN aus. Nach van den Acker et al. (2003) sind Radlasten von mehr als 50 kN als „hoch“ anzusehen. Diserens (2009) geht davon aus, dass Achslasten von mehr als 10 t/ha (entspricht rechnerisch einer Radlast von 50 kN) mit dem Risiko einer schweren Bodenverdichtung verbunden sind. Sowohl die durch den Häcksler als auch die durch den voll beladenen Silowagen ausgeübten Radlasten können vor diesem Hintergrund als kritisch eingestuft werden. Die Auswirkungen aller technischen Parameter (Radlast, Kontaktflächen- druck, Reifeninnendruck, ...) auf die Veränderung der Bodenstruktur ist ausschnittsweise in Kapitel 5 (Abbildung 12, 13) dargestellt.

Betrachtet man diejenige Spurfläche, die mindestens einmal mit einer Radlast von mehr als 50 kN überrollt wurde, wird deutlich, dass den reinen Transferfahrten der Abfuhrgespanne nach Beendigung der Beladung hin zur Feldausfahrt, hinsichtlich der Reduzierung des Lasteintrages in den Boden erhebliche Bedeutung zukommt (vgl. Abbildung 10). Sowohl in Abbildung 10a als auch in Abbildung 10b sind für die Radlastklasse ≥ 50 kN die orangenen Balken (Spurfläche ohne Zu- und Abfahrten auf dem Schlag) deutlich kleiner als die braunen Balken der Klasse (Spurflächen für gesamten Transportzyklus).

Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, wirken auf 28,1 % der durch die Abfuhrgespanne feldintern belasteten Spurfläche maximale Radlasten von ≥ 50 kN. Legt man eine lineare Entwicklung der Radlast zugrunde, entspricht dies einem Fahrtstreckenanteil von circa 300 m. Betrachtet man die während der Beladung durch die Abfuhrgespanne zurückgelegte Wegstrecke, reduziert sich der mit maximaler Radlast (≥ 50 kN) belastete Spurflächenanteil auf 12,8 % bzw. einen Wegstreckenanteil von rund 80 m. Bezogen auf die im Verlaufe eines Ernte- und Transportzyklus von allen Fahrzeugen erzeugte Spurfläche, beläuft sich der Anteil der mit Radlasten von ≥ 50 kN befahrenen Fläche auf 55,9 %. Mehr als ein Drittel davon entfällt auf den reinen Abtransport.

Wiederholtes Befahren einer Spur mit gleicher oder höherer Last entspricht einer stufenweisen Erhöhung der Radlast

Tabelle 7

Fläche der in einer Fahrspur auftretenden maximalen Radlasten für einen Erntezyklus auf Schlag 1

Art der Befahrung	Spurfläche (m ²) und Spurflächenanteile (%) ¹⁾ folgender Radlastklassen							Spurfläche gesamt m ²	Fahrtstrecke gesamt m
	< 25 kN	25 - 30 kN	30 - 35 kN	35 - 40 kN	40 - 45 kN	45 - 50 kN	≥ 50 kN		
Transportfahrten – ohne feldinterne Zu- und Abfahrt –	12	10	379	135	135	120	116	908	639
Transportgespann	1,3 %	1,1 %	41,7 %	14,9 %	14,9 %	13,2 %	12,8 %	100 %	
Transportfahrten – mit feldinterner Zu- und Abfahrt –	12	10	719	135	135	120	455	1.586	1.104
Transportgespann	2,8 %	0,6 %	44,4 %	8,3 %	8,3 %	7,4 %	28,1 %	100 %	
Ernte- und Transportfahrten	45	10	702	95	109	120	1.370	2.451	1.743
Transportgespann und Häcksler	1,8 %	0,4 %	28,6 %	3,9 %	4,4 %	4,9 %	55,9 %	100 %	

¹⁾ bezogen auf die Spurfläche der beteiligten Fahrzeuge

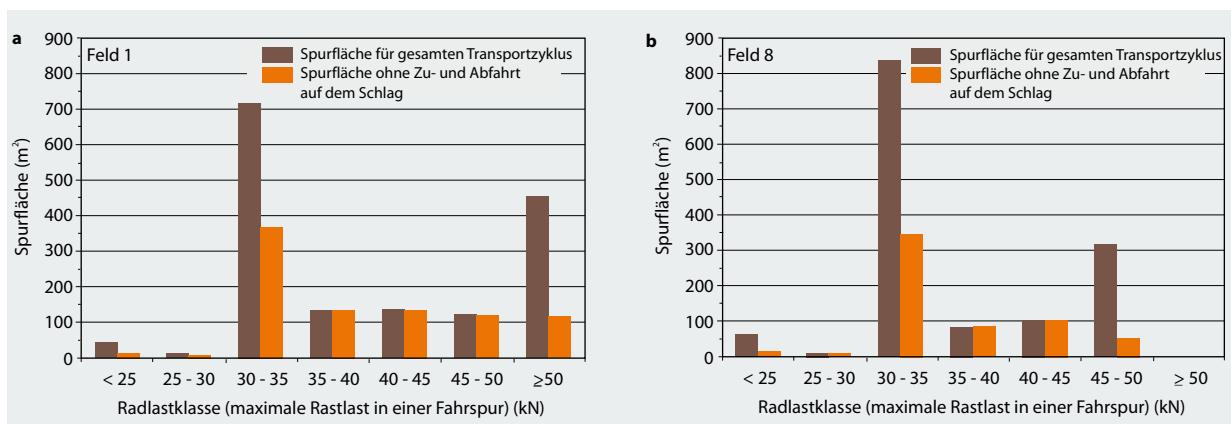


Abbildung 10
Spurflächenanteile einzelner Radlastklassen, dargestellt für je einen Transportzyklus in Schlag 1 und 8

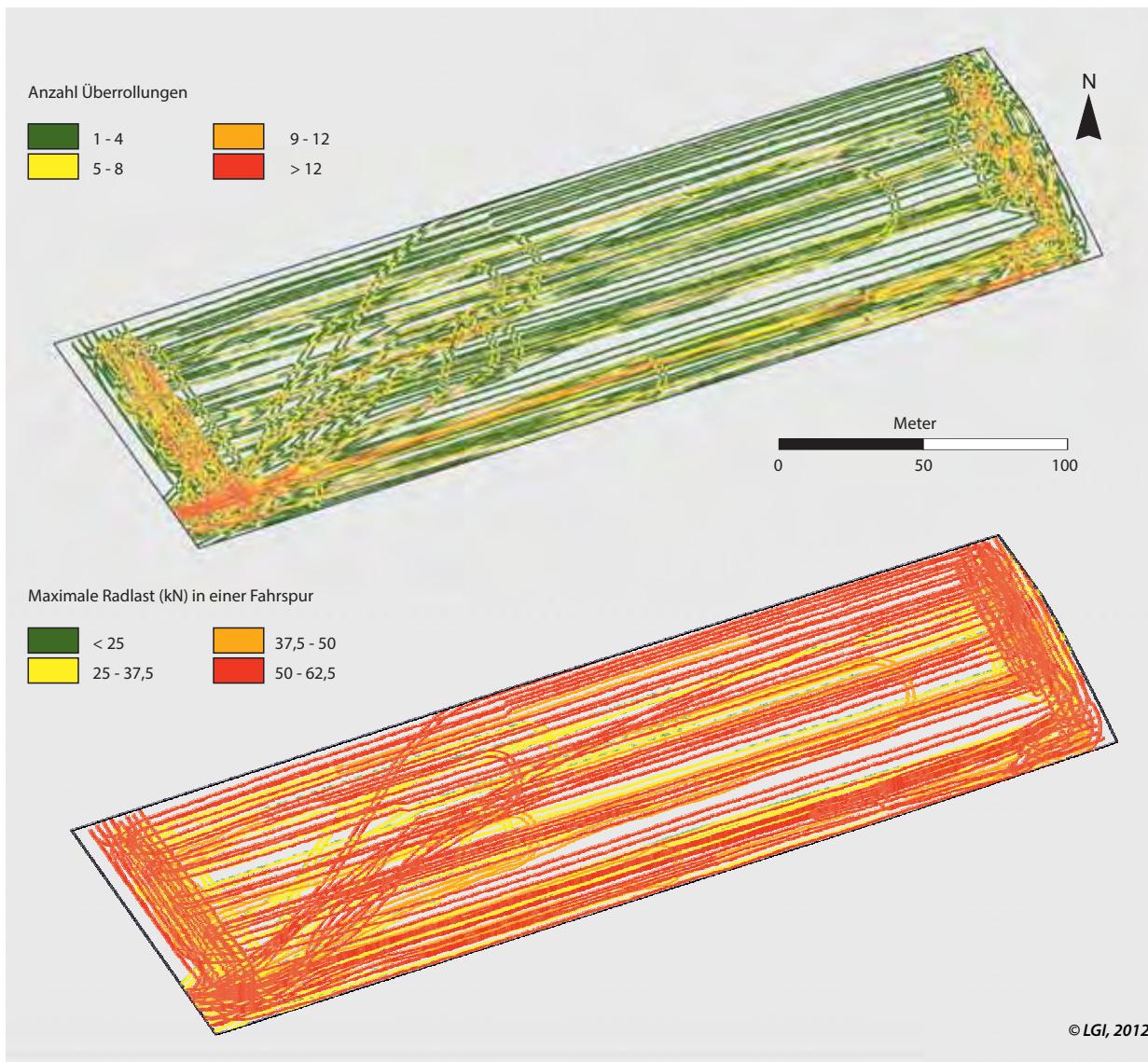


Abbildung 11
Spurmuster der Überrollhäufigkeiten und Radlastverteilung aller auf einem Ernteschlag eingesetzten Fahrzeuge (Duttmann et al., 2013, S.105f, verändert)

und führt damit zu einer zunehmenden Beanspruchung des Unterbodens (s. Brunotte und Sommer, 2007). Wie die für ein Feld (Schlag 8) dargestellten Befahrungsmuster zeigen, treten Spurabschnitte, die mehrfach unter hoher Radlast überrollt werden, konzentriert in den Vorgewenden und im Bereich der Feldauffahrt auf (Abbildung 11). Ein größerer Anteil an Spurfläche, die wiederholt mit hoher Radlast überrollt wird, entfällt zudem auf die Rückfahrten des beladenen Transportgespanns. Die in Tabelle 8 dargestellte Spurflächenbilanz macht deutlich, dass etwa 70 % der Gesamtspurfläche im Minimum zweimal mit einer Radlast von über 50 kN überrollt werden. Hieran sind die Transferfahrten der beladenen Transportgespanne mit mehr als einem Viertel beteiligt. Nur rund 30 % der Gesamtspurfläche wird mit einer als weniger kritisch betrachteten maximalen Radlast von < 50 kN befahren. Eine Optimierung des Ackerverkehrs mit dem Ziel, schädliche Veränderungen von Bodenfunktionen durch Belastung zu vermeiden, muss also insbesondere die mit hohen Radlasten befahrene Fläche auf ein notwendiges Maß beschränken (Abbildung 12, 13).

Tabelle 8
Spurflächenanteile differenziert nach Überrollhäufigkeiten und Radlasten auf einem Feld (Schlag 8)

Überrollungen	Spurflächenanteil (%) ¹⁾				
	überrollt mit einer maximalen Radlast (kN) von				
n	< 25	25 - 37,5	37,5 - 50	50 - 62,5	
≤2	0,8	1,9	0,8	30,1	
> 2 - ≤ 4	-	13,8	7,6	11,8	
> 4 - ≤ 6	-	0,5	0,6	12,7	
> 6 - ≤ 8	-	1,3	2,2	5,6	
> 8 - ≤ 10	-	< 0,1	0,1	4,5	
> 10 - ≤ 16	-	0,2	0,4	4,0	
> 16 - ≤ 20	-	-	-	0,7	
> 20	-	-	-	0,4	
Summe	0,8	17,8	11,7	69,8	

¹⁾ bezogen auf die Gesamtspurfläche (17.206 m²)

Durch die Untersuchung zur Ernte- und Transportlogistik auf dem Acker ist deutlich geworden, dass Spurflächenanteile und Überrollhäufigkeiten reduziert werden können. Hierzu können Informationssysteme an Häcksler und Transportfahrzeug direkt beitragen. Heutige Techniken, wie Steuerung des Auswurfkrümmers, sorgen mithilfe einer digitalen 3-D-Bildanalyse für eine automatische Befüllung der Transporteinheiten bei Tag, Nacht und Dunst, wodurch der Silowagen optimal befüllt wird. Zukünftig sollte diese Information an die anderen Transportfahrzeuge übermittelt werden, so dass dann gezielt der Wechselpunkt zweier Fahrzeuge angesteuert werden kann. Dies würde eine Minderung des Spurflächenanteils und der Überrollhäufigkeit bedeuten. Da das ablösende Transportfahrzeug just-in-time auf günstigstem Weg erst dann zum Häcksler fährt, wenn der vorherige Silowagen maximal befüllt ist.

Bei jeglicher Befahrung muss im Vorfeld eine Anpassung der Häcksel- und Transporttechnik an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens erfolgen. Zu diesem Zweck wurde ein Planungsinstrument entwickelt, dem 15-jährige Belastungsversuche, Statuserhebungen und Ergebnisse aus Bodendauerbeobachtungsflächen (=BDF) zugrunde liegen (Brunotte et al., 2011a). Die Experten gestützte Entscheidungsmatrix (siehe Abbildung 12) nimmt nach einer Plausibilitätsanalyse die Einstufung der Maschinen in Abhängigkeit ihrer „mechanischen Bodenbelastung“ in Krume und nahem Unterboden bzw. ihrem „Beitrag zum Boden schonenden Befahren“ vor.

Die Matrix ist gekennzeichnet durch ein Quadratraster mit 5 Stufen. Auf der X-Achse wird die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit abgetragen. Sie kann entweder sehr schnell mithilfe der Zustandsformen des Bodens nach der KA 5 (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) oder aufwendiger mit einer Feldgefügeansprache (Brunotte et al., 2011b) festgestellt werden. Auf der Y-Achse der Entscheidungsmatrix ist die mechanische Bodenbelastung durch den Maschineneinsatz klassifiziert.

Dem Vorsorgegedanken des Bodenschutzes wird dann Rechnung getragen, wenn der Maschineneinsatz sich der zum Zeitpunkt der geplanten Befahrung aktuell herrschenden Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes anpasst. Würde umgekehrt der Boden auf die nicht angepasste mechanische Belastung durch die Maschinen reagieren, kann es schnell zu einer erhöhten Gefährdung der Bodenfunktionen kommen. Als Belastungsparameter wurden berücksichtigt: die Radlast, die Kontaktfläche, der mittlere Kontaktflächen- druck, der Reifeninnendruck, der Spurflächenanteil, die Überrollhäufigkeit, die Schlaglänge und die Bodenbearbeitung.

(1) Bewertung des Verfahrens

Am Beispiel der Silomaisernte wird die Bewertung der mechanischen Belastung auf den Boden mithilfe bodenphysikalischer Parameter (vgl. bodenphysikalische Kennwerte nach KA 5; Ad-Hoc-AG Boden, 2005) vorgenommen. Als Kontrolle wird die unbefahrene Ausgangsvariante z. B. in 30 cm Tiefe mit einer Wasserleitfähigkeit (kf) von 35 cm/d, also der Stufe „kf3 - mittel“ (siehe Abbildung 13) herangezogen.

5 Maßnahmen zur Optimierung des erntebezogenen Transportverkehrs auf Ackerschlägen

Grundsätzlich unterliegen die Arbeitsgänge zur Ernte von Silomais dem Zielkonflikt Feldhygiene/Bodenschutz. Damit ein der Ernte folgender Mulcharbeitsgang möglichst viel stehende Maisstoppeln zerkleinern kann, sollten Häcksler und Transportfahrzeug derselben Spur folgen. Dies bedeutet allerdings eine Erhöhung der Überrollhäufigkeit, die insbesondere bei feuchten Bodenzuständen mit einer zunehmenden Bodenverdichtungsgefahr verbunden ist. Die Empfehlungen, die hier gegeben werden, beziehen sich ausschließlich auf den Aspekt Bodenschonung.

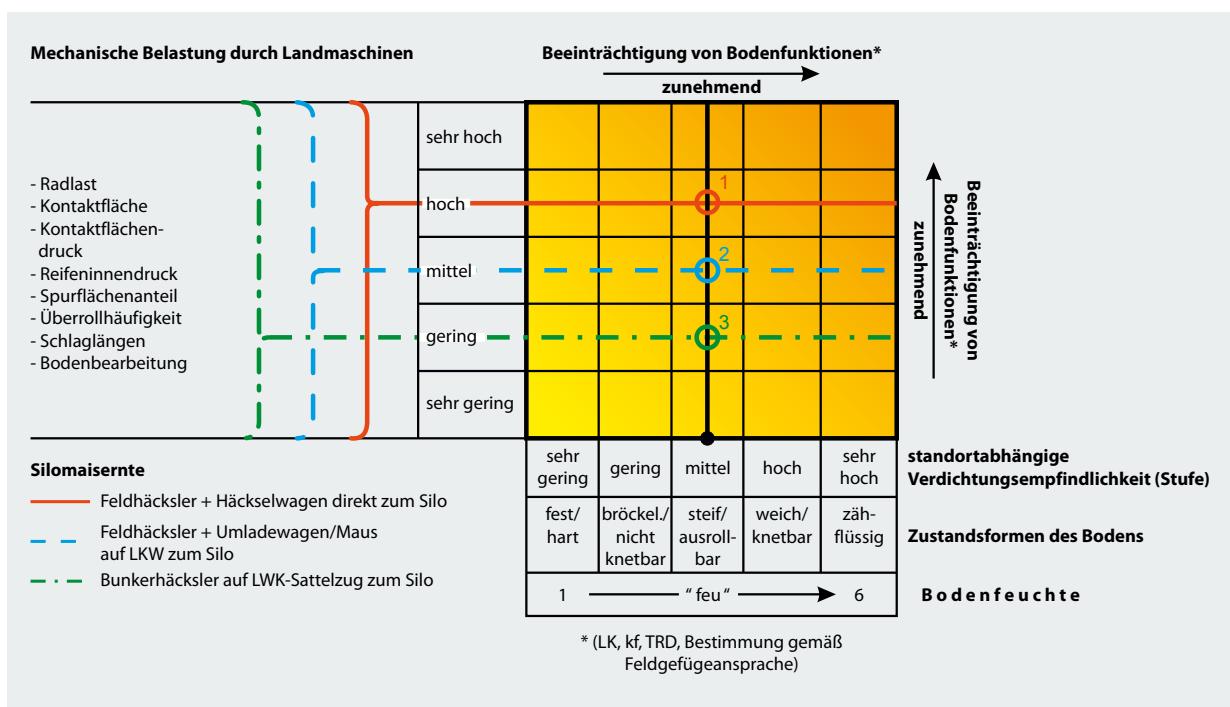


Abbildung 12

Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Bodenbelastung (Y-Achse) am Beispiel der Silomaisernte (Brunotte et al., 2011a, erweitert)

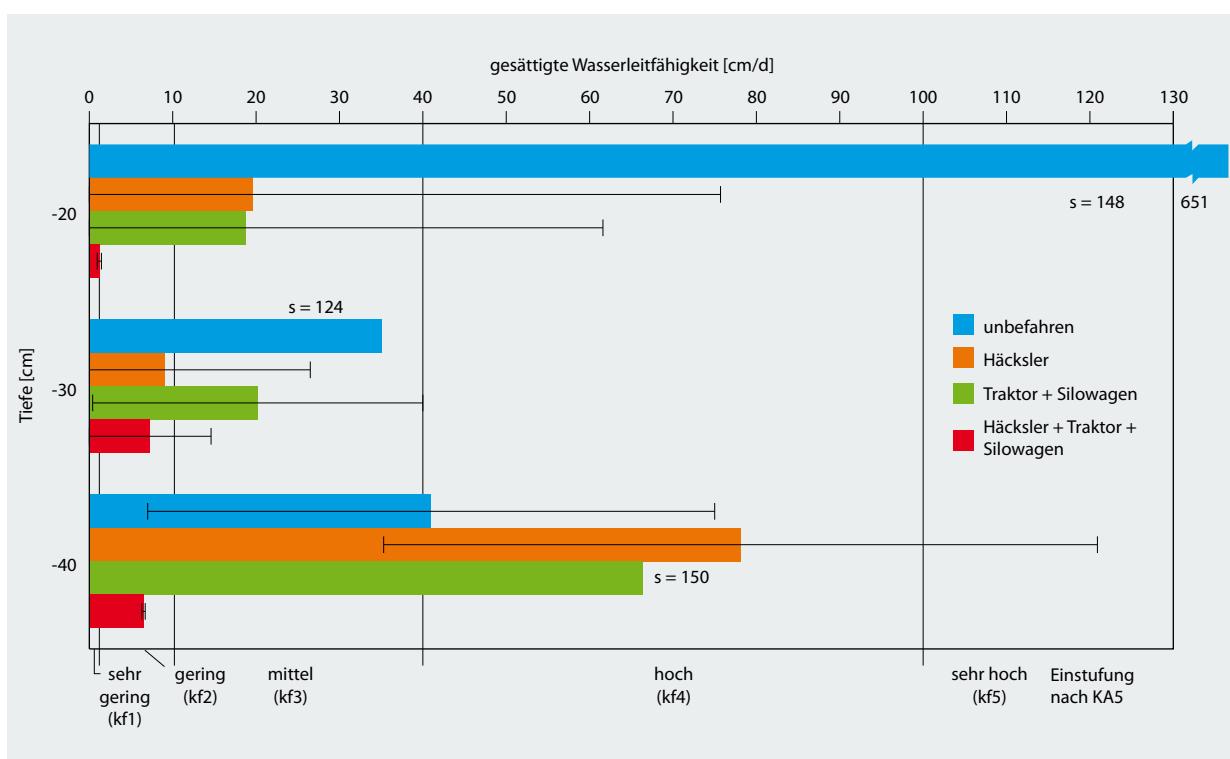


Abbildung 13

Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch Befahrung bei der Silomaisernte (Ut2-3, Lö), (Brunotte et al., 2011a)

Erfolgt durch die Befahrung mit Silomaishäcksler + parallelfahrendem Transportfahrzeug (= hohe Überrollhäufigkeit und hoher Reifeninnendruck von 3 bar für die Straßenfahrt) eine Reduzierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit in 30 cm Tiefe auf 8 cm/d, so liegt nur noch die Stufe „kf2 – gering“ vor. Die mechanische Belastung der Verfahrenskette Silomaisernte wird als reziproker Wert der kf-Stufe gebildet; in diesem Beispiel ist die mechanische Belastung folglich als „hoch“ zu klassifizieren. Diese Einstufung wird auf die Y-Achse der Entscheidungsmatrix übertragen. Der Schnittpunkt mit der standörtlichen Verdichtungsempfindlichkeit erlaubt Aussagen über die Gefährdung von Bodenfunktionen durch die Befahrung. Der zu betrachtende Beispielstandort toniger Schluff (Ut 2-3, Lö) mit 700 mm/a Niederschlag und der Bodenfeuchte „feu 3-4“ während der Erntezeit, ist in seiner Verdichtungsempfindlichkeit in der Stufe „mittel“ einzustufen (=schwarze vertikale Gerade in Abbildung 12).

Der Schnittpunkt 1 der durchgezogenen horizontalen Maschinengeraden in Abbildung 12 (rot = Häcksler + parallelfahrendes Transportfahrzeug) mit der vertikalen Standortgeraden liegt im „kritischen“ Bereich (dunkel gelb). Infolgedessen kann die Verfahrenskette im Mittel der Fälle kaum Boden schonend auf dem skizzierten Standort eingesetzt werden. Ein Befahren im „günstigen“ Bereich (Schnittpunkt 2, Abbildung 12) gelingt nur, wenn die mechanische Belastung in die Stufe „mittel“ (blau) verschoben wird. Dies kann durch eine Trennung von Feld- und Straßentransport erzielt werden: der Silowagen fährt in versetzten Spuren auf dem Acker mit um mehr als 1 bar reduziertem Reifeninnendruck, das Erntegut wird mittels stationärer oder mobiler Verladestation am Feldrand auf LKWs überladen. Der Einsatz von speziellen breit bereiften Überladewagen würde die Situation weiter entspannen. Eine weitere Verbesserung der

Bodenschonung kann mit einem Bunkerhäcksler erzielt werden, der am Feldrand direkt auf LKW-Züge überlädt. Der dann erreichte Schnittpunkt 3 (grün, Abbildung 12) zeigt eine weitere Schonung der Bodenfunktionen an und würde einen Einsatz auch bei zunehmender Feuchte („feu 4-5“) zulassen. Durch die Hundeganglenkung dieser Technikvariante (Räder der Vorder- und Hinterachse fahren räumlich gegeneinander versetzt) wird die Überrollung auf ein- bis zweimal reduziert. Durch die größere Bereifung wäre ein Reifeninnendruck < 1,5 bar möglich. Voraussetzung ist, dass die Schlagslänge an die Bunkerkapazität angepasst wird (Brunotte und Fröba, 2007; Brunotte et al., 2011a). Bei der vorgestellten Entscheidungsmatrix handelt es sich um ein expertengestütztes Planungsinstrument, mit dem eine grobe Voreinschätzung der Maschinenbelastung in Krume und nahem Unterboden möglich ist. Dies hilft, die Investitionen in die auf dem Betrieb vorgehaltene Technik und deren Einsatz zur Ernte genauer zu planen. Die tatsächliche Veränderung der Bodenstruktur durch die Befahrung wird dann mithilfe der Erfolgskontrolle festgestellt.

(2) Akzeptanz für das Planungsinstrument

Die Entscheidungsmatrix zur Planung von Maschineninvestitionen und –einsatz ist ein relativ neues Instrument für die Praxis. Erste Praxisanwendungen zeigen, dass die Herangehensweise durch den Praktiker als plausibel beurteilt wird. Die Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit der eigenen Ackerschläge mithilfe der Feldgefügeansprache (Brunotte et al., 2011b) wird in Seminaren und auf Feldtagen gut angenommen. Die Einstufung der Mechanisierungsketten durch wissenschaftliche Untersuchungen und Befahrungsversuche wird in der Praxis geteilt – eigene Messergebnisse für die mechanische Belastung liegen den Landwirten

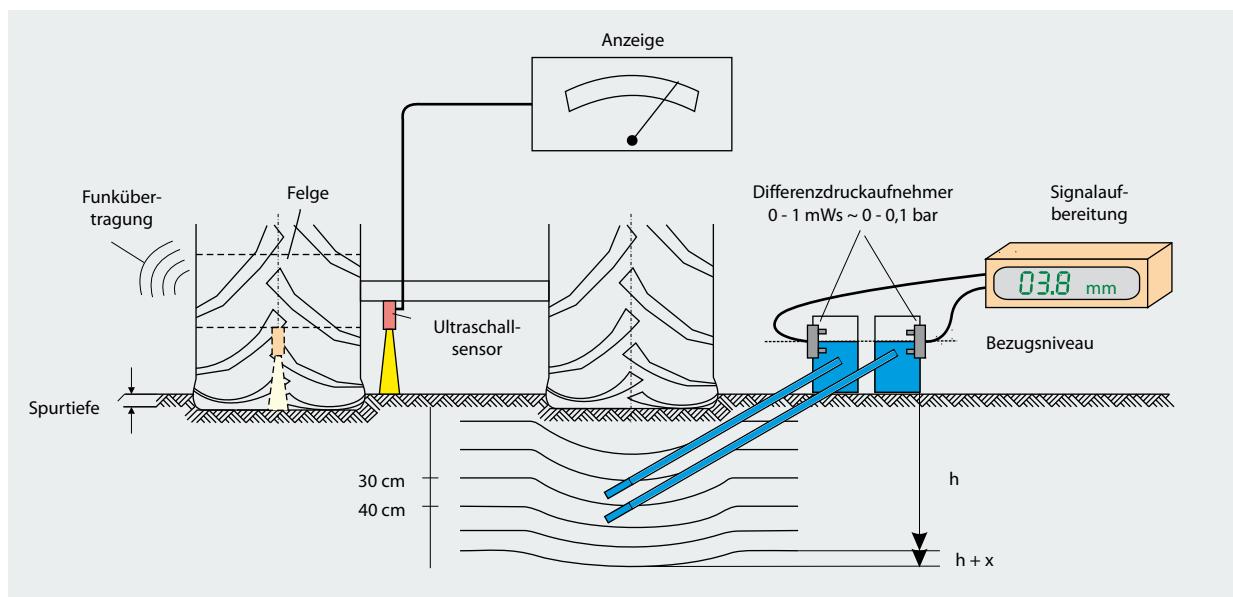


Abbildung 14

Multisensorsystem mit hydrostatischer Setzungsmessung und Ultraschallsensoren an landwirtschaftlichen Maschinen – Prototyp (Nolting et al., 2006)

nicht vor. Zukünftig wird es darauf ankommen, die Entscheidungsmatrix bei Kaufgesprächen in der Beratung mit einzusetzen. Nur so können Kriterien zur Maschinenauslastung auf Standort und Betrieb abgestimmt werden.

Eine sorgfältige Planung zum Maschineneinsatz berücksichtigt zwar Bodenart und Niederschlagsmenge, nicht aber den aktuellen Bodenzustand zum Zeitpunkt des Befahrens. Zu diesem Zweck ist ein Multisensorsystem zur Erfolgskontrolle der Befahrung hilfreich. Um dynamische Befahrungs effekte abzubilden, sind „in-situ“-Messungen erforderlich. Eingesetzte starre bzw. flexible Sonden (Bolling, 1987; Stahl et al., 2005; Lebert, 2010) zur Messung des Bodendruckes geben nur einen indirekten Hinweis auf die im Boden unter Last auftretenden Verformungsprozesse, da durch den Bodendruck induzierte Setzungen nicht erfasst werden – es wird eher die Fähigkeit des Bodens gemessen, Druck zu übertragen.

Die Verformung des Bodens unter Last wird an der Bodenoberfläche durch Ausbildung einer Fahrspur sichtbar. Aus dem Bestreben, die Fortsetzung dieser vertikalen Bodenbewegung von der Oberfläche in die Tiefe des Bodens zu verfolgen, entstand die grundlegende Idee zur „*in situ*“ Messung der Bodensetzung in unterschiedlichen Tiefen (Danfors, 1974; Arvidsson et al., 2001). Da der Aufwand zur Errichtung derartiger Messstellen sehr hoch war, haben Nolting et al. (2006) eine Schlauchwaage modifiziert und ein hydrostatisches Niveau-Messgerät entwickelt, das den 1. Baustein des Multisensorsystems darstellt (siehe Abbildung 14, Brunotte et al., 2011a). Die Setzungen im Boden können als Höhenunterschiede mit einer Auflösung von 0,1 mm gemessen werden. Durch die Messung der Bodensetzung allein kann noch keine direkte Aussage über den aktuellen Zustand der Funktionalität des Gefüges getroffen werden. Es kann jedoch eine Prognose erfolgen, ob durch die Befahrung mit einer Verschlechterung der Ausgangssituation zu rechnen ist. Die nachgeschalteten bodenphysikalischen Untersuchungen geben dann Auskunft, ob es zu einer Beeinträchtigung von Bodenfunktionen im Sinne § 17 BBodSchG gekommen ist. Den 2. Baustein des Multisensorsystems stellt ein Ultraschallsensor unter der Maschinenachse dar (Abbildung 14) - er ermöglicht eine online-Messung der Spurtiefe. Eine Verknüpfung mit der Setzung erfolgt, indem die vertikale Bodenbewegung nach unten mithilfe der hydrostatischen Niveaumessung erfasst wird. Zeigt diese eine bleibende Bodensetzung (= plastische Verformung) an, müssen Fahrzeugparameter an den kritischen Bodenzustand angepasst werden. Hier ist der 2. Ultraschallsensor in der Felge (3. Baustein des Multisensorsystems) eine Hilfe. Er misst die aktuelle Reifeneinfederung, die eng mit der dynamischen Radlast korreliert ist. Der Hersteller schreibt einen Maximalwert der Reifenabplattung fest, bis zu dem es zu keiner Schädigung des Reifens kommt und gleichzeitig eine maximale Kontaktfläche realisiert wird. Die Reifeneinfederung ist somit der Regelparameter, der eine Reifendruckverstellanlage in eine vollautomatische Reifendruckregelanlage verwandeln kann. Diese Technologie weist ohne Frage in die Zukunft und ist zurzeit auf den land-

wirtschaftlichen Betrieben noch nicht vorhanden. Sie schafft aber die Voraussetzung, dynamische Laständerungen zu messen und den erforderlichen Reifeninnendruck anzupassen im Sinne von „maximalen Bodenschutz gewährleisten“ und „Reifen schonen“.

Fazit: Der Einsatz hochmoderner Traktoren und hochspezialisierter Erntemaschinen unterliegt der Gratwanderung zwischen Rentabilität und Bodenschonung. Die Auslastung der Maschinen ist eine Frage der Betriebsgröße, der Böden und der Niederschlagsverteilung. Bei der Auswahl der Mechanisierungskette spielen: (a) die zur Verfügung stehenden Befahrbarkeitstage, (b) die Fahrlogistik auf dem Acker und (c) die Auswirkungen auf die Bodenstruktur eine Rolle. Nur die gleichzeitige Berücksichtigung aller Parameter erreicht einen umfassenden Bodenschutz in der Spur und auf der Fläche.

Danksagung

Die Verfasser danken den Landwirten im Raum Lamspringe und Sehlem für ihre großzügige Unterstützung. Für ihre tatkräftige Mitwirkung bei den Feld- und Auswertungsarbeiten sei folgenden Studierenden des Geographischen Instituts an der CAU Kiel gedankt: Daniel Gerken, Wolfgang Hamer, Nicole Heckroth, Lars Mallow und Maria Matthes.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- Ahl C, Lange M, Henke S (2007) Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus zur Biogaserzeugung auf die Humuswirtschaft. Mitt Dt Bodenkundl Ges 110:665-666
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JJH, Schjonning P (2001) Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestors in southern Sweden : II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. Soil Tillage Res 60:79-89
- Blazej D, Soucek J (2011) Global positioning system utilization for monitoring of energetic biomass logistic processes [online]. Zu finden in <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2011/Papers/035_Blakej.pdf> [zitiert am 29.01.2013]
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011) Erneuerbare Energien 2010 : Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) ; vorläufige Angaben, Stand 23. März 2011. [online]. Zu finden in <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf> [zitiert am 29.01.2013]
- Bolling I (1987) Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen : neue Meß- und Rechenmethoden. München : Selbstverl, 274 p, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik133
- Brunotte J (2013) Bodenschonendes Befahren bei der Silomaisernte . In: KTBL (ed) Logistik rund um die Biogasanlage. Darmstadt : KTBL, 498:49-62
- Brunotte J, Vorderbrügge T, Nolting K, Sommer C (2011a) Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) - Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis : Teil IV: Ein praxis-

- orientierter Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. *Landbauforsch* 61(1):51-74
- Brunotte J, Senger, M, Haaren M von, Heyn J, Brandhuber R, Voßhenrich H, Epperlein J, Vorderbrügge T, Ortmeier B, Lorens M (2011b) Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker. Braunschweig : vTI, 1 Tafel
- Brunotte J, Fröba N (2007) Schlaggestaltung - kostensenkend und bodenschonend. Darmstadt : Ktbl, 178 p, Ktbl-Schrift 460
- Brunotte J, Sommer C (2007) Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Berlin : Beuth Verlag, 68 p, VDI-Richtlinien 06101
- Danfors B (1974) Packning i alven. Specialmeddelande / Jordbruksknska institutet 24
- Diserens E (2009) Calculating the contact area of trailer tires in the field. *Soil Tillage Res* 103:302-309
- DLZ-Agrarmagazin (2010) Auf die Länge kommt es an. *DLZ-Agrarmagazin* 2010(6):2-5
- Duttmann R, Brunotte J, Bach M (2013) Spatial analysis of field traffic intensity and modeling of changes in wheel load and ground contact pressure in individual fields during a silage maize harvest. *Soil Tillage Res* 126:100-111
- Hulshoff RM (1995) Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecol* 10:101-111
- Jering A, Klatt A, Seven J, Ehlers K, Günther J, Ostermeier A, Mönch L (2012) Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen [online]. Zu finden in <<http://www.umweltbundesamt.de/uba-infomedien/4321.htm>> [zitiert am 28.01.2013]
- Ktbl (2009) Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt : Ktbl, 1180 p
- Lebert M (2010) Entwicklung eines Prüfkonzepes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Berlin : Umweltbundesamt, 96 p, Texte / Umweltbundesamt 51/10
- Leurs K (2006) Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais. 159 p, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik 438
- Nevens F, Reheul D (2003) The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil Tillage Res* 70:175-184
- Nolting K, Brunotte J, Lorenz M, Sommer C (2006) Bodenverdichtung: bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. *Landtechnik* 61(4):190-191
- Scholz V, Krüger K, Höhen A (2001) Vergleichende Untersuchungen zum umweltverträglichen und energieeffizienten Anbau von Energiepflanzen. *Arch Agron Soil Sci* 47:333-361
- Senayram M (2009) Greenhouse gas emission from soils of bioenergy crop production systems and regulating factors. Kiel : Inst Pflanzenern Bodenkunde, 129 p, SchrR Inst Pflanzenern Bodenkunde Univ Kiel 86
- Stahl H, Marschall K, Götzte H (2005) Bodendruck und Bodenbelastbarkeit : Abschlussbericht zum Projekt „Risomanagement Bodengefüge“. Dresden : Sächsische Landesanst Landwirtsch, 127 p, SchrR Sächs Landesanst Landwirtsch 10,15
- Svoboda N (2011) Auswirkungen der Gärrestapplikation auf das Stickstoff-Auswaschungspotential von Anbausystemen zur Substratproduktion. Kiel : Inst Pflanzenbau Pflanzenzüchtung, 157 p, SchrR Inst Pflanzenbau Pflanzenzüchtung 76
- Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (2003) Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil Tillage Res* 73: 1–8
- Wiss Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (ed) (2009) Welt im Wandel : zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. Berlin : WBGU, 388 p
- Willms W, Hufnagel J, Eulenstein F, Wagner B, Vetter A (2007) Humus- und Stickstoffbilanzen beim Anbau von Energiepflanzen. *Mitt Dt Bodenkundl Ges* 110:635-636

Soil organic matter alterations by short-term composted coffee pulp waste: evidence from pyrolysis-field ionisation mass spectrometry

Bekele Eshetu*, Kai-Uwe Eckhardt* and Peter Leinweber*

Abstract

This study investigates the impact of compost from coffee pulp waste on the composition of soil organic matter (SOM) under controlled laboratory conditions. Compost samples were collected after the thermophilic, mesophilic and the final phase and an equivalent of 48 t ha⁻¹ was added to samples of a tropical Nitisol. The soil-compost-mixtures were incubated aerobically for 14 weeks. At the end of incubation the C_{org} concentrations and the total ion intensities of pyrolysis-field ionization mass spectrometry (Py-FIMS) were larger in compost treatments than in the control. Despite of similar initial organic C_{org} and N_t contents among compost amended treatments, less organic C was mineralized following the application of compost from the thermophilic than from later composting phases. The SOM in the soil that received the "thermophilic" compost contained significantly higher proportions of carbohydrates, heterocyclic/nitrilic N-compounds, peptides, sterols and n-fatty acids than the other amended soils. Temperature-resolved volatilization curves for carbohydrates, N-compounds and peptides showed that the enriched compounds covered a wide range of thermal stability. In conclusion, the compost from the thermophilic phase had the best effect in terms of biologically labile C sequestration and stabilization of native organic C in a clay-rich tropical Nitisol. If confirmed for other composts and soils, this may have also considerable economic implications because the time period of composting can be shortened.

Keywords: compost, soil organic matter, coffee pulp waste, soil carbon sequestration, molecular composition

Zusammenfassung

Einfluß kompostierter Kaffeefruchtfleisch-Abfälle auf die organische Bodensubstanz: Untersuchungen mit Pyrolyse-Feldionisation Massenspektrometrie

Es wurde der Einfluss kompostierter Kaffeefruchtfleisch-Abfälle auf die organische Bodensubstanz (OBS) unter Laborbedingungen untersucht. Kompostproben wurden nach der thermophilen, mesophilen und der Reifephase entnommen und mit einem tropischen Nitisol vermischt (48 t ha⁻¹). Diese Mischungen wurden unter Laborbedingungen über 14 Wochen inkubiert. Danach lagen die C_{org}-Gehalte und die Gesamtintensitäten bei der Pyrolyse-Feldionisation Massenspektrometrie (Py-FIMS) in den Kompost-Varianten über denen der Kontrolle. Trotz gleicher Anfangs-C_{org}- und N_t-Gehalte innerhalb der Kompost-Varianten wurde aus den Varianten mit Kompost aus der thermophilen Phase weniger C_{org} mineralisiert als aus denjenigen mit länger gereiften Komposten. Die OBS in diesen Varianten enthielt signifikant größere Anteile an Kohlenhydraten, N-Verbindungen (Heterozyklen, Nitrile), Peptiden, Sterolen, und n-Alkylfettsäuren als in den anderen Kompost-Varianten. Temperaturkurven für die Freisetzung der erstgenannten Verbindungsklassen deuteten auf weite Bereiche der thermischen Stabilität hin. Daraus folgt, dass der Kompost auf der thermophilen Phase den besten Effekt für die C-Sequestrierung in diesem Boden hatte. Wenn das für andere Böden und Komposte bestätigt werden könnte, hätte dies möglicherweise auch ökonomische Konsequenzen infolge Verkürzung der Kompostierungsduer.

Schlüsselwörter: Kompost, organische Bodensubstanz, Kaffeefruchtfleisch-Abfall, Kohlenstoffspeicherung, molekulare Zusammensetzung

* University of Rostock, Soil Science, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock, Germany

Contact: peter.leinweber@uni-rostock.de

1 Introduction

The application of compost to soil has received much attention as an environmentally favorable strategy to use the increasing amount of organic waste and to improve the soil organic matter (SOM) status of agricultural land (Lal, 2004; Weber et al., 2007; Bustamante et al., 2010). Compost application to increase the quantity and improve the quality of SOM is particularly important in strongly weathered tropical soils to overcome the degradation of SOM and improve the soil carbon (C) sequestration (Zech et al., 1997; Lal, 2002, Rivero et al., 2004; Bruun et al., 2010). Studies done by Leifeld et al. (2002), Spaccini et al. (2009) and Eshetu et al. (2012) clearly showed quantitative increases as well as improvements in the SOM quality following compost application to sandy or loamy soils. The effects of compost on composition and stability of SOM depend on various factors including the quality of compost, compost interactions with microbial enzyme systems and mineral soil surfaces (Zech et al., 1997; González-Vila et al., 1999; Grandy and Neff, 2008; Stewart et al., 2011).

Previous research showed that compost application to soil modifies the chemical, physical and biological properties of SOM (Nardi et al., 2004; Adani et al., 2007; Lima et al., 2009). The addition of compost to soil reduced the mineralization of labile compounds of SOM (Fortuna et al. 2003; Piccolo et al., 2004) and increased the humic acid (HA) over the fulvic acid (FA) proportions (Rivero et al., 2004). The latter results were confirmed by Weber et al. (2007), who also reported a relative increase in HA relative to FA with time in soils amended with urban compost. Moreover, the added compost can lead to significant changes in the composition of SOM and minimize labile C mineralization from the soil thereby enhancing the role of SOM as a sink of organic C (Mondini et al., 2007; Spaccini et al., 2009). On the bases of CO₂ respiration results during incubation Mondini et al. (2007) and Sánchez-Monedero et al. (2010) reported an inverse relationship between the organic C mineralized and the degree of stability of the compost added. They concluded that addition of relatively stable compost always reduces the organic C respiration and, thus, stabilize SOM. However, Sánchez-Monedero et al. (2008) observed that the efficiency of added olive mills composts for soil C conservation was independent of the degree of compost stability. González-Vila et al. (1999) stated that extended composting did not contribute to the accumulation of progressively aromatized humic materials but it led to nitrogen and carbohydrate losses. However, most of these results on compost effects on SOM composition and stabilization are based on general chemical information rather than detailed molecular-level studies of SOM. Furthermore, the fate of composts of different origin and stability in tropical soils is completely unknown.

Effects of different management techniques such as compost application on the long term soil C sequestration are difficult to study because biologically induced fluxes take place in short time periods, e.g., hours and days to months whereas geochemical fluxes may take place over longer time periods such as hundreds to millions of years (Paul and Clark,

1989). Therefore, the popular laboratory incubation experiments which measure microbial activity, organic matter decomposition in amended soils (Bernal et al., 1998; Fernandez et al., 2007) and C sequestration potential of arable soils (Mondini et al., 2007; Sanchez-Monedero et al., 2008; Adani et al., 2007) have limitations in applying the results to field conditions and generalisation. For instance, under field conditions the decomposition and stability of organic C is a function of dynamic, heterogeneous and interactive variables such as the amount and quality of plant material entering the soil, the soil mineralogy and chemistry and other soil properties such as moisture, temperature, vegetation etc. The advantage of controlled laboratory incubation experiments is that these factors can be kept constant and restricted so that effects of one variable (e.g. compost quality) can be determined with more precision.

Coffee pulp waste may have significant adverse effects to the environment (Gezahegne et al., 2011; Negassa et al., 2011), but composted it may be a useful amendment of tropical soils. Therefore, it is important to disclose effects of coffee pulp waste composts to SOM contents, composition and stability. Relevant evidence requires the application of molecular-level sensitive analytical methods such as mass spectrometry. For instance, pyrolysis–field ionization mass spectrometry (Py-FIMS) enabled to describe management induced changes in SOM composition in whole soil samples (Schulzen and Hempfling, 1992), to characterize SOM in sewage farm soils (Leinweber et al., 1996), to trace different phases of bio-waste composting (Smidt et al., 2005) and to characterise the organic matter in fresh agro-industrial waste including coffee pulp (Negassa et al., 2011). Recently, Eshetu et al. (2012) used Py-FIMS in conjunction with pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry to study long-term compost effects on the molecular composition of SOM developed in humus free Pleistocene loamy marl. Most recently we observed that composts taken after the thermophilic phase may have an overall better effect to soil C sequestration than mature composts (Eshetu et al., 2013). However, neither Py-FIMS nor another highly sensitive speciation method has been applied so far to disclose effects of differently aged or stabilised composts from coffee pulp waste on SOM in tropical soils.

Therefore, the objectives of the study were (1) to evaluate the effect of compost age on the molecular structure of SOM in a tropical Nitisol amended with compost derived from different phases of composting of coffee pulp waste, and (2) to investigate which constituents of organic matter were decomposed or relatively enriched, when differently stabilized composts were incubated in the Nitisol sample to simulate the microbial decomposition.

2 Materials and methods

2.1 Soil and composting samples

The soil was sampled at a coffee plantation farm located in the South-Western Highlands of Ethiopia and classified as Nitosol (ISSS-ISRIC-FAO, 1998). The sampling area is situated

36°36'E longitude and 7°56'N latitude. The elevation varies between 1533–1548 m a.s.l. Mean minimum and maximum temperatures range from 11 to 14 °C and 26 to 30 °C, respectively, and the mean of precipitation ranges from 1131 to 1150 mm. Thus, the climate may be indicated as warm tropical. A total of 50 subsamples were taken from 5.91 ha land, traversed in a zig-zag pattern, from soil depth of 0 to 30 cm using a GPS and an auger. The subsamples were well mixed in a plastic container and then a representative sample of 3 kg was placed in a labeled plastic bag. The soil sample was air-dried and milled to pass a 2 mm sieve. Its main characteristics are compiled in Table 1.

Table 1

Main characteristics of soil, fresh waste and differently stabilized compost samples (RCPW: fresh coffee pulp waste, COM: compost, T: thermophilic phase, M: mesophilic phase, F: final stage, C_{org}: total organic carbon, N_t: total nitrogen, S_t: total sulfur, C/N: carbon to nitrogen ratio, EC: electrical conductivity).

Parameter	Soil	RCPW	COM1-T	COM1-M	COM1-F
pH	5.2	5.8	8.8	9.3	9.1
C _{org} (g kg ⁻¹)	38.6	397.0	151.0	149.0	139.2
N _t (g kg ⁻¹)	3.2	21.1	10.5	12.7	12.7
S _t (g kg ⁻¹)	0.8	3.1	1.7	2.2	2.4
C/N	11.9	18.9	14.4	11.7	11.0
EC (mS cm ⁻¹)	2.4	6.7	2.0	2.1	2.1
Soil texture					
% Sand	1		ND	ND	ND
% Silt	14		ND	ND	ND
% Clay	84		ND	ND	ND
Phytotoxicity (Germination index in %)					
With cress		3	106	109	102
With Radish		26	121	120	125

The compost was produced from 800 kg raw coffee pulp waste (RCPW) in a method of small heap composting. Heaps were piled in a bamboo box of dimensions 1.5 m (l) × 1.0 m (w) × 0.8 m (h)). The platform used has been considered as pilot compost production unit by the Addis Ababa city council environmental protection authority, Ethiopia. The regional climate is tropical, with average temperatures between 15 °C and 25 °C. Piles were constructed for experimental purposes with duplicates. About 5% (w/w) soil and 10% (w/w) of garden trimmings (dry leaves, and young tree branches) were added as additional source of microbial colonization and to improve the pile structure. The experiment lasted from November 2010 to February 2011. The moisture content of the compost was manually estimated on site by hand squeezing the compost tightly. Moisture contents above 40% were indicated by a formation of a ball up on squeezing of the compost. Depending on the situation the piles were watered so as to always maintain > 40% (w/w) moisture. Samples

were taken once a week for pH and moisture content measurements in the laboratory. Temperatures were measured daily for the first two weeks and in a three-days-interval during the next period always in the early morning using digital thermometers (0.5 and 1.0 m in length) at two different points of the heaps (25 and 60 cm depth). The piles were manually turned each week during the thermophilic phase (45°C to 69 °C) which lasts 30 days, and then in a 15-days-interval during the maturation phase (< 43 °C). Temperature was considered as a major indicator how well the composting process was progressing. The composting was considered to be finished when the temperature of the mixture remained stable and near ambient (about 21 °C) after 16 weeks.

Representative samples (about 1 kg) were taken by mixing nine subsamples from different levels of the section in the pile at different phases of the composting, day 8 (thermophilic phase = COM-T), day 36 (mesophilic phase = COM-M) and day 119 (final compost = COM-F). In this way composts of different stability were obtained. The samples were air dried and ground to pass a 0.5 mm sieve. Main properties are shown in Table 1.

Aerobic incubation of the soil-compost-mixtures was done by mixing 10 g dry weight of sieved soil samples (< 2 mm) with fresh and composted coffee pulp waste at desired application rates (48 t ha⁻¹) and placed in 100 ml incubation vessels in five replicates each. They were monitored as treatment S+RCPW, S+COM1-T, S+COM1-M and S+COM1-F. Soil controls were run without any amendment. Distilled water (1 to 5 ml) was added to the mixtures to keep the moisture at 60% of water-holding capacity. The incubation was carried out in a temperature-controlled incubator at 25 °C for 98 days. Subsamples (2 g) were taken destructively from each treatment at the end of incubation for elemental and Py-FIMS analyses.

2.2 Chemical analyses: basic data and molecular-chemical characterization

The soil samples were analyzed for pH and EC in 0.01 M CaCl₂ suspensions (1:2.5 w/v), and fresh and composted waste samples were analyzed for pH and EC in H₂O suspensions (1:10 w/v). The concentrations of total organic carbon (C_{org}), total nitrogen (N_t) and total sulfur (S_t) were determined for soil, compost and amended soil samples using a CNS analyzer (Vario EL III; Elementar Analysensysteme, Hanau, Germany). RCPW and compost phytotoxicity was determined according to the modified method of Zucconi et al. (1985) and described and discussed in Eshetu et al. (2013).

For Py-FIMS about 3 mg of the air dried, ground and homogenized samples were thermally degraded in the ion source (emitter: 4.7 kV, counter electrode -5.5 kV) of a double-focusing Finnigan MAT 95 mass spectrometer. All samples were heated in a vacuum of 10⁻⁴ Pa from 50 °C to 700 °C, in temperature steps of 10 °C over a time period of 18 minutes. Between magnetic scans the emitter was flash-heated to avoid residues of pyrolysis products. About 65 magnetic scans were recorded for the mass range m/z 15 to 900. Ion intensities were referred to 1 mg of a sample. For each of the

single scans, the absolute and relative ion intensities of ten classes of compounds in the organic matter were calculated by summation of the ion intensities of indicator signals to obtain thermograms of their volatilization and averaged Py-Fl mass spectra. This procedure was done for each three replicate measurements per soil sample and the results were averaged for statistical analysis. Information on the molecular size distribution of pyrolysis products was obtained by calculating the molecular weight averages M_w (weight-based) and M_n (number-based), and the polydispersity ($I = M_w / M_n$) (Lattimer and Schulten, 1983). Detailed descriptions of the Py-FIMS methodology are published in Leinweber et al. (2009).

2.3 Statistical analyses

Means were calculated for physicochemical properties of soils, composts, amended soils and ion intensities from Py-FIMS. Comparisons between means of ion intensities of compound classes and polydispersity in different treatment were made by a One Way ANOVA test. Multivariate statistical evaluation of Py-Fl mass spectra was done by principal component analysis to test which m/z signals contributed to differences among samples. All statistics were computed using data analysis and graphic software (Origin 8.1G).

3 Results and Discussion

3.1 Elemental composition

Organic amendments increased the C_{org} concentrations by 7.8 g kg⁻¹ (RCPW) and about 2 g kg⁻¹ (with the addition of composts) at start of the incubation (Table 2). The increases in N_t concentrations were proportionally. These differences in C_{org} and N_t concentrations originate from the different amounts of organic matter applied with RCPW and the composts (Lima et al., 2009). At the end of incubation all samples had lower C_{org} and N_t (except the S + RCPW) concentrations. The C_{org} losses were larger in the soil amended with RCPW (10.5 %) than in the samples amended with composts (2 % to 4.1 %). This difference in C_{org} losses by respiration are explained by the decomposition of easily degradable organic com-

pounds from the RCPW which in the composts had been either mineralized (Bernal et al., 1998) or otherwise stabilized. Furthermore, the observed smallest C_{org} losses by only 2.0 % in the samples amended with compost from the thermophilic phase disagrees with the findings of (Leifeld et al., 2002; Mondini et al., 2007). These authors found an inverse relationship between the organic C mineralized and the degree of stability of the compost added in a laboratory incubation experiment and concluded that composts require a maturation phase for humification and organic matter stabilization. Explanation of this disagreement requires a detailed molecular-chemical investigation of the different composts and soil-compost-mixtures as described below.

3.2 Pyrolysis – field ionization mass spectrometry (Py-FIMS)

In the Py-FIMS the thermograms of total ion intensity (TII) shows single peaks for all the control soil and the soil amended with RCPW (Figure 1), and similar for the three samples with compost amendment (Figure 2). Addition of the organic materials slightly changed the peak temperatures of maximum volatilization of organic molecules from about 500 °C in the control to 470 to 500 °C in the samples with organic amendments (see Figure 1 and compare with Figure 2). Furthermore, the pronounced shoulder at 420 °C seen at the control soil sample (Figure 1) disappeared in the samples with organic amendments (Figure 2), indicating some stabilization of labile organic matter by the organic amendments. The signal patterns of the Py-Fl mass spectra revealed differences among compost samples originating from the different duration of the composting. For instance the prominent signals at m/z 58, 72, 96, and 110 indicate a particularly high relative intensity of carbohydrates in sample S+COM1-T (Figure 2). The very intense m/z 84 in this treatment can be explained by pyrolysis products of carbohydrates and peptides. Furthermore, m/z 67 (pyrrole) and m/z 117 (indole) seem to be more abundant in this than in the other composts. Moreover, the signals with highest molecular masses originating from sterols and long-chained *n*-fatty acids (e.g., m/z 390, 424) were detected in this treatment only (Figure 2). On the other hand, intense signals of phenols/lignin

Table 2

Elemental composition (g kg⁻¹) of control soil sample, and soil samples amended with raw coffee pulp waste (S+RCPW) and composts from coffee pulp waste taken at the thermophilic (S+COM1-T), mesophilic (S+COM1-M) and final maturation (S+COM1-F) phase of composting at start (Day 1) and end of an aerobic incubation (Day 98). The right column indicates the relative decrease in the C_{org} concentrations during the incubation.

Treatments	Day 1				Day 98				C_{org} loss (%)
	C_{org}	N_t	S_t	C/N	C_{org}	N_t	S_t	C/N	
Control	39.8	3.3	0.7	12.2	38.3	3.2	0.7	11.8	3.7
S+RCPW	47.6	3.7	0.8	12.9	42.6	3.7	0.8	11.6	10.5
S+COM1-T	42.0	3.5	0.7	11.9	41.2	3.4	0.8	11.9	2.0
S+COM 1-M	42.0	3.6	0.7	11.6	40.3	3.4	0.7	11.9	4.1
S+COM 1-F	41.8	3.6	0.8	11.7	40.7	3.4	0.7	12.0	2.6

monomers (*m/z* 168, 180, 194), lipids (*m/z* 202, 216, 230), homologous series of alkanes (*m/z* 252, 266, 280, 294, 308) and alkylaromatics (*m/z* 218) were found in all spectra.

A more detailed spectra evaluation by PCA indicated that 92.4 % of the total variance in the whole data set from the three soil-compost-mixtures could be explained by the first two principal components (not shown). For 34 *m/z* signals the univariate wilks's lambda was significant at a level of $p < 0.01$. The signals with the highest discriminating powers among treatments S+COM1-F, S+COM1-M and S+COM1-T are *m/z* 114, 71, 176, 434, 399, 113, 85, 177, 189, 468, 157, 84, 219, 83, 69, 253, 228, 143, 44, 46, 60, 221, 252, 202, 141, 72, 53, 269, 107, 82, 200, 88, 152, 233, 443 and 167 (arranged with decreasing importance for discrimination). For instance the pentose marker *m/z* 114 from plant material was significantly higher in treatment S+COM1-T but showed no significant difference between composts from the mesophilic and final phase. On the other side, the relative proportions of the lignin marker *m/z* 178 (coniferyl aldehyde) (Leinweber et al., 2009) was significantly higher in S+COM1-M and S+COM1-F than in S+COM1-T. This provides unequivocal evidence that duration of the composting has an effect on the molecular composition not only of the compost (Smidt et al., 2005) but also of a soil amended with this compost.

The data derived from the Py-FI mass spectra pointed to similarities but also significant differences among samples at the end of the incubation (Table 3). The proportions of volatile matter, ranging from 20 to 25 %, differed insignificantly, indicating that organic matter and adsorbed water were not greatly affected by the soil amendments. The TII values were significantly larger in all amended soils than in the control without significant differences ($p < 0.05$) among the amended soil samples. Assignment of markers signals to important compound classes of SOM revealed significantly larger intensities of carbohydrates, peptides and sterols in S+COM1-T than in the other treatments. Difference were largest

between S+COM1-T and the control accounting for 4.4×10^6 counts mg^{-1} for carbohydrates, 3.9×10^6 counts mg^{-1} for peptides and $(0.2 \times 10^6$ counts mg^{-1} for sterols (Table 3). The ion intensities of phenols/lignin monomers, alkylaromatics, and N-compounds were significantly lower in the control than in the amended soils but did not significantly differ among the amendments.

The relative ion intensities of compound classes indicated that carbohydrates (12.8 %) and peptides (12.2 %) were the major SOM constituents in S+COM1-T (Table 3, see values in parentheses). Furthermore, this sample contained significantly more N-compounds (7.1 %) and sterols (0.6 %) than any other sample. Phenols/lignin monomers (13.1 to 14.0 %) and alkylaromatics (14.9 to 15.4 %) were more abundant in the other amended soil samples and the control. Suberin was the compound class with smallest proportions in all samples.

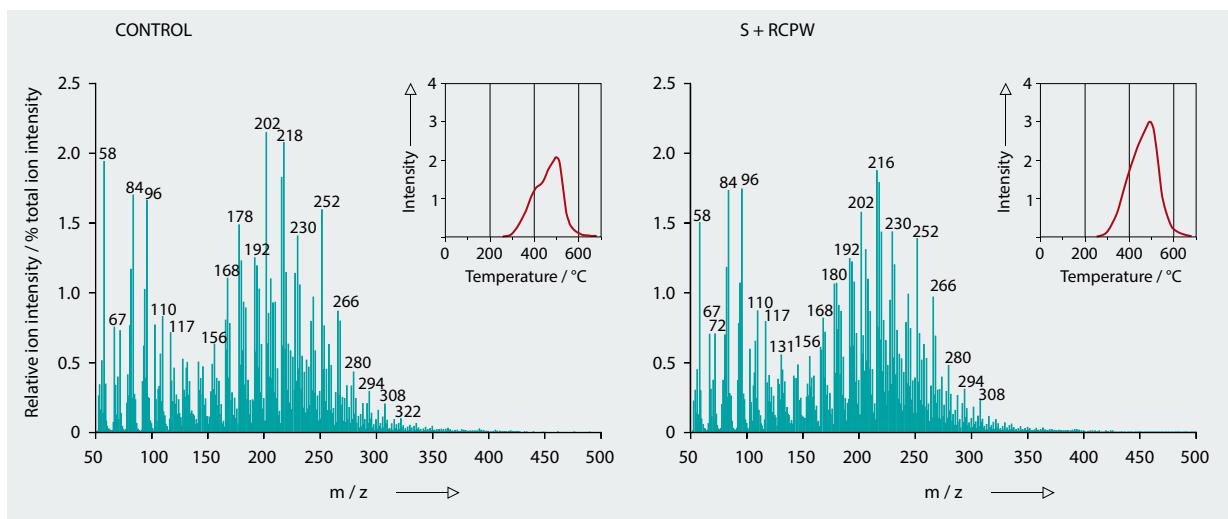
The molecular weight averages M_n (142 g mol^{-1}) and M_w (194 g mol^{-1}) of S+COM1-T were significantly lower than those of the other treatments (M_n : 171 to 175 g mol^{-1} ; M_w : 205 to 207 g mol^{-1}). This was due to the dominance of low molecular-weight organic compounds such as carbohydrates and N-compounds. However, a significantly higher M_w/M_n ratio (1.4) in treatment S+COM1-T indicated a higher polydispersity of the SOM in this treatment compared to the other organic amendments (1.2). This was due to the fact that the SOM in treatment S+COM1-T are complex mixtures of low molecular mass compounds (such as carbohydrates) to high molecular masses compounds (such as *n*-fatty acids and sterols) (Figure 1, Table 3).

The TII larger in the compost fertilized than in other treatments (Table 3) agreed with the C_{org} concentrations (Table 2). This confirms previous studies in which the TII from Py-FIMS also corresponded to the C_{org} concentrations of different agricultural soils (Schulten and Hempfling, 1992), organic waste materials (Franke et al., 2006) and compost-amended soils (Eshetu et al., 2012). The results provide evidence for an

Table 3

Results of pyrolysis-field ionization mass spectrometry: volatile matter (VM, %), total ion intensity (TII, 10^6 counts mg^{-1}), ion intensities for 10 important compound classes of organic matter (CARB: carbohydrates, PHLM: phenols/lignin monomers, LIPID: lipids, NCMP: N-compounds, ALKY: alkylaromatics, LDIM: lignin dimers, STER: sterols, PEPT: peptides, SUBE: suberin, FATTY: *n*-C₁₆ to *n*-C₃₄ fatty acids in 10^6 counts mg^{-1}), relative ion intensity (values in parenthesis, % TII) and molecular weight averages (g mol^{-1}). For explanation of treatments see Table 1). Values followed by the same letters with in a column and column without letters were not significantly different at the 5 % probability level.

Treatment	VM	TII	CARB	PHLM	LDIM	LIPID	ALKY	NCMP	STER	PEPT	SUBE	FATTY	M_n	M_w	M_w/M_n
CONTROL	23.3a	30.6b	2.4 (7.7)a	4.3 (14.0)a	2.7 (8.8)ab	1.1 (3.4)a	4.6 (15.0)a	1.8 (5.8)a	0.1 (0.2)a	2.6 (8.3)b	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)a	175.7a	206.5a	1.2a
S + RCPW	21.1a	46.4a	3.6 (7.7)a	6.1 (13.1)b	3.9 (8.3)ab	1.5 (3.3)ab	7.1 (15.2)b	2.6 (5.7)b	0.1 (0.1)a	3.6 (7.8)ab	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)a	178.5a	207.3a	1.2a
S + COM1-T	20.1a	53.3a	6.8 (12.8)b	5.8 (11.0)ab	2.6 (5.0)a	1.0 (1.9)a	5.9 (11.1)b	3.8 (7.1)c	0.3 (0.6)b	6.5 (12.2)c	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)b	141.5b	194.2b	1.4b
S + COM1-M	22.1a	54.3a	4.2 (7.7)a	7.2 (13.2)b	4.4 (8.1)b	1.6 (3.0)b	8.1 (14.9)b	3.2 (6.0)bc	0.1 (0.2)a	4.5 (8.2)a	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)ab	171.6a	204.2a	1.2a
S + COM1-F	25.5a	46.6a	3.9 (8.5)a	6.4 (13.8)b	3.4 (7.4)ab	1.3 (2.8)ab	7.2 (15.4)b	2.7 (5.8)ab	0.1 (0.2)a	4.0 (8.5)a	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)ab	174.4a	205.7a	1.2a

**Figure 1**

Summed and averaged pyrolysis-field ionization mass spectra and thermograms of total ion intensity (TII, upper right inserts) of a Nitisol soil sample amended with fresh coffee pulp waste (S+RCPW) and the non-amended control sample of the Nitisol

exogenous C input to these treatments from compost and microbial biomass (Leinweber and Reuter, 1992; Spaccini et al., 2009; Eshetu et al., 2012).

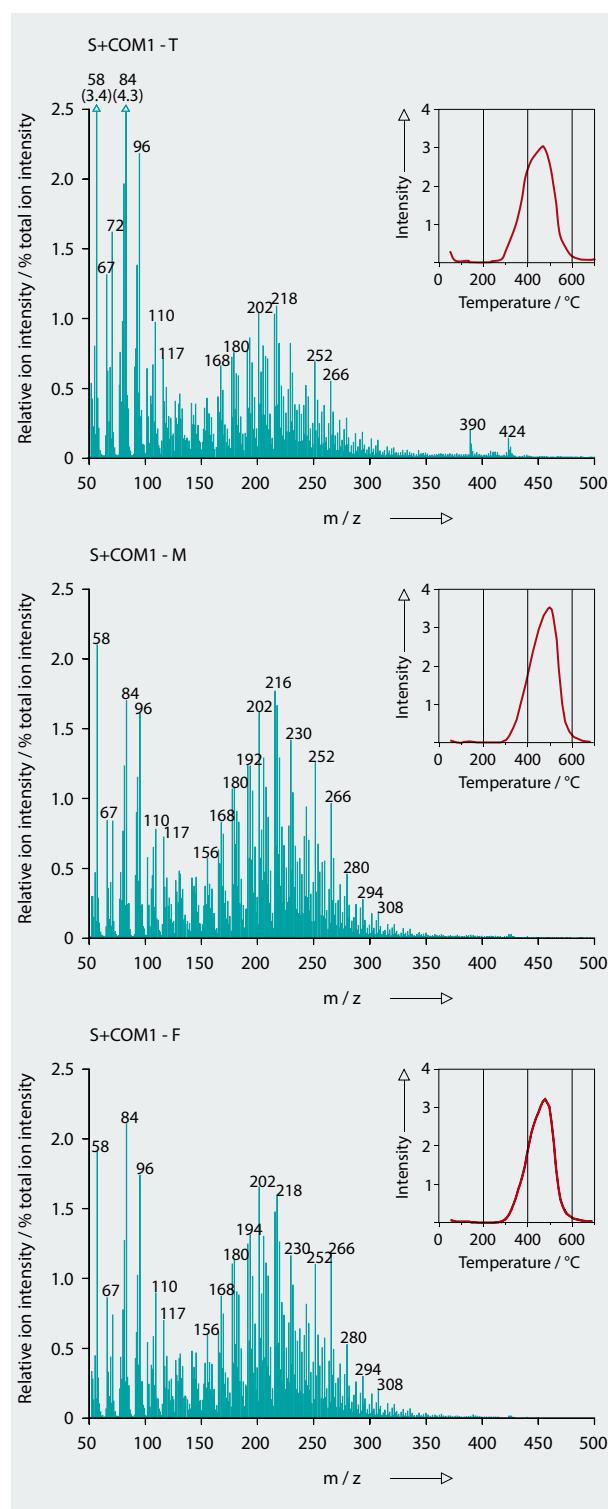
The signal patterns (Figure 2) and summed intensities of compound classes (Table 3) indicated the clearest impact of compost from the thermophilic phase on the SOM composition. The particularly high ion intensities of carbohydrates, peptides and heterocyclic N compounds are explained by their enrichment in the thermophilic phase of composting. Obviously, these compounds were not mineralized when the "thermophilic compost" is incubated with the Nitisol sample. This resistance of otherwise labile compounds (carbohydrates and peptides) can be explained by stabilization at reactive surfaces (Gregorich et al., 1996; Zech et al., 1997; Grandy and Neff, 2008; Bruun et al., 2010; Bustamante et al., 2010) of the clay-rich ($84\% < 2\text{ }\mu\text{m}$) Nitisol. The abundance of reactive clay surfaces is crucial, because both carbohydrates and N-compounds were completely decomposed in recirculated leachates from organic waste in large-scale lysimeters that offered no contact with reactive surfaces (Franke et al., 2007). Unlike the high content of *n*-fatty acids and sterols in the raw coffee pulp waste (Negassa et al., 2011) signals of these compounds were detected only in treatment S+COM1-T. This can be explained by the decomposition of these compounds in the later stages of composting. Smidt et al. (2005) also reported that fatty acids and sterols changed most during composting of yard and kitchen wastes studied by Py-FIMS and FT-IR spectroscopy.

The similar intensities of phenols/lignin monomers, lignin dimers, lipids and alkylaromatics among the compost-amended soils revealed that these compound classes were little affected by the degree of stabilization of composts and subsequent short-term incubation. However, their higher contents in amended soils compared to the control indicate enrichments of non-decomposable stable compounds by

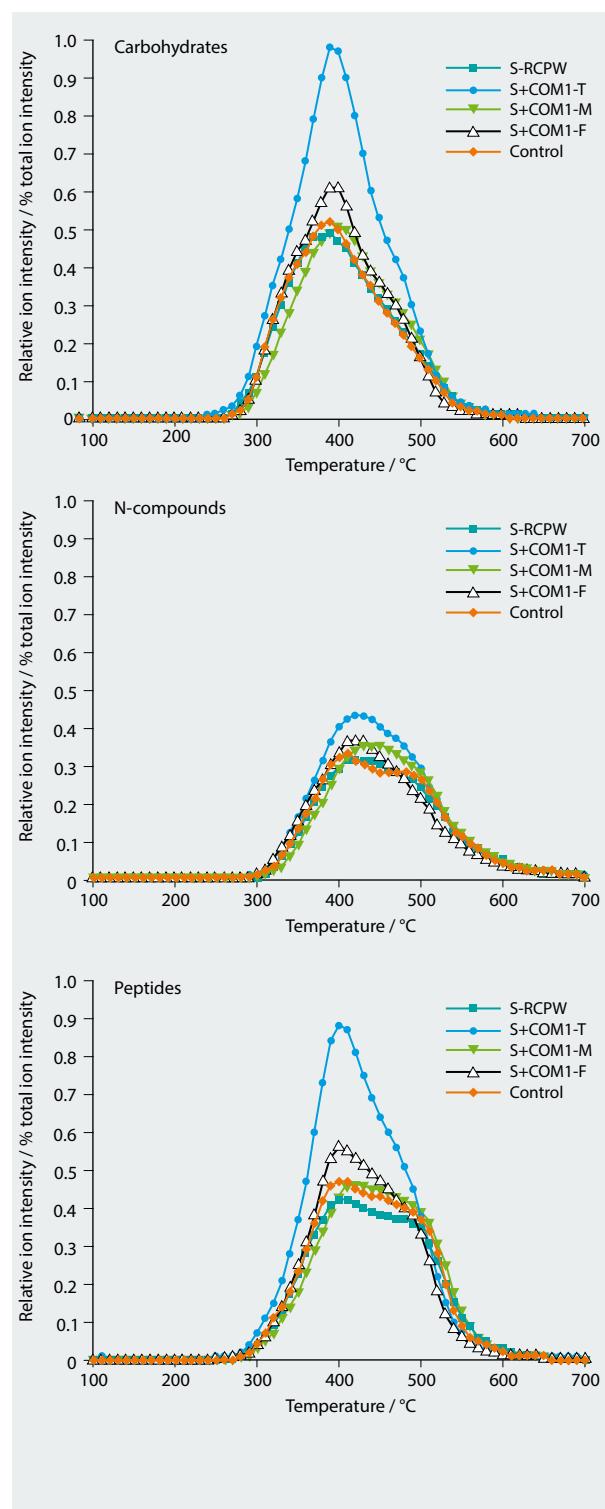
compost addition, irrespective of the compost maturation (Buurman et al., 2007; Stewart et al., 2011). For instance similarly large proportions of phenols/lignin monomers, lipids and alkylaromatics were also observed in both fresh and decomposed plant materials (Leinweber and Schulten, 1999), in a fresh coffee pulp waste (Negassa et al., 2011), and in long-term compost-fertilized soils (Eshetu et al., 2012). The small suberin proportions in all samples (Table 3) are explained by the origin of suberin from bark and outer covering of twigs (Hempfling et al., 1991) which were absent in these samples. The average molecular weights of the compost-amended soils agree with the results recorded for SOM accumulated after 19 and 34 years of a humus-formation experiment (Schulten et al., 1992), are greater than values observed in soils under potato cultivation and crop rotation (Schulten and Hempfling, 1992) and are below values from pig slurry fractions (Aust et al., 2009).

Figure 3 shows the temperature-resolved volatilization curves of those compound classes that were particularly enriched in the soil incubated with compost from the thermophilic phase. The maximum volatilization occurred at 390 °C (carbohydrates), 420°C (N-compounds) and 410 °C (peptides). The thermograms indicate that compounds enriched in treatment S+COM1-T were volatilized over the whole temperature range. In other words, there is no enrichment in a particularly low or high temperature range. This was also true for the comparison of the other organic amendments and the control (Figure 3).

The thermograms for N-compounds and peptides in Figure 3 show some differences to the corresponding thermograms obtained for similarly treated compost from coffee pulp waste and fruit waste (Eshetu et al., 2013). In the latter more complex compost the volatilization maxima were at 10 to 50 °C higher pyrolysis temperature, indicating that the organic parent materials affect the stability of the compost in

**Figure 2**

Summed and averaged pyrolysis-field ionization mass spectra and thermograms of total ion intensity (TII, upper right inserts) of Nitisol soil samples amended with composts taken in different phases of composting (COM – compost; T – thermophilic phase; M – mesophilic phase; F – final stage)

**Figure 3**

Thermograms for the evolution of carbohydrates, N-compounds, and peptides derived from the pyrolysis-field ionization mass spectra

soil even when it was removed from the composting in an early phase. The broad temperature range in which the enriched compound classes were thermally volatilized point to the presence of both, labile and rather stable humified organics which originate from microbes and the compost (Schulzen and Hempfling, 1992; Stuczynski et al., 1997; Nierop et al., 2001; Kögel-Knabner, 2002). The lowest proportion of these fractions in S+RCPW provides evidence that non-altered plant materials scarcely contributed to the observed enrichment when the compost COM1-T was incubated with soil. More likely is the origin of these carbohydrates and protein from the microbial biomass such as fungi and bacteria (Zech et al., 1997) which possibly reach a maximum abundance in the thermophilic phase of composting. Furthermore, the described enrichment in carbohydrates and protein-derived compounds well agrees with findings from Lima et al. (2009) who reported larger proportions of these compound classes in compost-amended soils than in soil that received fresh manure. Their soil was dominated by the silt fraction (76 %) and compost effects were determined by ^{13}C NMR spectroscopy. Thus, the abundance of reactive surfaces from silt (Lima et al., 2009) or clay (Nitisol of the present study) supports the stabilization of these labile organic compounds of microbial origin, making them non-decomposable in short-term incubation under optimized aerobic and moisture conditions. The observed lower proportions of carbohydrates, peptides and N-compounds in the soil amended with the raw coffee pulp waste or composts taken at later stages of composting can be explained by the decrease in microbial activity and microbial residues after the rapid consumption of easily degradable organic matter and high temperatures during the thermophilic phase (Dignac et al., 2005) and a progressive decrease of carbohydrate content during composting (Chefetz et al., 1996; Spaccini and Piccolo, 2007).

4 Conclusions

The Py-FIMS for the first time provided compelling evidence that the phase after which compost is applied to soil finally determines how stable it is in the soil. Furthermore, the results from this study suggest that it may be better to end up the composting of coffee pulp waste immediately after a short thermophilic phase and apply this "fresh" compost to soil rather than processing the compost through a mesophilic (cooling) and maturation phase of composting. Since the Nitisol used in this study was particularly rich in clay, binding of intermediate decomposition products and microbial metabolites to reactive surfaces or in clay aggregates is the best explanation for the enrichment of carbohydrates and various non-cyclic and cyclic N-containing compounds. However, our results based on small-scale laboratory incubation experiment are restricted to a single soil type and under exclusion of factors such as temperature/moisture fluctuations, meso- and macrofauna or plants and other field heterogeneity in general, so that further research in the field or using field replicates as well as investigating different soil types is recommended.

Acknowledgments

The ECPB-DAAD program provided a scholarship for Eshetu Bekele. The Mass Spectrometry Laboratory of the Rostock Soil Science group was supported by the "Exzellenzförderprogramm" of the Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Mecklenburg-Western Pomerania, project UR 07 079. Furthermore, we thank Dr.-Ing. R. Beese, University of Rostock, for technical support with the Py-FIMS measurements and data analyses.

References

- Adani F, Genevini P, Ricca G, Tambone F, Montoneri E (2007) Modification of soil humic matter after 4 years of compost application. *Waste Manag* 27:319-324
- Aust M-O, Thiele-Bruhn S, Eckhardt K-U, Leinweber P (2009) Composition of organic matter in particle size fractionated pig slurry. *Biores Technol* 100:5736-5743
- Bernal MP, Sánchez-Monedero MA, Paredes C, Roig A (1998) Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during incubation with soil. *Agric Ecosyst Environ* 69:175-189
- Bolan NS, Kunhikrishnan A, Choppala GK, Thangarajan R, Chung JW (2012) Stabilization of carbon in composts and biochars in relation to carbon sequestration and soil fertility. *Sci Total Environ* 424:264-270
- Brunn TB, Elberling B, Christensen BT (2010) Lability of soil organic carbon in tropical soils with different clay minerals. *Soil Biol Biochem* 42:888-895
- Bustamante MA, Said-Pullicino D, Paredes C, Cecilia JA, Moral R (2010) Influences of winery-distillery waste compost stability and soil type on soil carbon dynamics in amended soils. *Waste Manag* 30(10):1966-1975
- Buurman P, Peterse F, Martin GA (2007) Soil organic matter chemistry in allophanic soils : a pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol catena. *Eur J Soil Sci* 58:1330-1347
- Chefetz B, Hatcher PG, Hadar Y, Chen Y (1996) Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *J Environ Quality* 25:776-785
- Dignac MF, Houot S, Derenne S, Francou C, Derenne S (2005) Pyrolytic study of compost and waste organic matter. *Org Geochem* 36:1054-1071
- Eshetu B, Jandl G, Leinweber P (2012) Compost changed soil organic matter molecular composition : a study by Py-GC/MS and Py-FIMS. *Compost Sci Util* 20:230-238
- Eshetu B, Baum C, Leinweber P (2013) Compost of different stability affects the molecular composition and mineralization of soil organic matter. *Open J Soil Sci* 3:58-69
- Fernández JM, Hernández D, Plaza C, Polo A (2007) Organic matter in degraded agricultural soil amended with composted and thermally-dried sewage sludge. *Sci Total Environ* 378:75-80
- Fortuna A, Harwood RR, Kizilkaya K, Paul EA (2003) Optimizing nutrient availability and potential carbon sequestration in an agro-ecosystem. *Soil Biol Biochem* 35:1005-1013
- Franke M, Jandl G, Leinweber P (2006) Organic compounds in re-circulated leachates of aerobic biological treated municipal solid waste. *Biodegradation* 17:473-485
- Franke M, Jandl G, Leinweber P (2007) Analytical pyrolysis of re-circulated leachates : towards an improved municipal waste treatment. *J Anal Appl Pyrolysis* 79:16-23
- Gezahegne B, Fikre L, Mulatu W (2011) Exploring the suitability of coffee pulp compost as growth media substitute in greenhouse production. *Int J Agric Res* 6(3):255-267
- Gleixner G, Poirier N, Bol R, Balesdent J (2002) Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil. *Org Geochem* 33:357-366
- González-Vila FJ, Almendros G, Madrid F (1999) Molecular alterations of organic fractions from urban waste in the course of composting and their further transformation in amended soil. *Sci Total Environ* 236:215-229

- Grandy AS, Neff JC (2008) Molecular C dynamics downstream : the biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function. *Sci Total Environ* 404:297-307
- Gregorich EG, Monreal CM, Schnitzer M, Schulten H-R (1996) Transformation of plant residues into SOM : chemical characterization of plant tissue, isolated soil fractions, and whole soils. *Soil Sci* 161:680-693
- Hempfing R, Simmleit N, Schulten H-R (1991) Characterization and chemo-dynamics of plant constituents during maturation, senescence and humus genesis in spruce ecosystems. *Biogeochemistry* 13:27-60
- ISSS-ISRIC-FAO (1998) World Reference Base for Soil Resources. FAO, World Soil Resources Report No. 84, Rome
- Kögel-Knabner I (2002) The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biol Biochem* 34:139-162
- Lal R (2002) The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Adv Agron* 74:155-192
- Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1627
- Lattimer RP, Schulten H-R (1983) Field desorption of hydrocarbon polymers. *Int J Mass Spectrom Ion Phys* 52:105-116
- Leifeld J, Siebert S, Kögel-Knabner I (2002) Changes in the chemical composition of soil organic matter after application of compost. *Eur J Soil Sci* 53:299-309
- Leinweber P, Blumenstein O, Schulten H-R (1996) Organic matter composition in sewage farm soils : investigations by ¹³C-NMR and pyrolysis-field ionization mass spectrometry. *Eur J Soil Sci* 47:71-80
- Leinweber P, Jandl G, Eckhardt K-U, Schlichting A, Hofmann D, Schulten H-R (2009) Analytical pyrolysis and soft ionization mass spectrometry. In: Senesi N, Xing B, Huang PM (eds) Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems. Hoboken : Wiley, pp 533-582
- Leinweber P, Schulten H-R (1993) Dynamics of soil organic matter studied by pyrolysis-field ionization mass spectrometry. *J Anal Appl Pyrolysis* 25: 123-136
- Leinweber P, Reuter G (1992) The influence of different organic fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl. *Biol Fertil Soils* 13:119-124
- Leinweber P, Schulten H-R (1999) Advances in analytical pyrolysis of soil organic matter. *J Anal Appl Pyrolysis* 49:359-383
- Lima DLD, Santos MS, Scherer WH, Schneider JR, Duarte CA, Santos BH, Esteves IV (2009) Effects of organic and inorganic amendments on soil organic matter properties. *Geoderma* 150:38-45
- Mondini C, Cayuela ML, Sinicco T, Cordaro F, Roig A, Sánchez-Monedero MA (2007) Greenhouse gas emissions and carbon sink capacity of amended soils evaluated under laboratory conditions. *Soil Biol Biochem* 39:1366-1374
- Nardi S, Morari F, Berti A, Tosoni M, Giardini L (2004) Soil organic matter properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilizers. *Eur J Agron* 21:357-367
- Negassa W, Baum C, Leinweber P (2011) Soil amendment with agro-industrial products : molecular-chemical compositions and effects on soil biochemical activities and phosphorous fractions. *J Plant Nutr Soil Sci* 174:113-120
- Nierop KGJ, Pulleman MM, Marinissen JCY (2001) Management-induced OM differentiation in grassland arable soil : a study using pyrolysis techniques. *Soil Biol Biochem* 33:755-764
- Paul EA, Clark FE (1989) Soil microbiology and biochemistry. San Diego : Academic Pr, 237 p
- Piccolo A, Spaccini R, Nieder R, Richter J (2004) Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter. *Clim Change* 67:329-343
- Rivero C, Chirenje T, Ma LQ, Martinez G (2004) Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. *Geoderma* 23:355-361
- Sánchez-Monedero MA, Cayuela ML, Mondini C, Serramia N, Roig A (2008) Potential of olive mill wastes for soil carbon sequestration. *Waste Manag* 28:767-773
- Sánchez-Monedero MA, Serramia N, Civantos CGO, Fernandez-Hernandez A, Roig A (2010) Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agro-industrial by-products. *Chemosphere* 81:18-25
- Schulten H-R, Hempfing R (1992) Influence of agricultural soil management on humus composition and dynamics : classical and modern analytical techniques. *Plant Soil* 142:259-271
- Schulten H-R, Leinweber P, Reuter G (1992) Initial formation of soil organic matter from grass residues in a long-term experiment. *Biol Fertil Soils* 14:237-245
- Smidt E, Eckhardt K-U, Lechner P, Schulten H-R, Leinweber P (2005) Characterization of different decomposition stages of biowaste using FT-IR spectroscopy and pyrolysis-fieldionization mass spectrometry. *Biodegradation* 16:67-79
- Spaccini R, Sannino D, Piccolo A, Fagnano M (2009) Molecular changes in organic matter of a compost amended soil. *Eur J Soil Sci* 60:287-296
- Spaccini R, Piccolo A (2007) Molecular characterisation of compost at increasing stages of maturity : II: Thermochemolysis-GC-MS and ¹³C-CP-MAS-NMR spectroscopy. *J Agr Food Chem* 55:2303-2311
- Stewart CE, Neff JC, Amatangelo KL, Vitousek PM (2011) Vegetation effects on soil organic matter chemistry of aggregate fractions in a Hawaiian Forest. *Ecosystems* 14:382-397
- Stuczynski TI, McCarty GW, Reeves JB, Wright RJ (1997) Use of pyrolysis GC/MS for assessing changes in soil organic matter quality. *Soil Sci* 162:97-105
- Weber J, Karczewska A, Drozd J, Licznar M, Licznar S, Jamroz E, Kocowicz A (2007) Agricultural and ecological aspects of a sandy soil as affected by the application of municipal solid waste composts. *Soil Biol Biochem* 39:1294-1302
- Zech W, Senesi N, Guggenberger G, Kaiser K, Lehmann J, Miano TM, Miltner A, Schroth G (1997) Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79:117-161
- Zucconi F, Monaco A, Forte M (1985) Phytotoxins during the stabilization of organic matter. In: Gasser JKR (ed) Composting of agricultural and other wastes. London : Elsevier, pp 73-86

Inhalt · Content

Sascha A. Weber, Petra Salamon und Heiko Hansen

Volatile Weltmarktpreise von Milchprodukten und ihr Einfluss auf die nationale Preisbildung:

103 **Der deutsche Käsemarkt**

Karsten Mohr und Ulrich Dämmgen

Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen Teil 1. Bestimmung und Bewertung von Dosis-Größen

115 **Karsten Mohr und Ulrich Dämmgen**

Belastung von Wäldern in Nordwest-Niedersachsen durch Ammoniak und Ammonium in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen Teil 2. Wirkungen auf Böden und Vegetation

Inka-Donata Niehoff, Liane Hüther, Peter Lebzien and Gerhard Flachowsky

The effect of a Niacin supplementation to different diets on ruminal fermentation and flow of nutrients

143 **to the duodenum of dairy cows**

Sandra Rose-Meierhöfer, Ulrich Ströbel, Andy Bauermeister, Christin Jaroszynski, Christian Ammon und Reiner Brunsch

Einfluss von Drosselventilquerschnittfläche und Durchflussmenge auf das Melkvakuum an der Zitzen spitze bei viertelgetrennten Melksystemen

155 **Elena Ilișiu, Stelian Dărăban, Răducu Radu, Ioan Pădeanu, Vasile-Călin Ilișiu, Constantin Pascal and Gerold Rahmann**

161 **The Romanian Tsigai sheep breed, their potential and the challenges for research**

Rainer Duttmann, Joachim Brunotte und Michaela Bach

Evaluierung der schlaginternen Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen

171 **für den Praktiker**

Bekele Eshetu, Kai-Uwe Eckhardt and Peter Leinweber

Soil organic matter alterations by short-term composted coffee pulp waste: evidence from pyrolysis-field

191 **ionisation mass spectrometry**

Landbauforschung
*Applied Agricultural
and Forestry Research*

Herausgeber · Editor

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

Vol. 63

Preis · Price 8 €

No. 2 · 06.2013

ISSN 0458-6859