

**Schriftenreihe des Instituts für
Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel**

*Series of the Institute of
Crop Science and Plant Breeding
Kiel University*

Grünland und Futterbau / Ökologischer Landbau

Grass and Forage Science / Organic Agriculture



Brigitte Köhler

**Untersuchungen zur quantitativen Erfassung
von Masse- und Stoffströmen im
Futterbaubetrieb**

Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Heft 117, 2024

Series of the Institute of Crop Science and Plant Breeding
at Kiel University, No 117, 2024

*veröffentlicht mit Genehmigung
der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät*

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Christian-Albrechts-Platz 4
24118 Kiel, Germany

ISSN: 1435-2613

CC-BY 4.0

Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
- Grünland und Futterbau/Ökologischer Landbau -
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Untersuchungen zur quantitativen Erfassung von Masse- und Stoffströmen im Futterbaubetrieb

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Dipl.-Ing. agr.
Brigitte Köhler
aus Hof
Kassel, 2023

Dekan: Prof. Dr. Georg Thaller

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Friedhelm Taube

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Hubert Spiekers

Tag der mündlichen Prüfung: 01.11.2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1	Generaleinleitung.....	10
1.1	Quantifizierung von Stoffströmen in Futterbaubetrieben.....	10
1.2	Bedeutung der Grobfutterproduktion.....	15
1.3	Prozessanalyse zur Grobfutterbereitstellung mittels quantitativer Ertrags- und Verlustfassung.....	21
1.4	Zielstellungen.....	27
1.5	Literatur.....	30
2	Leistungen vom Grünland im Futterbaubetrieb – Analyse auf Betriebsebene unter bayerischen Standortbedingungen	41
2.1	Einleitung und Problemstellung	41
2.2	Material und Methoden	43
2.2.1	Standort- und Betriebscharakteristik	43
2.2.2	Datenerhebungen	46
2.3	Ergebnisse.....	50
2.3.1	Ertragsanalyse.....	50
2.3.2	Rohprotein-, Energie- und Nährstofferträge.....	58
2.3.3	Nährstoffsalden vom Grünland	62
2.4	Diskussion	63
2.4.1	Produktivität des Grünlands.....	63
2.4.2	Rohprotein- und Energieerträge vom Grünland	65
2.4.3	Optimierungspotenziale im Futterbausystem.....	67
2.5	Schlussfolgerungen	69
2.6	Zusammenfassung	70
2.6.1	Zusammenfassung	70
2.6.2	Summary	71
2.7	Literatur.....	73
3	Dry matter losses of grass, lucerne and maize silages in bunker silos	83
3.1	Abstract.....	83
3.2	Introduction	83

3.3	Material and methods	84
3.4	Results and discussion	86
3.5	Conclusions	91
3.6	References	92
4	Dry-matter losses and changes in nutrient concentrations in grass and maize silages stored in bunker silos	95
4.1	Abstract.....	95
4.2	Introduction	96
4.3	Materials and methods.....	97
4.3.1	Silage production	99
4.3.2	Investigations of DM losses	101
4.3.3	Investigation of changes in nutrient concentrations	102
4.3.4	Statistical analysis.....	104
4.4	Results.....	104
4.4.1	Silage management.....	104
4.4.2	DM losses and changes in nutrient concentration.....	106
4.5	Discussion	109
4.5.1	DM losses	109
4.5.2	Changes in nutrient concentration	111
4.6	Conclusions	113
4.7	References	114
5	Generaldiskussion	120
5.1	Einleitung.....	120
5.2	Zusammenfassende Darstellung und Einordnung der Untersuchungsergebnisse.....	122
5.3	Futtermengen im Futterbaubetrieb – Kaskade vom Feld bis zum Tier.....	124
5.4	Produktivität und Leistungen vom Grobfutter im Futterbaubetrieb.....	133
5.5	Optimierungsansätze und Ausblick.....	138
5.6	Literatur.....	141
6	Zusammenfassung.....	150
6.1	Zusammenfassung	150
6.2	Summary	152
Danksagung		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Stickstoff-Saldo der landwirtschaftlichen Stickstoff-Gesamtbilanz in Bezug auf die landwirtschaftliche Fläche (kg N/ha) von 1990 bis 2020 und der Zielsetzung bis 2030.....	12
Abbildung 1.2: Begriffsdefinitionen der Masse- und Stoffströme im Futterbaubetrieb.....	23
Abbildung 2.1: Standorte der Betriebe in Bayern.....	44
Abbildung 2.2: Ertragsanteile der Hauptbestandsbildner (HBB) der Gräser sowie der Artengruppen aus Bestandsaufnahmen von ausgewählten Schlägen je Betriebsstandort getrennt nach WT mit Angabe der FWZ und ArtZ.....	47
Abbildung 2.3: Ernteerträge vom Grünland auf Schlagebene der untersuchten Betriebe aus den Jahren 2009 – 2012.....	51
Abbildung 2.4: Regressionsgleichungen nach den ertragsrelevanten Faktoren differenziert nach den WT.....	55
Abbildung 2.5: Kalibrationsstatistik der simulierten zu den gemessenen Ernteerträgen je Schnitt an vier Betriebsstandorten aus drei Jahren.....	57
Abbildung 2.6: Regression der Ernteerträge (dt TM/ha) und der XP-Gehalte (gewichtet nach TM-Ertrag (g/kg TM) auf die XP-Erträge (XPE) (dt/ha).....	60
Figure 3.1: Principle of measurements used for the total-in vs. total-out method.....	85
Figure 3.2: DM losses (%) of silages determined by the total-in vs. total-out method.....	89
Figure 4.1: Measurements based on the total-in versus total-out method.....	98
Figure 4.2: Comparison of the means across groups of grass (GS) and whole-crop maize material (MS) regarding DM losses (DM _{total-in:total-out}), proximate constituents, nitrogen (N), phosphorus (P) and energy values (GE and NEL) (in g/kg DM unless stated).....	107
Figure 4.3: Dry matter (DM) losses (%) of the investigated bunker silos (n=64) with grass, whole-crop maize and “sandwich” (grass and whole-crop maize) silages, as shown by boxplots.....	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Flächenentwicklung (in ha) der Bodennutzung Dauergrünland und Feldfutterbau (inkl. Silomais) in Bayern im Zeitraum von 2010 bis 2020	17
Tabelle 1.2: Energieverluste sowie deren Hauptfaktoren auf den jeweiligen Prozessebenen nach ZIMMER (1980).....	25
Tabelle 2.1: Standort- und Bewirtschaftungscharakteristik der untersuchten Betriebe.....	45
Tabelle 2.2: Einteilung der Wiesentypen nach Gräser-Ertragsanteilen (EA).....	46
Tabelle 2.3: Datenerhebung und Analytik zur Gesamtanalyse des Grünlands an den untersuchten Betrieben.....	48
Tabelle 2.4: Ernteerträge im vierjährigen Mittel von den Grünlandflächen je Betrieb mit Angabe von Niederschlags- und Bewirtschaftungsdaten sowie der Stickstoffverwertung (NUE).....	52
Tabelle 2.5: Ertragsrelevante Faktoren zu den Ernteerträgen (dt TM/ha) sowie deren Schätzwerte der Ertragsfunktion aus der Kovarianzanalyse von ausgewählten Schlägen (n=64).....	54
Tabelle 2.6: Simulierte Ernteerträge (dt TM/ha) je Jahr und im neunjährigen Mittel (2006 – 2014) an vier Betriebsstandorten.....	58
Tabelle 2.7: XP- bzw. N- und Energie-Erträge (\pm s) vom Grünland sowie mittlere XP-, N-, Energie- bzw. Mineralstoffgehalte und N:S-Quotient der Betriebe bei Silagenutzung (Analysen vom Anwelkgut) im vierjährigen Mittel (2009 – 2012) mit Angabe der Schnittintensität (SI).....	59
Tabelle 2.8: Nährstoffsalden der aggregierten Grünlandflächen je Betrieb über Nährstoffzu- und -abfuhr (NPK) im vierjährigen Mittel (2009 – 2012).....	62
Table 3.1: Chemical composition, feeding value and fermentation coefficients of three different types of ensiled material.....	87
Table 3.2: Parameters for preservation quality and feed management for the three different types of silage material.....	88
Table 3.3: Correlation coefficients of density and feed out rate with the dry matter losses of the maize and grass silos.....	90
Table 4.1: Criteria of the measurements for feed material analysis.....	100

Table 4.2: Sampling frequency of the investigated materials (grass; whole-crop maize).....	102
Table 4.3: Root mean square error of prediction ¹ [RMSEP] (%) of the applied NIRS calibration equations for grass and maize and their products [empirical values (unpublished)].....	103
Table 4.4: Ensilability of the pre-ensiled material plus the chemical and physical parameters of the silage material (grass; whole-crop maize) from the silo controls as defined in Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (2011).....	105
Table 4.5: The Pearson's correlation coefficient (r) of the feed-out rate and the bulk density in relation to the DM losses (%) of the investigated silos (n = 64).....	110
Tabelle 5.1: Futter- und Leistungsdaten der Milchviehherden von zwei Betrieben (ACH und ALM), berechnet auf Basis der erfassten Futtermittelverbräuche in den Jahren 2010 und 2011.....	129
Tabelle 5.2: Verluste an Futtermengen (dt TM/ha; % TM) entlang der Kaskade (vom Feld bis zum Trog) ausgehend vom Grünland zur Ermittlung des Futtermittelverbrauchs am Trog (dt TM/ha) anhand der eigenen Studie.....	132

Abkürzungsverzeichnis

ADFom	Ash-excluded acid detergent fibre
aNDFom	Amylase-treated ash-excluded neutral detergent fibre
ArtZ	Artenanzahl
BC	Buffering capacity
BLAG	Bund-Länder-Arbeitsgruppe
BKR	Boden-Klima-Raum
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMJ	Bundesministerium der Justiz
BZA	Betriebszweigauswertung
CFU	colony forming unit
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
COMPASS	Comparative assessment of land use systems
CV	Variationskoeffizient
DGL	Dauergrünland
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DüV	Düngeverordnung
DW	Deutsches Weidelgras
DWD	Deutscher Wetterdienst
EA	Ertragsanteil
ECM	Energiekorrigierte Milch
EE	Ether extract
ESOM	Enzyme-soluble organic matter
EU	Europäische Union
FC	Fermentation coefficient
FM	Frischmasse
FOPROQ	Forage Production Quality
FUE	Futternutzungseffizienz
FWZ	Futterwertzahl
GE	Bruttoenergie (gross energy)
GF	Grobfutter
GFF	Grobfutterfläche
GFL	Grobfutterleistung
GJ	Gigajoule
GPS	Ganzpflanzensilage
GS	Grassilage
Ha	Hektar
HBB	Hauptbestandsbildner
K	Kalium
KF	Kraftfutter
IFSM	Integrated Farm System Model
IQR	Interquartilabstand
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LN	Landwirtschaftlich genutzte Fläche
LVFZ	Lehr-, Versuchs- und Fachzentren
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
Mg	Magnesium

MS	Maissilage
N	Stickstoff (Nitrogen)
ND	Jahresniederschläge
NEL	Nettoenergielaktation
NH ₃	Ammoniak
NIR	Nahinfrarot
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
NO ₃	Nitrat
NPN	Nicht-Protein-Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NUE	Nitrogen use efficiency (Stickstoffnutzungseffizienz)
nXP	Nutzbares Rohprotein
OM	Organic matter
P	Phosphor
PPO	Polyphenoloxidase
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RMSE	Root mean square error
RMSEP	Root mean square error of prediction
RNB	Ruminale Stickstoffbilanz
StMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
StoffBilV	Stoffstrombilanzverordnung
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TMR	Total mixed ration
UBA	Umweltbundesamt
UDP	Pansenstabiles Protein (undegradable protein)
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
WJ	Wirtschaftsjahr
WT	Wiesentyp
XP	Rohprotein
XPE	Rohproteinерtrag

Kapitel 1

Generaleinleitung

1 Generaleinleitung

1.1 Quantifizierung von Stoffströmen in Futterbaubetrieben

Futterbau-Produktionssysteme sind durch sehr komplexe Stoffströme gekennzeichnet, in denen vielfältige Interaktionen die Stoffkreisläufe zwischen Boden, Pflanze, Tier und Umwelt beeinflussen. In dem Zusammenhang ist die Landwirtschaft gefordert, ihre betrieblichen Nährstoffkreisläufe zu optimieren, Nährstoffverluste in den Produktionssystemen möglichst zu begrenzen und negative Umwelteffekte weitgehend zu vermeiden. Dabei stehen die Futterbaubetriebe vor der Herausforderung, eine wirtschaftliche Produktion unter Einhaltung zunehmend ressourcen- und umweltschonender Standards umzusetzen (Godfray & Garnett, 2014; Taube, 2014a). Die hohe Flächenkonkurrenz und die im globalen Kontext weiterhin steigende Nachfrage nach Lebensmitteln tierischer Herkunft verschärfen die Anforderungen an eine wirtschaftliche und zugleich umweltverträgliche Produktion (Godfray et al., 2010; Heißenhuber, 2010; Taube et al., 2014). Mit einem Anteil von 7,2 % an den gesamten Treibhausgas (THG)-Emissionen in Deutschland im Jahr 2021 (UBA, 2022b) ist die Landwirtschaft hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit sowohl Verursacher als auch Betroffener. Mit effizienten Futterbau-Produktionssystemen könnte sie einen wertvollen Beitrag zu einer klimaresilienten und klimaneutralen Produktion leisten. Auf dem Weg zur Klimaneutralität wird eine Verbesserung der N-Effizienz in Produktionssystemen als ein wesentliches Handlungsfeld beschrieben (Grethe et al., 2022).

Vor diesem Hintergrund werden Produktionssysteme verstärkt nach den Grundsätzen einer nachhaltigen Intensivierung bzw. nach Kriterien der Ökoeffizienz systematisch bewertet, wodurch die Wirkungen zwischen einer Produktivitätssteigerung einerseits und den Umweltbelastungen andererseits berücksichtigt werden (Taube et al., 2014; Reinsch et al., 2021). Neben der Ertragsleistung (Flächennutzungseffizienz) sind die Nährstoffnutzungseffizienz (N, P) sowie die Effekte der Landnutzung auf die Bereiche Wasserschutz, Klimaschutz und Biodiversität einzubeziehen (Misselbrook et al., 2013; Taube et al., 2014). Während die Forschung zur Beurteilung von Landnutzungssystemen häufig auf der Skalenebene des Landschaftsraums arbeitet, sollten in der Praxis stärker die Effekte auf Betriebs- und Schlagebene berücksichtigt werden (Taube & Kelm, 2006; Oenema, 2013). Gerade in

Futterbauproduktionssystemen liegen in der Praxis wenige Kenntnisse über die Stoffflüsse von der Fläche bis zum Trog vor. Hauptgrund hierfür ist die fehlende Mengenerfassung in der Praxis, zugleich zeigen Ergebnisse aus Untersuchungen zu Futterverlusten, dass ein erhebliches Potenzial zur Optimierung der Futterwirtschaft vorliegt (Wilkinson & Rinne, 2018; Borreani et al., 2018). Um die Anforderungen an ein nachhaltiges und ressourcenschonendes Futtermanagement zu erfüllen, sind Stoffflüsse verstärkt auf kleinräumiger Ebene, d. h. auf Betriebs- und Schlagebene, quantitativ und qualitativ zu erfassen. Darauf basierend sind mit einem systematisch erfassten Futtermanagement Optimierungsmaßnahmen entlang der gesamten Futterkette abzuleiten (Spiekers & Köhler, 2010; Köhler et al., 2014).

Bewertung von Produktionssystemen durch Bilanzen

Zur Einschätzung der Nährstoffeffizienz von Landnutzungssystemen werden Bilanzierungsmethoden auf unterschiedlichen Bezugsebenen herangezogen (Kolbe & Köhler, 2008). Nach FREDE & BACH (2014) sind Nährstoffbilanzen ein anerkanntes Instrument, um die Einhaltung der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft zu bewerten. Bei der Beurteilung von Umweltbelastungen aus der Landwirtschaft gelten N-Bilanzüberschüsse als Schlüsselindikatoren (Gutser, 2006; Bach, 2008). Trotz der Verschärfung der EU-Gesetzgebung zum Düngerecht (Nitrat- und Wasserrahmenrichtlinie) kommt es in der Landwirtschaft weiterhin zu Nährstoffüberschüssen bei Stickstoff und Phosphor (Häußermann et al., 2019). Die bestehende Problematik der N- und P-Überschüsse in viehstarken Regionen kann zudem nur auf Basis regionaler bzw. auf Landkreisebene abgegrenzter Nährstoffbilanzen erfasst werden (Häußermann et al., 2019). Gerade in viehintensiven Regionen im Nordwesten Deutschlands und in Teilen Bayerns wurden hohe N-Salden in Verbindung mit niedrigen N-Effizienzen festgestellt (Häußermann et al., 2020). Die regionalen Unterschiede in der Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) reichten im Pflanzenbau von 0,53 bis 0,79 (Häußermann et al., 2020). Speziell in Bayern lag der N-Überschuss der Flächenbilanz der Jahre 2015 bis 2017 im Mittel bei 84,1 kg N/ha LF, mit einer deutlichen Spannbreite auf Kreisebene (Häußermann et al., 2019). Deutschland wies anhand der N-Gesamtbilanz über einen längeren Zeitraum zu hohe N-Überschüsse auf und verfehlte damit das Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie Deutschlands, diese Überschüsse bis 2010 auf 80 kg N/ha zu verringern (Taubе et al., 2013). Die Nährstoffsituation erfordert weitere Regelungen bzw. Instrumente, um die

Nährstoffüberschüsse in der Landwirtschaft deutlich zu reduzieren. So wird auf nationaler Ebene auf Basis einer modifizierten Nachhaltigkeitsstrategie aus 2016 nun das Ziel verfolgt, die N-Salden bis 2030 auf einen Wert von unter 70 kg N/ha zu reduzieren (Abb. 1.1).

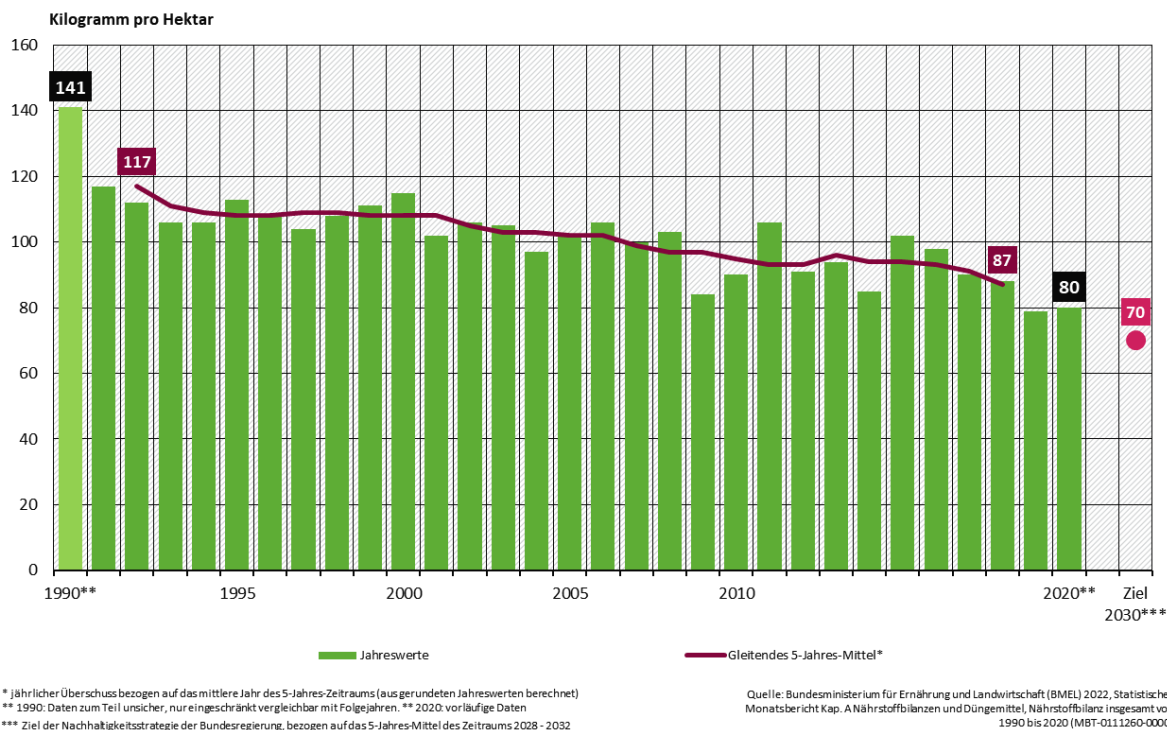


Abbildung 1.1: Stickstoff-Saldo der landwirtschaftlichen Stickstoff-Gesamtbilanz in Bezug auf die landwirtschaftliche Fläche (kg N/ha) von 1990 bis 2020 und der Zielsetzung bis 2030 (Quelle: UBA, 2022)

In der Kritik stand auch der bis 2019 vorgeschriebene Nährstoffvergleich (Feld-Stall-Bilanz), da insbesondere die N-Überschüsse von Futterbaubetrieben aufgrund der fehlenden Ertragsdaten systematisch unterschätzt wurden (UBA, 2016). Im ersten Schritt zur Novellierung der Düngeverordnung (DüV) wurde ein plausibilisierter Grundfutterertrag für die Erstellung des Nährstoffvergleichs eingeführt (BMEL, 2017), um die N-Abfuhr aus dem Grobfutter besser abzubilden (BLAG, 2012; Taube & Schütte, 2013). Der sogenannte „Grundfutterfaktor“ sollte dabei eine grobe Annäherung an die betriebliche Ertragssituation erreichen, ersetzte jedoch keine einzelbetrieblichen Ertragsdaten. Nach der gesetzlich vorgeschriebenen Düngebedarfsermittlung (BMEL, 2017) können die Stickstoffbedarfswerte abweichend von den bundeseinheitlich vorgeschlagenen Ertragsniveaus beim Grünland mit betrieblichen Ertragsdaten (im Durchschnitt der letzten fünf Jahre) unter

Berücksichtigung einer evtl. vorliegenden Ertragsdifferenz (mittels Zu-/Abschlägen) berechnet werden.

Aus der nachfolgenden Evaluierung der Düngeverordnungsmaßnahmen resultierte, dass mit der Novellierung im Mai 2020 der Nährstoffvergleich gestrichen wurde und die Umweltwirkung anhand der Einhaltung der Düngebedarfswerte für Stickstoff bewertet werden. Die ursprünglich ab 2023 für alle Betriebe zusätzlich geplante Stoffstrombilanzierung nach dem Hoftoransatz wird von Expertenseite als die einzig geeignete Methode angesehen, das betriebliche Nährstoffmanagement fundiert und überprüfbar abbilden zu können (VDLUFA, 2012). Weitere Vorschläge zur Bewertung von Milchvieh-/Futterbaubetriebssystemen unterbreiteten MACHMÜLLER & SUNDRUM (2015; 2016), in dem N-Mengenflüsse auf hierarchischer Ebene in Subsysteme zu unterteilen sind. Dadurch können innerbetriebliche N-Mengenflüsse besser abgebildet und die Aussagekraft im Hoftoransatz nochmals erhöht werden. Die Stoffstrombilanzierungsverordnung (StoffBiV), die zum 1. Januar 2018 in Kraft getreten ist (BMJ, 2017), wurde 2021 umfänglich evaluiert (Deutscher Bundestag, 2021). Aktuell hat die Bundesregierung den Entwurf eines neuen Düngegesetzes für eine Entscheidung im Bundestag im Herbst 2023 vorbereitet, mit dem die StoffBiV angepasst werden soll.

Die gesamte Diskussion zur Aussagefähigkeit von Bilanzen verdeutlicht, wie wichtig einzelbetriebliche Ertragsdaten sind, um in der Praxis ein entzugsorientiertes Nährstoffmanagement umzusetzen, bei dem negative Umwelteffekte vermieden werden. Grundsätzlich ist das Grünlandmanagement auf die Einhaltung von ausgeglichenen Schlagsalden auszurichten.

Bewertung von Produktionssystemen durch Untersuchungsmodelle

On-Farm-Studien weisen immer wieder darauf hin, dass für eine systematische Verminderung von N-Verlusten die N-Flüsse auf der gesamten Prozessebene zu betrachten sind (Rotz et al., 2006; Oenema, 2013). Neben hohen N-Effizienzen auf gesamtbetrieblicher Ebene sollte der Fokus auch auf einer optimalen N-Verwertung bei der Milchkuh liegen, die mit grundsätzlich rund 25 bis 33 % eher gering ist (Randby et al., 2012; Gerlach, 2020). Bei der Rationsgestaltung ist deshalb auf ein ausgewogenes Verhältnis von Energie- und Eiweißangebot zu achten, um optimale Bedingungen für die mikrobielle Proteinsynthese im Pansen bereitzustellen (Knaus &

Velik, 2005). Zu den weiteren Schritten im Produktionssystem, die auf eine hohe Nährstoffnutzungseffizienz auszurichten sind, gehören vor allem eine möglichst verlustarme Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger (Taube, 2014b).

Um der bis zur Jahrtausendwende zum Teil erheblichen Nährstoffproblematik in den spezialisierten Milchviehbetrieben zu begegnen, wurden verstärkt wissenschaftliche Untersuchungen auf Betriebsebene in Zusammenarbeit mit Praxisbetrieben durchgeführt (Oenema et al., 2001). Die Ergebnisse zum N-Management bzw. zu den N-Verlusten belegen, dass für eine Optimierung auf Betriebsebene gearbeitet werden muss (Aarts et al., 1992; Rotz et al., 2006). In Langzeitstudien mit Praxisbetrieben konnten die Einflüsse, die auf N- und P-Überschüsse und somit auf die N-Effizienz auf Betriebsebene einwirken, offengelegt werden. Untersuchungen von OENEMA (2013) zeigen, dass durch innerbetriebliche Maßnahmen wie z. B. reduzierte N-Düngung, verbessertes Güllemanagement, geringere Reproduktionsraten und niedrigere Rohproteingehalte in der Ration die Nährstoffausträge an N und P auf Betriebsebene deutlich reduziert werden konnten. Auch die On-Farm-Studie von REINSCH et al. (2021) zeigt, wie durch eine gezielte Integration von Klee grasflächen N-Überschüsse in Milchproduktionssystemen reduziert und damit die Ökoeffizienz in der Milchproduktion verbessert werden kann. Ein gesamtbetrieblicher Ansatz mit integrierten Messstellen im Praxisbetrieb (On-Farm Research) kann für praktische Umsetzungen erfolgreich in der Praxis angewandt werden. Darüber hinaus sollte das Wissen aus der On-Farm-Forschung verstärkt in die landwirtschaftliche Beratung transferiert werden.

Eine weitere Möglichkeit, komplexe Stoffströme und deren Einflussfaktoren zu erfassen, wird mit Hilfe der Modellierung verfolgt. Je nach Ansatz und Datenbasis werden über modellgestützte Analysen Aussagen zu Leistungen und Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Systeme ermöglicht. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme wird z. B. über das REPRO-Modell anhand der Berechnung von miteinander vernetzten Stoff- und Energieflüssen vorgenommen (Hülsbergen, 2014). Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit solcher Modelle sind umfangreiche valide Daten, die dem Modell zugrunde liegen.

Aufbauend auf wissenschaftlichen Untersuchungen, in denen Zusammenhänge zwischen Nutzungssystemen und Nährstoffeffizienzen analysiert wurden (z. B. N-Projekt Karkendamm, vgl. Taube & Wachendorf, 2000), können mit Hilfe von

modellgestützten Programmen Anpassungsstrategien auf Betriebsebene weiterverfolgt werden. Mit dem Simulationsmodell „IFSM“ (Integrated Farm System Model) wurde speziell auf die Wirkungsbeziehungen in Milchvieh-Futterbauproduktionssystemen eingegangen, um davon ausgehend Szenarien mit optimierten N-Kreisläufen berechnen zu können (Rotz et al., 2006; Powell & Rotz, 2015). In Untersuchungen des „COMPASS“-Projekts in Praxisbetrieben Schleswig-Holsteins wurden zwischen einzelnen Betrieben mit vergleichbarer Ausrichtung deutliche Unterschiede in den N-Bilanzsalden auf Hoftorbasis festgestellt, was auf ein erhebliches Optimierungspotenzial in der Praxis hinweist (Taube & Kelm, 2006). So zeigten die Milchvieh-/Futterbaubetriebe im Status quo im Mittel deutliche Unterschiede in den N-Salden von 127,3 kg N/ha bei konventioneller und 42,2 kg N/ha bei ökologischer Wirtschaftsweise. Bei ausgewählten Betrieben wurden mit Hilfe des „IFSM“ Managementstrategien abgeleitet, die zu reduzierten N-Salden führen sollten. Insgesamt beeinflussten die betriebsindividuellen Faktoren das Ergebnis sehr deutlich und sind differenziert zu betrachten. Es zeigte sich jedoch, dass eine an den Sollwert angepasste N-Düngung die größte Wirkung auf die Reduzierung des N-Saldos hatte (Taube & Kelm, 2006).

Modelle, die den Ertragszuwachs und die Qualitätsentwicklung bei Gräsern bzw. anderen Kulturen unter Berücksichtigung regionaler Witterungsbedingungen simulieren können, leisten einen weiteren Beitrag zur Erfassbarkeit von Erträgen und Futterqualitäten. Unter Einbeziehung standörtlicher Bedingungen und klimatischer Daten können langjährige Ertrags- und Qualitätsdaten simuliert werden, mit denen Bewirtschaftungseffekte abgeleitet und die Ertragsstabilität beurteilt werden können. Die Quantifizierung auf Betriebs- bzw. Schlagebene ist für das komplexe Futterbauproduktionssystem von grundlegender Bedeutung. Mittels eines fundierten Datenflusses auf Betriebsebene können Modellansätze entsprechend kleinräumiger Effekte besser validiert werden (Taube & Kelm, 2006). Die Etablierung einer konsequenten Ertragsermittlung würde somit einen wichtigen Beitrag zu einer effizienten und ressourcenschonenden Landnutzung leisten.

1.2 Bedeutung der Grobfutterproduktion

Die Futterproduktion hat für die Landwirtschaft in Deutschland eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Sie bildet die Grundlage für die gesamte tierische

Erzeugung, wobei die Milchproduktion als wichtigster Produktionszweig hervorzuheben ist. Innerhalb der Europäischen Union (EU-28) ist Deutschland seit vielen Jahren mit mehr als einem Fünftel der Milchmenge der größte Milchproduzent (Eurostat, 2020). Im Jahr 2018 wurden in Deutschland rund 33 Mio. Tonnen Kuhmilch erzeugt (BLE, 2019a). Vor allem in Bayern und Niedersachsen haben sich regionale Zentren der Milcherzeugung herausgebildet, die 2018 bereits rund 47 % der gesamten Milchmenge erzeugten (BMEL, 2019). Im Jahr 2021 produzierten die drei Bundesländer Bayern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen zusammen rund 58 % der an Molkereien gelieferten Milchmenge (BLE, 2022).

Auf EU-Ebene gibt es sehr unterschiedlich ausgeprägte Milchvieh-/Futterbauregionen, deren Strukturen in Bezug auf Produktivität und Grünlandnutzung bisher wenig untersucht wurden (Smit et al., 2008). Dennoch stellen die Autoren eine sehr enge Beziehung zwischen der Grünlandproduktivität und der Milcherzeugung fest. Gleichzeitig konnte anhand von regionalen Daten festgestellt werden, dass die Produktivität wesentlich mit der Jahresniederschlagssumme korreliert und weniger mit der Temperatursumme und der Dauer der Vegetationsperiode (Smit et al., 2008). Auch SPIEKERS et al. (2011) verweisen darauf, dass die Fütterung in Regionen mit intensiver Milcherzeugung überwiegend mit Grasprodukten erfolgt. Für die Betriebe ist daher eine optimale Grünlandnutzung ein wesentlicher Ansatz für das gesamte Futtermanagement.

Bezogen auf das Jahr 2021 betrug der Anteil des Dauergrünlands an der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LN) in der EU-27 rund 32 % (Eurostat, 2023), in Deutschland mit 4,7 Mio. ha 28,5 % der LN und in Bayern mit 34,1 % mehr als ein Drittel der LN (Destatis, 2021). Das Grünland in Bayern wird aufgrund unterschiedlicher Standortverhältnisse sehr differenziert bewirtschaftet, wobei die Nutzungsintensität der bayerischen Grünlandflächen überwiegend mit drei bis vier Schnitten angegeben wird (Hartmann et al., 2015). Rund 45 % der bayerischen Grünlandflächen werden als vier- bis mehrschnittig angegeben (Diepolder, 2012).

Gemäß ihrer betriebswirtschaftlichen Ausrichtung sind knapp 50 % aller landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern Futterbaubetriebe. Diese bewirtschaften über die Hälfte der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern (StMELF, 2018). 2016 nahmen die Futterpflanzen rund 13,4 % des Produktionswerts der bayerischen Landwirtschaft von insgesamt 10,2 Mrd. € ein (StMELF, 2018). Das

Grünland mit einem Anteil von rund 34 % an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern ist eine der wichtigsten Ressourcen für die Futterproduktion im Rinderbereich (Tab. 1.1).

Tabelle 1.1: Flächenentwicklung (in ha) der Bodennutzung Dauergrünland und Feldfutterbau (inkl. Silomais) in Bayern im Zeitraum von 2010 bis 2020

Bodennutzungsarten	2010	2013	2016	2020
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	3.136.843	3.136.200	3.125.366	3.079.500
Pflanzen zur Grünernte (Feldfutterbau)	513.972	543.400	596.026	620.000
- Silomais/Grünmais	376.857	389.200	435.284	431.200
- Leguminosen zur Ganzpflanzenernte (GPS)	97.727	103.500	97.842	112.600
- Feldgrasanbau auf dem Ackerland	23.370	26.700	21.144	28.500
- Getreide + andere Pflanzen zur GPS	16.017	24.100	41.756	47.700
Dauergrünland (DGL)	1.070.618	1.057.000	1.063.313	1.063.500
- Wiesen	734.180	715.200	717.212	709.200
- Weiden (einschl. Mähweiden + Almen)	296.705	299.500	306.162	314.400
- Ertragsarmes DGL (+ aus der Erzeugung genommenes DGL)	39.733	42.400	39.939	39.900

Quelle: Destatis, 2020 und 2020A

Insgesamt stehen mit dem Grünland und den Feldfutterflächen über 50 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) in Bayern für die Futter- und Substratwirtschaft zur Verfügung. Der Feldfutterbau mit einem durchschnittlichen Anteil von 28 % an der Ackerfläche wird zu rund 72 % vom Silomais dominiert (Tab. 1.1). Zu einem überwiegenden Anteil geht der Silomais in die Rinderfütterung und geschätzt zu einem Drittel in die Biogaserzeugung (StMELF, 2018). Nach der Auswertung der „BZA-Milch Bayern“ im WJ 2017/18 nahm die Maissilage im Durchschnitt einen Anteil von 50,7 % des Grobfutters ein (Dorfner & Hofmann, 2019).

Anteil Silagen in der Futterproduktion

Mit dem technischen Fortschritt in der Landwirtschaft hat sich auch die Futterproduktion in den letzten 50 Jahren stark verändert. Höhere Einzeltierleistungen

und größere Betriebseinheiten erfordern unter den gegebenen klimatischen Bedingungen eine ganzjährige optimale Futterbereitstellung (Wilkinson & Rinne, 2018). Auch wenn Silagen als Teil der Futterkomponenten nicht unabhängig vom gesamten Futterproduktionssystem betrachtet werden sollten (Rotz et al., 2003), waren die Fortschritte im Pflanzenbau, in der Mechanisierung und in der Kenntnis über die biochemischen Prozesse bei der Silierung wichtige Voraussetzungen für die zunehmende Silageproduktion (Wilkinson & Rinne, 2018). Im Zeitraum von 1975 bis 2000 war in den meisten europäischen Ländern ein deutlicher Anstieg in der Silageproduktion zu verzeichnen (Wilkinson & Toivonen, 2003). MUCK & KUNG (2007) beziffern für einige westeuropäische Länder in der gleichen Zeit eine Steigerung der Silageanteile von 40 % auf 67 % des Gesamtfuttermittels. In Europa ging die zunehmende Silageproduktion stärker zulasten von Beweidung und Heuproduktion (Wilkinson & Rinne, 2018). Anders entwickelte sich dies in den USA, wo die Heurationen relativ konstant blieben und die Silagebereitung in erster Linie mit Leguminosen, insbesondere mit *Medicago sativa*, deutlich anstieg (Muck & Kung, 2007). Weitere Fortschritte in der Futterkonservierung sorgten zunehmend für eine sichere Silagebereitung, zudem konnten die wesentlichen Ursachen für Nährstoffverluste benannt und der Futterwert von Silagen genauer analysiert werden (Wilkinson & Rinne, 2018). Infolgedessen nahmen in den Milchviehrationen die Silageanteile stetig zu. Die heutigen Erntetechniken und die optimal aufeinander abgestimmten Verfahrensabläufe gewährleisteten eine Silagebereitung bei hoher Produktionskapazität. So konnte sich die Silageproduktion für eine ganzjährige Futter- und Substratbereitstellung in der landwirtschaftlichen Praxis gut etablieren. WEINBERG & ASHBELL (2003) gehen von einer weltweiten Silageproduktion von ca. 200 Mio. Tonnen Trockenmasse (TM) pro Jahr aus. In Deutschland wurden im Zeitraum 2013 bis 2019 durchschnittlich 100 bis 120 Mio. Tonnen Silage (Gras und Silomais) pro Jahr erzeugt (BLE, 2019b).

Durch die Konservierung kommt es im Vergleich zu einer Frischfuttermittelvorlage zu unvermeidbaren Verlusten an Trockenmasse und Futterwert. Durch den Silierprozess werden unter anaeroben Bedingungen pflanzliche Kohlenhydrate (überwiegend Einfachzucker) mit Hilfe von Milchsäurebakterien in Milchsäure umgebaut, der pH-Wert sinkt und die Silage erreicht ein stabiles Stadium (Gerlach, 2020). Nach PAHLOW et al. (2003) läuft der Silierprozess grundsätzlich in vier Phasen ab: aerobe

Phase, Hauptgär-, Lager- und Entnahmephase. Ziel ist, die Verluste über die gesamte Zeit gering zu halten, indem optimale Bedingungen in den jeweiligen Phasen gewährleistet werden. In erster Linie sind alle konservierungstechnischen Grundregeln einzuhalten, damit der Energiewert des zu konservierenden Grobfutters weitgehend erhalten bleibt (Pahlow, 2007). Für eine höhere Effizienz in der Grobfutterbereitstellung sind die Verluste im Silo weiter zu reduzieren (Köhler et al., 2014). Da sich in der Praxis bislang keine praktische Methode zur Feststellung von TM-Verlusten etabliert hat, wurde die Quantifizierung von Futterverlusten über die gesamte Produktionskette bisher als Lösungsansatz zu wenig beachtet (Spiekers & Köhler, 2010; Gerlach, 2020). Erst auf dieser Basis können Schwachstellen im Produktionssystem betriebsindividuell sichtbar gemacht und Mängel abgestellt werden.

Mit dem Anwelken und während der Silierung finden bereits eiweißabbauende Prozesse statt, die durch eine „gute fachliche Praxis“ gering gehalten werden können. Im Wesentlichen verringert ein ausreichendes und schnelles Anwelken sowie eine schnelle und tiefe Ansäuerung des Siliergutes den Prozess des Eiweißabbaus (Hoedtke, 2010). Gärsäuren hemmen grundsätzlich die Aktivität eiweißabbauender Enzyme (Pahlow, 2007). Durch proteolytische und desmolytische Vorgänge verändern sich die Rohproteinfraktionen, sodass der Anteil an Reinprotein abnimmt und der Anteil an Nicht-Protein-Stickstoff (NPN)-Verbindungen zunimmt (Hoedtke, 2010). Als Qualitätsparameter für gute Silagen ist ein Wert von > 50 % an Reinprotein anzusehen (Spiekers & Brandl, 2018).

Das Grünlandfutter ist ein wertvoller Energie- und Eiweißlieferant, dessen Eiweißpotenzial durch ein optimales Grobfuttermanagement besser genutzt werden sollte. In der Milchproduktion beruht die Energie- und Eiweißversorgung zu einem überwiegenden Anteil auf dem Grobfutter. Der Rohproteinaufwand der Milchkühe kann beim heutigen Leistungsniveau von 6.000 bis 10.000 kg Milch pro Kuh und Jahr zu 75 % bis 50 % aus dem betriebseigenen Grobfutter gedeckt werden (Spiekers, 2014). Aus Sicht der Tierernährung wird eine hohe Gesamt-N-Effizienz in den Rationen angestrebt, in denen die Rohproteinversorgung möglichst nahe am ernährungsphysiologischen Bedarf an Aminosäuren liegt (Schuba & Südekum, 2012).

Unter den betriebseigenen Futtermitteln liefert Grassilage gemessen an verdaulichem Eiweiß den größten Anteil am Gesamtfutterraufkommen. Für das WJ 2017/18 wird dieser Anteil mit 15 % für Grassilage und mit 36 % für Gras und Silomais zusammen

(frisch, siliert und getrocknet) ausgewiesen (BLE, 2019b). Dennoch besteht in Deutschland eine sog. „Eiweißlücke“ mit einem Anteil von 25 % an verdaulichem Eiweiß im WJ 2021/22, die zur Deckung des Gesamteiweißbedarfs durch Importe gedeckt werden muss (BLE, 2023). Dieser so genannten Eiweißlücke stehen auf der anderen Seite erhebliche Exportvolumen gegenüber, die im Selbstversorgungsgrad vieler Produkte tierischer Herkunft von weit über 100 % zum Ausdruck kommen.

Die verstärkte Nutzung des Rohproteinpotentials aus heimischen Eiweißquellen ist erklärtes Ziel der Eiweißpflanzenstrategie des Bundes (BMEL, 2023), an der seit mehreren Jahren in Forschungs- und Demonstrationsvorhaben sowie in Länderinitiativen gearbeitet wird. In mehreren Studien wurde das Rohproteinpotenzial des Grünlands in Deutschland für verschiedene Nutzungsoptionen untersucht (Diepolder et al., 2013; Köhler et al., 2013a). Das Rohproteinangebot der Grünland- und Ackerfutterflächen (Luzerne, Klee gras und Acker gras) wird in Deutschland auf jährlich 6,9 Mio. Tonnen Rohprotein geschätzt (Stockinger & Schätzl, 2012). Auch dem bayerischen Grünland wird ein hohes Eiweißpotenzial zugeschrieben, das um ca. 20 % (rund 260.000 t XP) gesteigert werden könnte (Heißenhuber & Schätzl, 2013). Daher ist die Grünlandbewirtschaftung ein zentraler Ansatzpunkt der Bayerischen Eiweißinitiative zur verbesserten Versorgung mit heimischen Eiweißfuttermitteln. Die Ansätze dabei sind vielfältig und müssen neben pflanzenbaulichen Maßnahmen auch die Aspekte einer verlustarmen Futterbergung und Futterkonservierung einbeziehen, da das Grobfutterangebot „am Trog“ in Menge und Qualität für den Betrieb entscheidend ist (Köhler et al., 2013b).

Der Schlüssel für den Erfolg eines Milchviehbetriebs ist eine hohe Grobfutterleistung mit kostengünstig erzeugtem, qualitativ hochwertigem Grobfutter. Die in der Betriebszweigungsauswertung (BZA) ermittelten Kennwerte verdeutlichen aber immer wieder, dass die Futterkosten einen hohen Anteil der Gesamtkosten ausmachen (Dorfner et al., 2010; Dorfner & Hofmann, 2015), zum Beispiel in der BZA Bayern 40 % bis 60 % der gesamten Erzeugungskosten (Dorfner & Hofmann, 2019).

Bei den DLG-Spitzenbetrieben betrugen die Kostenunterschiede bei den Produktionskosten für Grassilage im Analysezeitraum 2008/09 bei den 25 % erfolgreichen Betrieben 12,4 €/dt TM und bei den 25 % weniger erfolgreichen Betrieben 26,3 €/dt TM (Dorfner et al., 2010). Bei solchen Kostenspannen wirkt sich das Ertragsniveau der Futterflächen deutlich auf der Kostenseite aus. In Bezug auf die

Futterkosten empfehlen Experten, neben der Optimierung der botanischen Zusammensetzung der Bestände zur Steigerung des energetischen Futterwerts durch hochwertige Gräser (Mues et al., 2021) den Bereich der Mechanisierung ebenfalls zu optimieren. Auch die Vollkostenanalyse (2016/17) der Rinderspezialberatung in Schleswig-Holstein zeigt diesen Zusammenhang zwischen hoher Grundfutterleistung und wirtschaftlichem Erfolg, jedoch müssen gleichzeitig höchste Futterqualitäten realisiert werden (Prokop, 2018). Die Produktionskennzahlen eines effizienten Weidesystems zeigen zum Beispiel, dass mit qualitativ hochwertigem Weidefutter und einem optimierten Weidemanagement kostengünstig Milch erzeugt und dabei gleichzeitig umweltrelevante Aspekte in den Produktionsprozess integriert werden können (Mues et al., 2021).

1.3 Prozessanalyse zur Grobfutterbereitstellung mittels quantitativer Ertrags- und Verlusterfassung

Um einzelbetriebliche Optimierungspotenziale in der Futterwirtschaft festzustellen, müssen Masse- und Nährstoffflüsse auf Betriebsebene quantifiziert werden. Bislang wurden jedoch die Prozesse zur Grobfutterbereitstellung auf Praxisebene zu wenig analysiert (Spiekers, 2008; Köhler et al., 2014; Gerlach, 2020). Differenzierte Aussagen zu Verlusten entlang des Produktionsprozesses zeigen auf, dass insgesamt Optimierungsansätze in den Praxisabläufen vorhanden sind (Spiekers et al., 2009a; Borreani et al., 2018). Die Prozessanalyse verfolgt den Ansatz, dass nur durch eine Quantifizierung der Masse- und Nährstoffflüsse auf Betriebsebene eine Verbesserung der Ressourcennutzungseffizienz in der Futterwirtschaft erreicht werden kann. Jedoch stellt die Komplexität der Stoffströme in einem Futterbaubetrieb sehr hohe Ansprüche an ein praxistaugliches Ertrags- und Mengenerfassungssystem. Die Bewertung von Milchproduktionssystemen macht eine Reihe von Kenngrößen erforderlich, da insbesondere die Erträge vom Grünland häufig nicht bekannt sind. Bisher werden für die Ableitung von Faustzahlen häufig Schätzwerte oder Daten aus Feldversuchen herangezogen, die die Vielzahl an ertragsbeeinflussenden Faktoren in der Praxis nur begrenzt berücksichtigen (Diepolder et al., 2013a). Für die BZA oder zur Nährstoffbilanzierung werden die Nettoerträge im Wesentlichen aus dem Futterbedarf der Tiere entsprechend den Leistungen abgeleitet. Der Ansatz für die Praxis, Mengenströme „vom Feld bis zum Trog“ zu erfassen, ist auch für Bilanzierungsmodelle

sowie für Modellierungen zur Bewertung gesamter Landnutzungssysteme relevant, da sich gleichzeitig die Aussagekraft der Modelle verbessern lässt. Die unterschiedlichen Nährstoffkreisläufe insbesondere der umweltrelevanten Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor sind genauer zu beleuchten und in Kombination mit dem Massefluss in ausreichender Genauigkeit festzuhalten (Köhler et al., 2014a).

Unbekannte Größenordnungen beim Grobfutter innerhalb der Produktionskette – von den Ertragspotenzialen bis zu den Verlusten – machen eine eindeutige Begriffsdefinition zur Erfassung von Schwachstellen vom Feld bis zum Trog notwendig. Werden Begriffe wie Brutto- und Nettoerträge in den Fachdisziplinen nicht einheitlich verwandt, so werden Verluste in der Kaskade von der „Wiese bis zum Trog“ nicht transparent abgebildet.

Die methodischen Ansätze in der Forschung zur Bewertung von Futterbauproduktionssystemen erfordern eine systemumfassende Betrachtung. Gleichzeitig müssen regionalspezifische Aspekte in die Modellansätze mit einbezogen (Taubе et al., 2014) sowie für verbesserte Managementmaßnahmen, z. B. zur Reduktion von Nährstoffüberschüssen, langjährige und gesamtbetriebliche Untersuchungen durchgeführt werden (Rotz et al., 2006). Um passende Nachhaltigkeitsmanagementsysteme für die Praxis bereitzustellen, bedarf es einer verstärkt interdisziplinären Zusammenarbeit innerhalb von Systemgrenzen. Dazu sind in den Futterbausystemen zur Erfassung der Masse- und Nährstoffströme die Ertrags- und Mengenebenen in den einzelnen Produktionsprozessen genau zu differenzieren und zu definieren. Auch GERLACH (2020) verweist auf die Notwendigkeit einer einheitlichen Nomenklatur, mit der Prozessabläufe in der Futterkonservierung besser beschrieben werden können. Vor diesem Hintergrund wurde in Abstimmung mit mehreren Fachdisziplinen für die Futterwirtschaft entlang der Prozesskette eine einheitliche Nomenklatur definiert, die fächerübergreifend klar abgegrenzte Ebenen schafft und damit zu einer besseren Aussagefähigkeit innerhalb der Futterbauproduktionssysteme führt (Abb. 1.2).

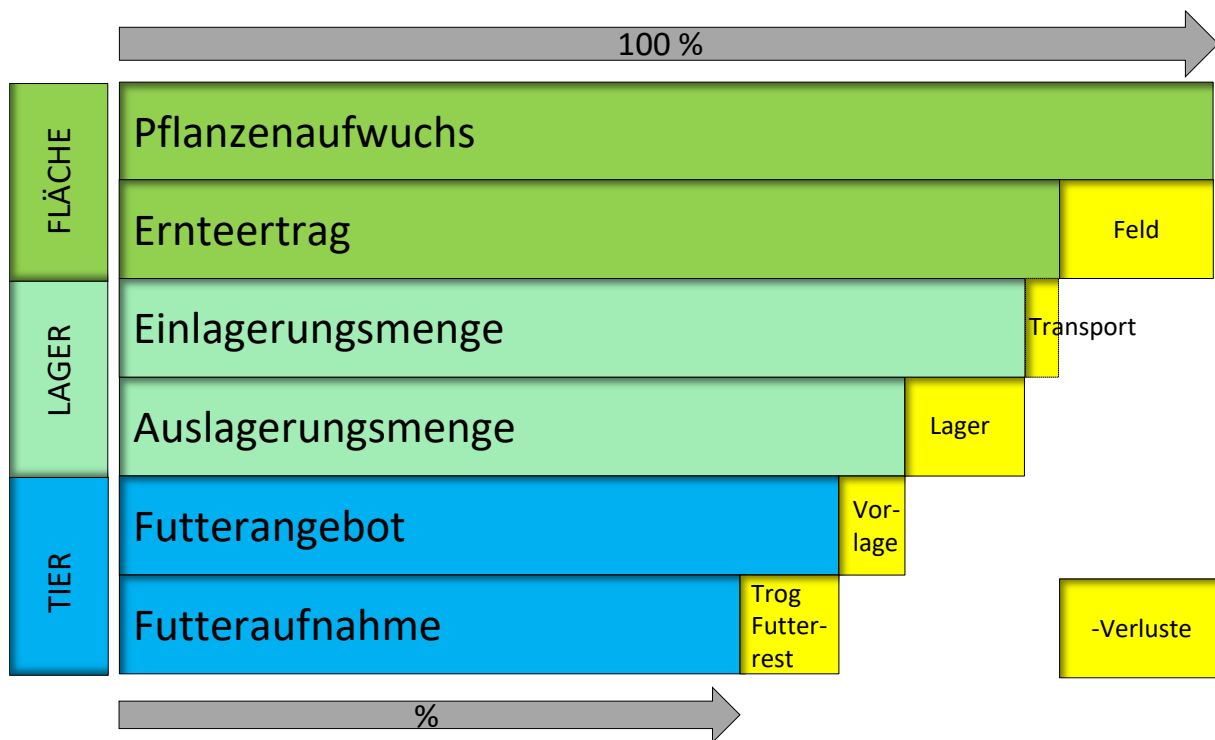


Abbildung 1.2: Begriffsdefinitionen der Masse- und Stoffströme im Futterbaubetrieb (Köhler et al., 2014a)

Die Kaskade der Futtermengen im Futterbaubetrieb ist in die Bezugsebenen Fläche – Lager – Tier unterteilt, um in die entsprechenden Größeneinheiten der Fachdisziplinen (z. B. dt TM/ha oder kg TM/Tier) wechseln zu können. Dazu wurden die Futtermengen auf der jeweiligen Ebene bzw. an den Messstellen abgegrenzt und klar definiert. Mit der Nomenklatur der innerbetrieblichen Futtermengen werden nicht nur die Ertrags- und Mengenebenen entlang des Produktionsprozesses dargestellt, es wird auch deutlich, an welchen Stellen Verluste auftreten und wie diese mit dem Produktionsprozess zusammenhängen. Grundsätzlich soll unter Praxisbedingungen eine kontinuierliche Mengenerfassung an definierten Messstellen erfolgen, die durch den Einsatz verschiedener Techniken unterstützt wird. Die Masseverluste der Silagen werden nach dem Total-in-Total-out-Prinzip (siehe Kapitel 3) ermittelt, das zudem durch ein Qualitätscontrolling im Silagemanagement begleitet werden muss.

Die Nomenklatur der Masse- und Nährstoffflüsse beginnt mit dem Pflanzenaufwuchs, der je nach Verfahren die zu 100 % erntbare Menge darstellt. Eine wichtige Größe ist der „Ernteertrag“, da auf dieser Basis die Nährstoffabfuhr von der Fläche berechnet wird und das gesamte Düngermanagement darauf ausgerichtet werden muss. Weitere Definitionen beschreiben die Mengen an den einzelnen Stationen, die die verschiedenen Lager- oder Konservierungsverfahren berücksichtigen, bis hin zu den

vom Tier aufgenommenen Futtermengen. Die Anwendung dieser Nomenklatur soll den inter- und transdisziplinären Austausch verbessern und die Vergleichbarkeit von Bewertungsansätzen erhöhen. Eine ausführliche Beschreibung der Nomenklatur, einschließlich des beschreibenden Glossars wurde im DLG-Merkblatt 416 veröffentlicht (DLG, 2016). Die Anwendung des Schemas wird für Forschung, Lehre und Praxis empfohlen.

Verlusterfassung

Eine fehlende Quantifizierung der Masse- und Nährstoffflüsse im Betrieb ist die Hauptursache dafür, dass Futterverluste in der Praxis nicht erkannt bzw. nicht konkret beziffert werden. Um die Effizienz eines gesamten Konservierungssystems zu beurteilen, sind die Verluste von der Ernte bis zur Verfütterung zu betrachten (McDonald et al., 1991). ROTZ & MUCK (1994) stellten anhand langjähriger Untersuchungen dar, wie hoch Futterverluste bei der Heu- und Silageerzeugung sein können und wie die Verlustspannen je nach Ernteverfahren bzw. -bedingungen aussehen. Die Autoren folgern, dass bei den gängigen Heu- und Silagesystemen in Nordamerika bis zur Verfütterung rund 30 % des ursprünglichen Futterwerts verloren gehen. Genauso nehmen SPIEKERS et al. (2009a) nach derzeitigem Kenntnisstand Verluste von 30 % bis 40 % des Grünmasseertrags von der Wiese bis zum Trog an. BORREANI ET AL. (2018) beziffern Silageverluste vom Feld bis zum Trog bei einem gutem Silagemanagement mit 12 % an TM und bei einem weniger gutem mit 42 % an TM. McGECHAN (1990) schlussfolgerte aus seinen Untersuchungen wiederum rund 20 % und mehr an TM-Verlusten bei Silagen. Jedoch wiesen auch McDONALD et al. (1991) auf mögliche methodische Fehler hin, die bei den gängigen Methoden zur Verlusterfassung anfallen können.

Tabelle 1.2: Energieverluste sowie deren Hauptfaktoren auf den jeweiligen Prozessebenen nach ZIMMER (1980)

Process	Classification	Approximate loss (%)	Causative factors
Residual respiration	Unavoidable	1 – 2	Plant enzymes
Fermentation	Unavoidable	2 – 4	Microorganisms
Effluent or	Mutually	5 – >7	DM content
Field losses by wilting	Unavoidable	2 – >5	Weather, technique, management, crop
Secondary fermentation	Avoidable	0 – >5	Crop suitability, environment in silo, DM content
Aerobic deterioration during storage	Avoidable	0 – >10	Filling time, density, silo, sealing, crop suitability
Aerobic deterioration after unloading	Avoidable	0 – >15	As above, DM content, silage, unloading technique, season
Total		7 – >40	

Insgesamt haben entlang des Silierprozesses viele Faktoren einen Einfluss auf TM-Verluste, und unter Praxisbedingungen liegen nur wenige Untersuchungen zu Siloverlusten vom Einsilieren bis zur Entnahme vor. Die von ZIMMER (1980) auf den jeweiligen Prozessebenen definierten Energieverluste verdeutlichen, auf welche Bedingungen und Managementfaktoren in der Praxis geachtet werden sollte (Tab. 1.2). Vermeidbare Verluste treten häufig dann auf, wenn Verfahrensabläufe nicht optimal aufeinander abgestimmt sind, zur Ernte unsichere Witterungsbedingungen vorliegen und das Siliermanagement nicht entsprechend angepasst wird. Wesentlich für den Erhalt des Futterwerts ist auch die aerobe Stabilität. Jedoch werden mit den gängigen Versuchsmethoden, d. h. im Labormaßstab, die tatsächlichen Bedingungen während der Entnahmephase nicht ausreichend abgebildet. Unter Praxisbedingungen sind mehrere Faktoren wie z. B. Verdichtung, Vorschub etc. zu beachten, um einen aeroben Verderb zu vermeiden (Wilkinson & Davies, 2013). Durch die Erfassung der Einlagerungs- und Auslagerungsmengen können die anfallenden TM-Verluste je Silo ermittelt und mögliche Fehler im Siliermanagement mit Hilfe eines Silocontrollings abgestellt werden. Entsprechende Handlungsempfehlungen für die gute fachliche

Praxis beim Silieren sowie Qualitätsrichtwerte für die Gewinnung optimaler Silagen sind dafür ausgearbeitet (DLG, 2011).

Stickstoff- und Phosphorflüsse sind aufgrund ihrer Umweltrelevanz bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Milchvieh-/Futterbausystemen besonders zu beachten (Reinsch et al., 2021). Klimarelevante Treibhausgase (CO_2 , N_2O und CH_4) werden nach definierten Systemgrenzen mittels Ökobilanzen berechnet, um eine Bewertung der Klimarelevanz vornehmen zu können. Im Futterbau bilden die innerbetrieblichen Stickstoffverluste in Form von N_2O , NH_3 und NO_3 die wesentliche Quelle für die Entstehung potentieller THG-Emissionen (Reinsch et al., 2018). Auf Systemebene werden die THG-Emissionen aus den Vorleistungen (Dünger, Pflanzenschutzmittel, Treibstoff) mit einbezogen. Über die verschiedenen Phasen der Silierung und durch die Vielzahl am Silierprozess beteiligter Mikroorganismen sind die N-Umwandlungsprozesse schwer zu erfassen (Hoedtke, 2010; Gerlach, 2020), gleichwohl sind die Verluste in der absoluten Bedeutung in der Regel bilanztechnisch marginal. Bei der Silierung kommt es zu eiweißabbauenden Prozessen, in deren Folge Rohproteinfraktionen (Verlust an Reinprotein, Anstieg der NPN-Verbindungen) abgebaut werden, die in erster Linie den Futterwert betreffen (Hoedtke et al., 2010). Hoedtke et al. (2010) verweisen darauf, dass zusätzlich Verluste von N-haltigen Fraktionen mit Sickersäften auftreten können bzw. am geöffneten Silo gasförmige Verluste in Form von NH_3 . Für Phosphor ergeben sich im Silierprozess Verlustpfade über einen möglichen Austritt von Gär- oder Sickersäften oder durch Verderb mit dem Anfall von Siloabraum. Um die unter Praxisbedingungen tatsächlich anfallenden Nährstoffverluste besser erfassen zu können, muss sich ein praxistaugliches Messsystem etablieren, mit dem ausreichend genau die Verlustpfade bei den Nährstoffen, insbesondere für Stickstoff und Phosphor, entlang der Futterkette abgebildet werden können.

Wegen mangelnder Praxistauglichkeit hat sich bisher kein Erfassungssystem etablieren können. Neue Erntetechniken mit automatisierter Mengenerfassung könnten hier Abhilfe schaffen (Demmel et al., 2010). Die Erfassung der Masse- und Nährstoffflüsse würde es ermöglichen, Verlusten zu beziffern und die Ursachen betriebsspezifisch zu ermitteln. Mit diesen Informationen könnten im Produktionsprozess Schwachstellen lokalisiert und Optimierungsmaßnahmen eingeleitet werden.

1.4 Zielstellungen

Um eine höhere Ressourcennutzungseffizienz in Milchvieh-/Futterbausystemen zu erreichen, müssen die Stoffflüsse in der Praxis besser abgebildet werden. Voraussetzung dafür ist eine möglichst vollständige (vom Feld bis zum Trog) und praktikable (automatisierte) quantitative Erfassung der relevanten Masse- und Nährstoffflüsse. Einzelbetriebliche Optimierungspotenziale im Futtermanagement sollen damit identifiziert werden können. Die Prozesse der Grobfutterbereitstellung sind jedoch auf Praxisebene noch unzureichend analysiert (Spiekers, 2008; Köhler et al., 2014; Gerlach, 2020). Vor dieser Herausforderung steht insbesondere die Futterproduktion, da in der Praxis noch kein gängiges Erfassungssystem für Massen und Qualitäten etabliert ist. Gleichzeitig zeigen differenzierte Aussagen zu Verlusten entlang des Produktionsprozesses, dass in der Praxis Optimierungsansätze bestehen. Zu den Themen der Erfassung von Masse- und Nährstoffflüssen in Futterbaubetrieben stellen sich folgende Forschungsfragen, die in der vorliegenden Dissertation bearbeitet werden:

- Kann durch ein systematisches Quantifizieren der Grobfuttermassen ein Kontrollsystem im Futtermanagement vom Feld bis zum Trog aufgebaut werden, mit dem neben der Futternutzungseffizienz (FUE) auch Ansätze zur Erhöhung der NUE in Milchvieh-/Futterbausystemen verfolgt werden können?
- Lässt sich auf Basis einzelbetrieblicher Ertragsdaten des Grünlands eine schlagspezifische Nutzungsintensität in der Praxis ausrichten, die zu einer optimierten und umweltverträglichen Nutzung des Ertrags- und Rohproteinpotenzials führt?
- Wie hoch sind die Masse- und Qualitätsverluste von Gras- und Maissilagen entlang der gesamten Futterproduktionskette vom Feld bis zum Trog?

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage werden die Masse- und Nährstoffströme in fünf Futterbaubetrieben in Bayern mittels einer Prozessanalyse des Grobfutters vom Feld bis zum Trog untersucht. Dazu wurden die Futterströme an definierten Messstellen über eine Gesamtmassenerhebung in den Betrieben gemessen. Das aufgebaute Erfassungssystem soll letztendlich eine geeignete Methode für die Praxis darstellen, die Futterwirtschaft zu überwachen und diese besser zu steuern. Gleichzeitig sollen die Ergebnisse aus der praxisnahen Abbildung

von Stoffkreisläufen neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Stoffströmen liefern, die in Bilanzierungs- und Systembewertungsmodelle einfließen können.

Zur Beantwortung der zweiten Frage wurde eine umfassende Ertrags- und Qualitätsanalyse vom Grünland auf repräsentativen bayerischen Grünlandstandorten durchgeführt, um im Wesentlichen Schlussfolgerungen für eine optimierte Düngung, für Schnittintensitäten und Nachsaaten abzuleiten. Dazu wurden die Ernteerträge und die Futterqualitäten bis zu den Nährstoffflüssen vom Grünland auf Betriebs- bzw. Schlagebene erfasst. Ferner wurde mit Hilfe des Ertragssimulationsmodells „FOPROQ“ eine Beurteilung der Grünlandproduktivität unter bayerischen Standortbedingungen vorgenommen. Die Praxisdaten wurden zur Validierung der Modellparameter im FOPROQ genutzt, um den Anwendungsbereich auf Ertragssimulationen für süddeutsche Standortbedingungen zu erweitern.

Die resultierende Originalveröffentlichung „Leistungen vom Grünland im Futterbaubetrieb – Analyse auf Betriebsebene unter bayerischen Standortbedingungen“, publiziert in der Fachzeitschrift „Berichte über Landwirtschaft“ (DOI: <https://doi.org/10.12767/buel.v95i1.138>), wird im Kapitel 2 vorgestellt.

In einer weiteren Untersuchung wurde erforscht, ob Trockenmasseverluste von Gras-, Luzerne- und Maissilagen mit dem Masse- und Nährstofffassungssystem in der Praxis ermittelt werden können. Die Siloverluste wurden berechnet, indem pro Silo die Einlagerungsmengen den Auslagerungsmengen gegenübergestellt werden. Die Methode soll als Kontrollinstrument für ein effizientes Futtermanagement in der Praxis dienen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung, vorgenommen an 48 Silos, werden im Kapitel 3 diskutiert, sie wurden in dem Artikel „Dry matter losses of grass, lucerne and maize silages in bunker silos“ im Journal Agricultural and Food Science (DOI: <https://doi.org/10.23986/afsci.6715>) veröffentlicht.

Aufbauend auf den vorangegangenen Untersuchungen wurden in einer dritten Studie die Untersuchungen zu den Trockenmasseverlusten in Silagen fortgeführt und um bestimmte Daten- und Messkriterien erweitert und ergänzt. Ausgewertet wurden die Silagen von 69 Silos, von denen neben den Trockenmasseverlusten die Nährstoffveränderungen in den Futterqualitäten der Ein- und Auslagerungsmengen gegenübergestellt wurden. Hierfür wurde die Varianzanalyse (ANOVA) mittels eines gemischten Modells durch Mittelwertvergleich vorgenommen. Mit Hilfe der

Quantifizierung der Silagemengen und der Futterqualitäten konnte eine Beurteilung zu möglichen Masse- und Nährstoffverlusten vorgenommen werden.

Die Untersuchung, in Kapitel 4 dargestellt, wurde unter dem Artikel „Dry-matter losses and changes in nutrient concentrations in grass and maize silages stored in bunker silos“ im Journal Grass and Forage Science (DOI: <https://doi.org/10.1111/gfs.12430>) veröffentlicht.

Die vorliegende Arbeit ist als kumulative Dissertation konzipiert. Daher sind die Kapitel 2, 3 und 4 entsprechend den Format- und Stilvorgaben der jeweiligen Fachzeitschriften aufgebaut.

1.5 Literatur

- AARTS, H. F. H., BIEWINGA, G., & VAN KEULEN, H. (1992). Dairy farming systems based of efficient nutrient management. Netherlands J. of Agric. Sci. 40, 285–299.
- BACH, M. (2008). Nährstoffüberschüsse in der Landwirtschaft – Ergebnisse und methodische Aspekte. In: S. Fuchs, S. Fach, H. H. Hahn (Eds.): Stoffströme in Flussgebieten – Von der Bilanzierung zur Bewirtschaftung. Schriftenreihe SSW, Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, Bd. 128, 65–86.
- BLAG [BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE ZUR EVALUIERUNG DER DÜNGEVERORDNUNG] (2012). Evaluierung der Düngeverordnung – Ergebnisse und Optionen zur Weiterentwicklung. Braunschweig. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn051542.pdf.
- BLE [BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG] (2019A). Bericht zur Markt- und Versorgungslage mit Milch und Milcherzeugnissen. Hrsg.: BLE, Bonn. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/MilchUndMilcherzeugnisse/JaehrlicheErgebnisse/Deutschland/2019BerichtMilch.pdf?__blob=publicationFile&v=5, [Abruf: 27.06.2020].
- BLE (2019B). Bericht zur Markt- und Versorgungslage Futtermittel. Hrsg.: BLE, Bonn. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Futter/2019BerichtFuttermittel.pdf?__blob=publicationFile&v=3, [Abruf: 15.02.2022].
- BLE (2022). Bericht zur Markt- und Versorgungslage mit Milch und Milcherzeugnissen. Hrsg.: BLE, Bonn. https://www.bzl-datenzentrum.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/Milch/MarktundVersorgungslage/2022BerichtMilch.pdf, erstellt am 11.03.2022, [Abruf: 23.12.2022].
- BLE (2023). Futteraufkommen Wirtschaftsjahr 2021/22. https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Futter/Futter_node.html#doc9764130bodyText5, erstellt am 14.02.2023, [Abruf: 05.07.2023].
- BMEL [BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT] (2017). Düngeverordnung vom 26.05.2017. http://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/index.html, [Abruf: 25.07.2017].
- BMEL (2019). Milcherzeugung in den Regionen in Deutschland nach Kalenderjahren. <https://www.bzl-datenzentrum.de/agrarmarkt/milch-und-milcherzeugnisse/milcherzeugung-und-verwendung/vorjahre#c7120>, Statistisches Bundesamt, erstellt am 30.09.2019, [Abruf: 06.04.2023].
- BMEL (2023). Eiweißpflanzenstrategie des BMEL. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau/eiweisspflanzenstrategie.html>, [Abruf: 02.08.2023].

- BMJ [BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ] (2017). Verordnung über den Umgang mit Nährstoffen im Betrieb und betriebliche Stoffstrombilanzen (Stoffstrombilanzverordnung – StoffBilV), – Ausfertigungsdatum: 14.12.2017, geändert durch Art. 98 G. v. 10.08.2021. Bundesministerium für Justiz und des Bundesamts für Justiz. <https://www.gesetze-im-internet.de/stoffbilv/>, [Abruf: 09.10.2022].
- BORREANI, G., TABACCO, E., SCHMIDT, R. J., HOLMES, B. J., & MUCK, R. E. (2018). Silage review: factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101, 3952–3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
- DEMMELE, M., THURNER, S., & FRÖHNER, A. (2010). Mit neuer Technik Futter- und Substratwirtschaft effizient gestalten. In: Knappe Flächen optimal nutzen – Futter- und Substratwirtschaft optimieren. LfL-Jahrestagung, LfL-Schriftenreihe 09/2010, 35–43.
- DESTATIS [STATISTISCHES BUNDESAMT] (2020). Tabellen Landwirtschaftliche Betriebe, Fläche: Bundesländer, Jahre, Bodennutzungsarten, [Abruf: 24.01.2020].
- DESTATIS (2020A). Landwirtschaftliche Bodennutzung, Anbau auf dem Ackerland. Fachserie 3 Reihe 3.1.2 Vorbericht (2020), erschienen am 03.08.2020, [Abruf: 3.07.2023].
- DESTATIS (2021). Landwirtschaftliche Bodennutzung, Anbau auf dem Ackerland. Fachserie 3 Reihe 3.1.2 Vorbericht (2021), erschienen am 03.08.2021, [Abruf: 3.07.2023].
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2021). Bericht über die Auswirkungen der verbindlichen Stoffstrombilanzierung. Drucksache 20/411 vom 29.12.2021. Deutscher Bundestag, 20. Wahlperiode, 218 Seiten. <https://dserver.bundestag.de/btd/20/004/2000411.pdf>, [Abruf: 19.08.2023].
- DIEPOLDER, M. (2012). Standortgerechte Grünlandbewirtschaftung. Möglichkeiten und Grenzen der Intensivierung. In: Viehwirtschaftliche Fachtagung 2012, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, 1–8.
- DIEPOLDER, M., RASCHBACHER, S., HEINZ, S., & KUHN, G. (2013). Rohproteinträge und -gehalte bayerischer Grünlandflächen. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau. Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 136–140.
- DIEPOLDER, M., RASCHBACHER, S., HEINZ, S., & KUHN, G. (2013A). Erträge, Nährstoffgehalte und Pflanzenbestände bayerischer Grünlandflächen. In: Agrarforschung hat Zukunft – Wissenschaftstagung der LfL. LfL-Schriftenreihe 04/2013, Freising, 185–194.

- DLG [DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT] (2011). Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 416 Seiten.
- DLG (2016). Mengenmäßige Erfassung des wirtschaftseigenen Futters. DLG-Merkblatt 416. https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_416.pdf, [Abruf: 31.10.2022].
- DORFNER, G., GOERZEN, G., LÜPPING, W. & RICHARZ, W. (2010). Projekt DLG-Spitzenbetriebe. In: Trendreport Spitzenbetriebe 2010. Milchviehhaltung Erfolgsfaktoren für Spitzenbetriebe. DLG e.V., DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt a.M., 11–20.
- DORFNER, G., & HOFMANN, G. (2015). Milchreport Bayern 2014 – Ergebnisse der Betriebszweigabrechnung Milchproduktion 2013/2014. LfL-Information 08/2015. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/information/en/milchreport-bayern-2014_lfl-information.pdf, [Abruf: 20.05.2016].
- DORFNER, G., & HOFMANN, G. (2019). Milchreport Bayern 2018 – Ergebnisse der Betriebszweigabrechnung Milchproduktion 2017/2018. LfL-Information 11/2019. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/information/en/milchreport-bayern-2018_lfl-information.pdf, [Abruf: 27.06.2020].
- EUROSTAT [STATISTISCHE AMT DER EUROPÄISCHEN UNION] (2020). Milch und Milcherzeugnisse. <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=de&pcode=tag00037>, [Abruf: 24.01.2020].
- EUROSTAT (2023). Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Kategorien. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00025/default/table?lang=de>, aktualisiert: 16.06.2023, [Abruf: 03.07.2023].
- FREDE, H. G., & BACH, M. (2014). Probleme in Nährstoffbilanzen – eine Herausforderung für die Zukunft. In: 5. Agrarwissenschaftliches Symposium des Hans-Eisenmann-Zentrums, Tagungsband, Freising, 7–9.
- GERLACH, K. (2020). Forage conservation and ration formulation as trails to improve resource use efficiency in ruminant nutrition. Habilitationsschrift, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, VVB Lauferweiler Verlag Gießen.
- GODFRAY, H. C. J., BEDDINGTON, J. R., CRUTE, I. R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J. F., PRETTY, J., ROBINSON, S., THOMAS, S., & TOULMIN, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science, 327, 812–818. DOI: 10.1126/science.1185383
- GODFRAY H. C. J., & GARNETT, T. (2014). Food security and sustainable intensification. Phil. Trans. R. Soc. B369: 20120273. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.0273>

- GRETHE, H., MARTINEZ, J., OSTERBURG, B., TAUBE, F., & THOM, F. (2021). Klimaschutz im Agrar- und Ernährungssystem Deutschlands: Die drei zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität. Gutachten der Stiftung Klimaneutralität. https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00077531, [Abruf: 26.03.2023].
- GUTSER, R. (2006). Bilanzierung von Stickstoffflüssen im landwirtschaftlichen Betrieb zur Bewertung und Optimierung der Düngungsstrategien. *Acta agriculturae Slovenica* 87, 129–141.
- HÄUßERMANN, U., BACH, M., KLEMENT, L., & BREUER, L. (2019). Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, UBA-Texte 131/2019, 167 Seiten.
- HÄUßERMANN, U., KLEMENT, L., BREUER, L., ULLRICH, A., WECHSUNG, G., & BACH, M. (2020). Nitrogen soil surface budgets for districts in Germany 1995 to 2017. *Environ Sci Eur*, 32:109. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00382-x>
- HARTMANN, S., DIEPOLDER, M., & LICHTI, F. (2015). Grünland als Biogassubstrat. In: *Biogas Forum Bayern*. Nr. I – 12/2015 (2. Auflage), Hrsg. ALB Bayern e.V. https://www.biogas-forum-bayern.de/De/Fachinformationen/Substrate/nachhaltig-erneuerbar-energie_GrunlandalsBiogassubstrat.html, [Abruf: 28.12.2022].
- HEIßENHUBER, A. (2010). Die Konkurrenz um knappe Flächen – Gründe, Entwicklungen, Auswirkungen. In: *Knappe Flächen optimal nutzen – Futter und Substratwirtschaft optimieren*. LfL-Jahrestagung, LfL-Schriftenreihe 09/2010, Freising, 9–13. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_40227.pdf.
- HEIßENHUBER, A., & SCHÄTZL, R. (2013). Heimische Eiweißfuttermittel – Chancen und Grenzen. In: *Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken*. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 27–39, www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2013_heissenhuber_schatzl.pdf.
- HOEDTKE, S. (2010). Proteinabbau und Proteinbewertung in Silagen. *VDLUFA-Kongress Kiel*, *VDLUFA-Schriftenreihe*, 66, 127–144. <https://www.vdlufa.de/kongress2010/Kongressband2010.pdf>.
- HOEDTKE, S., GABEL, M., & ZEYNER, A. (2010). Der Proteinabbau im Futter während der Silierung und Veränderungen in der Zusammensetzung der Rohproteinfraktion. *Übers. Tierernährg.* 38:157–179.
- HÜLSBERGEN, K.-J. (2014). Modellgestützte Analyse und Optimierung betrieblicher Stoffkreisläufe. In: *5. Agrarwissenschaftliches Symposium des Hans-Eisenmann-Zentrums*, Tagungsband, Freising, 15–18.

- KNAUS, W., & VELIK, M. (2005). Eiweißversorgung der Milchkuh – Grundlagen und Konsequenzen für die praktische Fütterung. In: Österreichische Fachtagung für biologische Landwirtschaft, Strategien zur Proteinversorgung in der biologischen Nutztierfütterung, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, Tagungsband, 41–45. <https://orgprints.org/id/eprint/8362/1/Tagungsband.pdf>.
- KÖHLER, B., DIEPOLDER, M., THURNER, S., & SPIEKERS, H. (2013A). Eiweißbereitstellung vom Grünland auf Betriebsebene. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau – Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 62–69, www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/aggf_2013_koehler_et_al.pdf.
- KÖHLER, B., DIEPOLDER, M., THURNER, S., & SPIEKERS, H. (2013B). Effiziente Futterwirtschaft auf Betriebsebene. In: Agrarforschung hat Zukunft – LfL-Wissenschaftstagung, LfL-Schriftenreihe 04/2013, Freising, 203–212.
- KÖHLER, B., SÜDEKUM, K.-H., SPIEKERS, H., & TAUBE, F. (2014A). Quantitative Erfassung von Masse- und Stoffströmen im Futterbaubetrieb. Kongressband 2014 Hohenheim, VDLUFA-Schriftenreihe 70, 411–415.
- KÖHLER, B., THURNER, S., DIEPOLDER, M., & SPIEKERS, H. (2014). Effiziente Futterwirtschaft und Eiweißbereitstellung in Futterbaubetrieben. LfL-Schriftenreihe 05/2014, Freising, 141 Seiten. <http://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/082872/>.
- KOLBE, H., & KÖHLER, B. (2008). Formen der Nährstoffbilanzierung in Praxis und Beratung des Ökologischen Landbaus. Arbeitspapier, Abteilung Pflanzliche Erzeugung, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Leipzig. <https://orgprints.org/14925/>.
- MACHMÜLLER, A., & SUNDRUM, A. (2015). Betriebliche Stickstoffüberschüsse erst durch systemische Analyse zielführend absenkbar. Landbauforsch, Appl Agric Forestry Res, 3/4 2015 (65)171–192. DOI: [10.3220/LBF1449824686000](https://doi.org/10.3220/LBF1449824686000)
- MACHMÜLLER, A., & SUNDRUM, A. (2016). Stickstoffmengenflüsse und Bilanzierungen von milchviehhaltenden Betrieben im Kontext der Düngeverordnung. Berichte über Landwirtschaft, Band 94, Ausgabe 2. <https://doi.org/10.12767/buel.v94i2>, [Abruf: 29.10.2022].
- MCDONALD, P., HENDERSON, A. N., & HERON, S. J. E. (1991). The Biochemistry of Silage. Marlow, UK: Chalcombe Publications.
- MCGECHAN, M. B. (1990). A review of losses arising during conservation of grass forage. Part 2, storage losses. Journal of Agricultural Engineering Research, 45, 1–30. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(05\)80135-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(05)80135-0)

- MISSELBROOK, T., DEL PRADO, A., & CHADWICK, D. (2013). Opportunities for reducing environmental emissions from forage-based dairy farms. *Agricultural and Food Science*, 22, 93–107. <https://doi.org/10.23986/afsci.6702>
- MUCK, R. E., KUNG, L. JR. (2007). Silage production. In: *Forages: the Science of Grassland Agriculture*, Vol. II (Eds. R.F. Barnes, C. J. Nelson, K. J. Moore, and M. Collins). 6th ed. Blackwell Publishing, Ames, IA, USA, 617–633.
- MUES, S., LOGES, R., & TAUBE, F. (2021). Weidemilch vom Acker. In: *DLG-Mitteilungen* 11/2021, Frankfurt a.M., 40–43.
- OENEMA, J., KOSKAMP, G. J., & GALAMA, P. J. (2001). Guiding commercial pilot farms to bridge the gap between experimental and commercial dairy farms; the project “Cows & Opportunities”. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 49:2-3, 277–296. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(01\)80011-7](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(01)80011-7), [Abruf: 29.10.2022].
- OENEMA, J. (2013). Transitions in nutrient management on commercial pilot farms in the Netherlands. PhD Thesis Wageningen, 199 pp. <http://edepot.wur.nl/279713>.
- PAHLOW, G. (2007). Grundlagen und Grundsätze der Silierung [Basics and principles of ensiling]. *Übersichten zur Tierernährung*, 35, 1–11.
- PAHLOW, G., MUCK, R. E., DRIEHUIS, F., OUDE ELFERINK S. J. W. H., & SPOELSTRA, S. F. (2003). Microbiology of ensiling. In: *Silage Science and Technology*. Buxton, DR, Muck, R.E., Harrison, J.H., ed. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA, pp 31–93. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr42.c2>
- POWELL, J. M., & ROTZ, C. A. (2015). Measures of nitrogen use efficiency and nitrogen loss from dairy production systems. *J. Environ. Qual.* 44:336–344 (2015). <https://doi.org/10.2134/jeq2014.07.0299>
- PROKOP, L. (2018). Milch vom Acker und vom Grünland – Betriebszweigauswertungen der Rinderspezialberatung in S-H. In: *Leistungen von Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland*, 62. Jahrestagung der AGGF, Kiel, Tagungsband, 37–45.
- RANDBY, A. T., WEISBJERG, M. R., NØRGAARD, P., & HERINSTAD, B. (2012). Early lactation feed intake and milk yield responses of dairy cows offered grass silages harvested at early maturity stages. *J. Dairy Sci.* 95:304–317. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4454>
- REINSCH, T., LOZA, C., MALISCH, C., VOGELER, I., KLUß, C., LOGES, R., & TAUBE, F. (2021). Toward specialized or integrated systems in northwest Europe: On-farm eco-efficiency of dairy farming in Germany. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:614348. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.614348>

- REINSCH, T., MALISCH, C., LORENZ, H., BÖLDT, M., PETERS, T., POYDA, A., & TAUBE, F. (2018). THG-Emissionen im Futterbau und in der Milchproduktion. In: Leistungen vom Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland, 62. Jahrestagung der AGGF, Kiel, Tagungsband, 27–36. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2018_reinsch_et_al.pdf.
- ROTZ, C. A., FORD, S. A., BUCKMASTER, D. R. (2003). Silages in farming systems. In D. R. Buxton, R. E. Muck & J. H. Harrison (Eds.), Silage science and technology (pp. 505–546). Madison, WI, USA: Agronomy Publication 42, American Society of Agronomy.
- ROTZ, C. A., & MUCK R. E. (1994). Changes in forage quality during harvest and storage. Pages 828-868 in Forage quality, evaluation, and utilization. Fahey, GC, Collins, M, Mertens, DR, Moser, LE, ed. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- ROTZ, C. A., OENEMA, J., & VAN KEULEN, H. (2006). Whole Farm management to reduce nutrient losses from dairy farms: A simulation study. Applied engineering in agriculture 22(5), 773–784. doi:10.13031/2013.21992
- SCHUBA J., & SÜDEKUM, K. (2012). Pansengeschützte Aminosäuren in der Milchkuhfütterung unter besonderer Berücksichtigung von Methionin und Lysin. Übers. Tierernährg. 40:113149.
- SMIT, H. J., METZGER, M.J., & EWERT, F. (2008). Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. Agr. Sys. 98, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.07.004>
- SPIEKERS, H. (2008). Rentable Milchproduktion bei steigenden Futterkosten. In: Milchproduktion in Bayern. Ein Betriebszweig steht vor Herausforderungen. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, Tagungsband, 30, 29–36.
- SPIEKERS, H. (2014). Mehr Milch aus dem Grobfutter. Milchpraxis 4/2014, 42–46.
- SPIEKERS, H., & BRANDL, J. (2018). Zielwerte für Grobfutter. In: „Futter und Fütterung sicher gestalten“, Tagungsband der 56. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung e.V., 58–65.
- SPIEKERS, H., DORFNER, G., & DIEPOLDER, M. (2009A). Effiziente und nachhaltige Grünlandnutzung mit Rindern im Alpenvorland. In: Grußworte & Plenartagung. Kongressband Teil I, VDLUFA-Schriftenreihe 65, 117–129.

- SPIEKERS, H., ETTLE, T., MOOSMEYER, M., & STEINBERGER, S. (2011). Effiziente Nutzung von Weide und Grünfutterkonservaten mit Milchkühen. In: Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 12, 55. Jahrestagung der AGGF in Oldenburg 2011, 53–62.
- SPIEKERS, H. & KOEHLER, B. (2010). Mehr Netto vom Brutto – Effizienz in der Futterwirtschaft verbessern! In: Milchviehhaltung – Erfolgsfaktoren für Spitzenbetriebe, Trendreport Spitzenbetriebe 2010, DLG e.V. Frankfurt a.M., 91–98.
- SPIEKERS, H., NUSSBAUM, H. J., & POTTHAST, V. (2009). Erfolgreiche Milchviehfütterung. 5. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 576 Seiten.
- STOCKINGER, B., & SCHÄTZL, R. (2012). Strategien zur Erhöhung des Anteils heimischer Eiweißfuttermittel in der Nutztierfütterung. VDLUFA Kongressband 2012 Passau, VDLUFA-Schriftenreihe Band 68/2012, VDLUFA-Verlag Darmstadt, 665–672.
- STMELF [BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN] (2018). Bayerischer Agrarbericht 2018. Hrsg.: StMELF, München. https://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/agrarpolitik/dateien/agrarbericht_2018.pdf, [Abruf:28.12.2022].
- TAUBE, F. (2014A). Nährstoffversorgung von Pflanzen und Tieren im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie. In: Nährstoffbedarf und Nährstoffversorgung von Pflanze und Tier, VDLUFA-Schriftenreihe Band 70/2014, 15–31.
- TAUBE, F. (2014B). Nährstoffflüsse im Milchvieh-Futterbaubetrieb – Optimierungspotenziale im Hinblick auf eine novellierte Düngeverordnung. In: 5. Agrarwissenschaftliches Symposium des Hans-Eisenmann-Zentrums, Tagungsband, Freising, 11–13.
- TAUBE, F., BALMANN, A., BAUHUS, J., BIRNER, R., BOKELMANN, W., CHRISTEN, O., GAULY, M., GRETHE, H., HOLM-MÜLLER, K., HORST, W., KNIERIM, U., LATACZ-LOHMANN, U., NIEBERG, H., QAIM, M., SPILLER, A., TÄUBER, S., WEINGARTEN, P., & WIESLER, F. (2013). Novellierung der Düngeverordnung: Nährstoffüberschüsse wirksam begrenzen. Wissenschaftliche Beiräte für Agrarpolitik (WBA) und für Düngungsfragen (WBD), Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 219, 12 Seiten, 06.11.2013. <http://dx.doi.org/10.12767/buel.v0i219.28.g77>
- TAUBE, F., GIERUS, M., HERRMANN, A., LOGES, R., & SCHÖNBACH, P. (2014). Grassland and globalization – challenges for northwest European grass and forage research. Grass and Forage Science, 69, 2–16. <https://doi.org/10.1111/gfs.12043>

- TAUBE, F., & KELM, M. (2006). Vergleichende Analyse der pflanzlichen Produktion auf ökologischen und konventionellen Praxisbetrieben in Schleswig-Holstein. COMPASS-Endbericht – Teilprojekt A. Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. 1–55. <https://www.grassland-organicfarming.uni-kiel.de/de/pdf/COMPASS%20Endbericht.pdf>.
- TAUBE, F., & SCHÜTTE, J. (2013). Sind die Milchviehbetriebe in Schleswig-Holstein auf die Novellierung der Düngeverordnung vorbereitet? Schriftenreihe der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, 120: 95–108.
- TAUBE, F., & WACHENDORF, M. (2000). The Karkendamm Project: A system approach to optimize nitrogen use efficiency on the dairy farm. Grassland Science in Europe 5, 449–451.
- UBA [UMWELTBUNDESAMT] (2016). Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von Nitrateinträgen in die Gewässer auf Basis regionalisierter Stickstoffüberschüsse. Teil I: Beitrag zur Entwicklung einer ressortübergreifenden Stickstoffstrategie. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, Texte 55/2016, 51 Seiten.
- UBA (2020). Novellierung der Stoffstrombilanzverordnung: Stickstoff- und Phosphorüberschüsse nachhaltig begrenzen. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, Texte 200/2020, 15 Seiten.
- UBA (2022). Stickstoffüberschuss der Landwirtschaft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-stickstoffueberschuss-der-landwirtschaft#die-wichtigsten-fakten>, [Abruf: 09.10.2022].
- UBA (2022B). Treibhausgas-Emissionen in Deutschland nach Kategorien. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#treibhausgas-emissionen-nach-kategorien>, [Abruf: 15.03.2022].
- VDLUFA [VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN] (2012). Vorschlag zur Novellierung der Düngeverordnung. VDLUFA Arbeitskreis Nachhaltige Nährstoffhaushalte, 8 Seiten.
- WEINBERG, Z. G., & ASHBELL, G. (2003). Engineering aspects of ensiling. Biochem. Eng. J.13, 181–188.
- WILKINSON, J. M. (2011). Re-defining efficiency of feed use by livestock. Animal, 5, 1014–1022. <https://doi.org/10.1017/S175173111100005X>
- WILKINSON, J. M., & DAVIES, D. R. (2013). The aerobic stability of silage: key findings and recent developments. Grass and Forage Science, 68, 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00891.x>

- WILKINSON, J. M., & RINNE, M. (2018). Highlights of progress in silage conservation and future perspectives. *Grass and Forage Science*, 73:40–52.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12327>
- WILKINSON, J. M., & TOIVONEN, M. I. (2003). *World silage: a survey of forage conservation around the world*. Lincoln, UK: Chalcombe Publications.
- ZIMMER, E. (1980). Efficient silage systems. *Proceedings of the British Grassland Society Occasional Symposium No 11*, Brighton, UK, 186–197.

Kapitel 2

Leistungen vom Grünland im Futterbaubetrieb – Analyse auf Betriebsebene unter bayerischen Standortbedingungen

Performances from grassland on dairy farms
– farm scale analysis under Bavarian site
conditions

Brigitte Köhler¹, Hubert Spiekers², Christof Kluß³ und Friedhelm Taube³

¹Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH), Beratungsteam Ökologischer Landbau,
Kölnische Str. 48-50, 34117 Kassel

²Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Tierernährung und
Futterwirtschaft, Prof.-Dürrwächter-Platz 3, 85586 Poing-Grub

³Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), Institut für Pflanzenbau und
Pflanzenzüchtung, Abteilung Grünland und Futterbau/Ökologischer Landbau,
Hermann-Rodewald-Str. 9, 24118 Kiel

Veröffentlicht in **Berichte über Landwirtschaft**, Band 95, Heft 1, Mai 2017;

<https://doi.org/10.12767/buel.v95i1.138>

2 Leistungen vom Grünland im Futterbaubetrieb – Analyse auf Betriebsebene unter bayerischen Standortbedingungen

2.1 Einleitung und Problemstellung

Das Grünland stellt als Produktionsfaktor mit seinen vielfältigen Ökosystemleistungen eine wichtige Basis für die Wertschöpfungskette in der Landwirtschaft (DAFA, 2015). Dabei nimmt das Grünland – gemessen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) – mit 35 % auf EU-Ebene, 28 % in Deutschland und rund einem Drittel in Bayern einen hohen Anteil an der Landnutzung ein (Smit et al., 2008; Destatis, 2015; StMELF, 2012). In den unterschiedlich ausgeprägten Milchvieh-/Futterbauregionen besteht eine sehr enge Beziehung zwischen der Grünlandproduktivität und der Milcherzeugung (Smit et al., 2008). Mit steigender Nachfrage nach Futter und zunehmender Flächenkonkurrenz ist eine optimale Grünlandnutzung ein wesentlicher Bestandteil einer effizienten Futterwirtschaft, deren Umsetzung für die Milchvieh-/Futterbaubetriebe wirtschaftlich immer stärker ins Gewicht fällt (Taube et al., 2014; Heißenhuber, 2010; Spiekers, 2008a; Spiekers & Köhler, 2010; Dorfner, 2014; Dorfner & Hofmann, 2014). Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Milchvieh-/Futterbausysteme, eine ressourcenschonende Produktionsweise umzusetzen, über die eine möglichst hohe Nährstoffnutzungseffizienz erreicht werden kann (Taube, 2010; Taube, 2014; Taube et al., 2014). Für Milchvieh-/Futterbaubetriebe ist das Grünland ein wertvoller Energie- und Eiweißlieferant, von dem eine möglichst hohe Flächeneffizienz, d. h. eine effiziente Erzeugung von Milch und Fleisch aus dem Aufwuchs je Hektar Grobfutterfläche erzielt werden soll (Spiekers, 2012). In Bayern nimmt das Grünland mit 1,05 Mio. ha Fläche (Destatis, 2015) einen Hauptteil in der Futtererzeugung ein. Die zunehmende Herausforderung besteht darin, die Produktion des wirtschaftseigenen Grobfutters effizienter zu gestalten und damit das Eiweißpotenzial besser zu nutzen, um den Einsatz von Zukauffutter zu minimieren (BMELV, 2012). In der bayerischen Nutztierhaltung wird der zusätzliche Bedarf an Eiweißkraftfutter über Nettoimporte von rund 360.000 t Rohprotein pro Jahr gesichert (Schätzl, 2013). Die Grünlandwirtschaft ist einer der zentralen Ansatzpunkte der bayerischen Eiweißstrategie, die Versorgung mit heimischen Eiweißfuttermitteln zu verbessern (LfL, 2016). Dabei wird dem bayerischen Grünland mit einem geschätztem

Rohproteinangebot von 1,3 Mio. t pro Jahr ein großes Potenzial zur Schließung der „Eiweißlücke“ zugesprochen (Schätzl, 2013; Heißenhuber & Schätzl, 2013).

Um einzelbetriebliche Optimierungspotenziale in der Futterwirtschaft zu identifizieren, müssen die Mengenströme auf Betriebsebene erfasst werden. Dies setzt ein konsequentes Messen von Menge und Qualität beim Grobfutter voraus, wobei in der Praxis die Erträge vom Grünland häufig nicht bekannt sind (Weiß et al., 2008; Diepolder et al., 2013). Das Problem fehlender Ertragsdaten in der Futterwirtschaft wirkt sich auf gesamte Systemanalysen aus. Für die Betriebszweigauswertung (DLG, 2000; Spiekers et al., 2009) bzw. zur Plausibilisierung der Nährstoffentzüge im Futterbau (DLG, 2014; BMEL, 2015; BMJ, 2014) werden die Erträge aus dem Futterbedarf der Tiere entsprechend den Leistungen abgeleitet. In der Betriebszweigauswertung Milch werden die so abgeschätzten Erträge als Nettoerträge bezeichnet. Dies steht im Widerspruch zur Verwendung des Begriffs im Pflanzenbau. Eine Anpassung und Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten wurde von KÖHLER et al. (2014) vorgeschlagen. Da in der Betriebszweigauswertung die Erträge des Grünlandfutters in der Regel nicht vorliegen, werden diese als Restgröße kalkuliert. Alle Fehler schlagen so auf das Grünland durch und jeglicher Luxuskonsum z. B. an Kraftfutter führt zu rechnerisch geringeren Erträgen auf dem Grünland. Abgesehen davon wird in der Berechnung der Grobfutterleistung das Grünland systematisch unterschätzt, weil der gesamte Energiebedarf für Erhaltung kalkulatorisch als Restgröße aus dem Grobfutter gedeckt wird, während die konkret vorliegenden Mengen an Konzentratfuttermittel mit dem Milcherzeugungswert in Ansatz gebracht werden (Spiekers et al., 2009).

Eine exakte Erfassung der tatsächlich geernteten Aufwuchsmengen und -qualitäten ist auch vor dem Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung (DüV) unumgänglich, da die bisher genutzten Ansätze der Ertragsschätzungen im Rahmen der Feld-Stall-Bilanzen eine geringe Aussagekraft aufweisen (WBA & WBD, 2013). Die vorgeschlagene Plausibilisierung der Entzüge im Futterbau über den abgeschätzten Verzehr an Grobfutter entsprechend des Tierbesatzes zeigt die Problematik (DLG, 2014; BMEL, 2015). Mit der Verwendung valider einzelbetrieblicher Daten wird eine höhere Aussagekraft von Nährstoffsalden erzielt, die für ein optimiertes Düngemanagement zu nutzen sind. Während unter kontrollierten experimentellen Bedingungen eine Vielzahl von Daten zu den potentiellen Bruttoerträgen

(Aufwuchsmenge) auf dem Grünland in Deutschland vorliegt, fehlt es an repräsentativen Daten zu den realisierbaren Grünlanderträgen unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen. Weitere Ansätze zur Quantifizierung werden über Ertrags- und Qualitätsmodelle verfolgt, mit deren Hilfe unter Einbeziehung klimatischer Daten eine Abbildung von Ertrags- und Qualitätsdaten ermöglicht wird, die Aussagen zur Ertragsstabilität zulassen (Kornher et al., 1991; Herrmann et al., 2005). Neben der Ertragsleistung (Flächennutzungseffizienz) sind weitere Kriterien in der Bewertung von Landnutzungssystemen zu berücksichtigen. Dazu gehören insbesondere die Nährstoffnutzungseffizienz (Stickstoff, Phosphor) sowie die Ökosystemdienstleistungen der Grünlandnutzung für die Bereiche: Wasserschutz, Klimaschutz und Biodiversität. Die Ausrichtung auf ein nachhaltiges Nährstoffmanagement in den Milchvieh-/Futterbausystemen ist ein wichtiges Forschungsfeld (on-farm research), das nur über eine ganzheitliche Betrachtung zur systematischen Verminderung von Nährstoffverlusten führen wird (Rotz et al., 2005; Rotz et al., 2006; Oenema, 2013).

Das Ziel dieser Abhandlung ist es daher, die Erträge, Futterqualitäten und Nährstoffflüsse auf repräsentativen bayerischen Grünlandstandorten auf Betriebs- und Schlagebene zu analysieren, um daraus Schlussfolgerungen für eine optimierte Bewirtschaftung in der Praxis abzuleiten. Mit Hilfe des Ertragsmodells „FOPROQ“ (Kornher et al., 1991) werden die Leistungen des bayerischen Grünlands durch Simulationsläufe auf einen Zeitraum von neun Jahren erweitert, um die Ertragsstabilität in Abhängigkeit von Witterung, Standort und Bewirtschaftungsintensität zu analysieren. Dieser Ansatz verfolgt somit ein Teilziel des Forschungsvorhabens „Effiziente Futterwirtschaft und Nährstoffflüsse in Futterbaubetrieben“ mit einem gesamtbetrieblichen Ansatz zur Erfassung der Stoffströme vom „Bruttoertrag“ (Futteraufwuchs) des Grünlands bis zur Grobfutterleistung der Milchkühe auf fünf Modellbetrieben in Bayern (Köhler et al., 2009).

2.2 Material und Methoden

2.2.1 Standort- und Betriebscharakteristik

An den Untersuchungen waren die Lehr-, Versuchs- und Fachzentren (LVFZ) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) mit den Standorten Spitalhof,

Achselschwang, Almesbach, Kringell und dem Versuchsbetrieb Grub beteiligt (Abb. 2.1). Um die bayerischen Standortbedingungen für die Grünlandnutzung zu charakterisieren, sind in Tab. 2.1 die Betriebe den Agrargebieten sowie den Boden-Klima-Räumen (BKR) (Roßberg et al., 2007) zugeordnet. Die Jahrestemperaturen variierten im langjährigen Mittel im Bereich von 7,8 °C bis 8,8 °C und die Temperatursummen ($> 5\text{ °C}$) von 1.798 bis 2.119 °C im vierjährigen Mittel. Die mittleren Jahresniederschläge im



Abbildung 2.1: Standorte der Betriebe in Bayern

Untersuchungszeitraum reichten von 750 mm (Almesbach, Oberpfalz) bis zur niederschlagsreichen Allgäuer Region am Spitalhof mit 1.180 mm. Die Produktionsschwerpunkte der Betriebe liegen in der Milchvieh- und Rinderhaltung mit Viehbeständen von 70 bis 190 Milchkühen plus weiblicher Nachzucht in konventioneller und am Betrieb Kringell in ökologischer Wirtschaftsweise.

Das Grünland nimmt je Betrieb einen unterschiedlichen Flächenanteil an der Grobfutterproduktion ein. Die energiekorrigierten Milchleistungen (ECM) liegen im Betriebsdurchschnitt bei 8.500 bis 9.700 kg ECM pro Kuh und Jahr. Auf allen Standorten wird das Grünland intensiv genutzt, jedoch mit einer N-Düngungsbandbreite von 156 bis 312 kg $N_{\text{ges.}}$ /ha und Jahr (Tab. 2.1). Bei der Berechnung des Düngungsniveaus beruhen die Nährstoffgehalte der Gülle auf eigenen Analysen (2010 – 2011), bei weiteren Wirtschaftsdüngern (z. B. Stallmist, Mistkomposte) wurde auf entsprechende Standardwerte (Wendland et al., 2012; Köhler & Kolbe, 2007) zurückgegriffen. Beim Wirtschaftsdünger wurden die anrechenbaren N-Abzüge gemäß der DüV berücksichtigt. Die Gülleausbringung erfolgte zumeist mit Breit- oder Schwanenhalsverteiler, am Versuchsbetrieb Grub sowie am LVFZ Kringell mit Schleppschlauchtechnik. Die symbiotische N-Fixierung wurde nach dem empirischen Modell von HØGH-JENSEN et al. (2004) bei der Berechnung des $N_{\text{ges.}}$ mit einbezogen.

Tabelle 2.1: Standort- und Bewirtschaftungscharakteristik der untersuchten Betriebe

Kenngrößen	Einheit	Spitalhof	Grub	Achsel-schwang	Almes-bach	Kringell
Standort						
Agrargebiet		Alpen-vorland	Tertiäres Hügelland	Voralpines Hügelland	Ostbayerisches Mittelgebirge I	
BKR ¹		117	115	117	112	112
Höhe	m über NN	730	525	586	417	480
Temp. ²	°C/Jahr	8,0	8,8	7,8	8,0	8,7
Temp. ³	Σ °C/Jahr	1.876	2.063	1.798	1.885	2.119
ND ⁴	mm	1.180	992	1.010	750	968
Futterwirtschaft						
GL-Fläche ⁵	ha/Betrieb	85	40	60	32	40
GL-Anteil ⁶	% GFF	100	45	64	37	46
Milch-leistung	kg ECM ⁷	9.400	9.500	9.700	9.500	8.500
SI ⁸	n	4–5	4–5	4–5	3–4	4–5
Grünlanddüngung⁹						
N _{ges.} ¹⁰	kg N/Jahr	204	312	266	278	156
N _{fix.} ¹¹	kg N/Jahr	22	33	24	12	40
N _{org.} ¹²	kg N/Jahr	134	112	197	137	116
N _{min.}	kg N/Jahr	48	167	45	129	0
P _{ges.}	kg P/Jahr	33	17	51	38	35
K _{ges.}	kg K/Jahr	162	160	202	164	154
Bodenkennwerte¹³						
Bodenart		uL	uL	sL	uL	uL
pH ±s	pH-Wert	6,5±0,2	6,4±0,3	6,2±0,2	6,3±0,4	5,6±0,3
P ±s	mg P/100g	7,6±1,5	11,3±0,8	16,9±4,3	6,9±3,1	5,6±2,6
K ±s	mg K/100g	19,1±3,3	11,6±3,0	36,8±12,9	7,0±2,5	11,4±5,5

¹= Boden-Klima-Räume: 117 = Moränen-Hügelland Donau-Süd, 112 = Verwitterungsböden in den Höhenlagen, 115 = Tertiär-Hügelland Donau Süd; ²= Temperatur im langjährigen Jahresmittel (1991 – 2013); ³= Summe Jahrestemperatur über 5 °C; ⁴= Jahresniederschläge im vierjährigen Mittel (2009 – 2012); ⁵= bewirtschaftete Grünlandfläche; ⁶= prozentualer Anteil an der Grobfutterfläche (GFF); ⁷= energiekorrigierte Milch pro Kuh und Jahr im Betriebsdurchschnitt (2009 – 2012) nach der Milchleistungsprüfung; ⁸= Schnittintensität; ⁹= NPK-Düngung im vierjährigen Mittel (2009 – 2012); ¹⁰= N_{gesamt}; ¹¹= symbiotische N-Fixierung nach HØGH-JENSEN et al. (2004); ¹²= N_{organisch} unter Abzug von 15 % Ausbringungsverlusten beim Stickstoff (nach DüV (BMJ, 2014), S. 23)); ¹³= Bodenart und mittlere Bodengehalte (B.= Boden) aus den aktuellen Bodenuntersuchungen (P, K nach CAL-Methode, pH-Wert CaCl₂) der Grünlandflächen je Betrieb im Zeitraum von 2010 – 2012 mit Standardabweichung (±s) zwischen den Grünlandschlägen.

2.2.2 Datenerhebungen

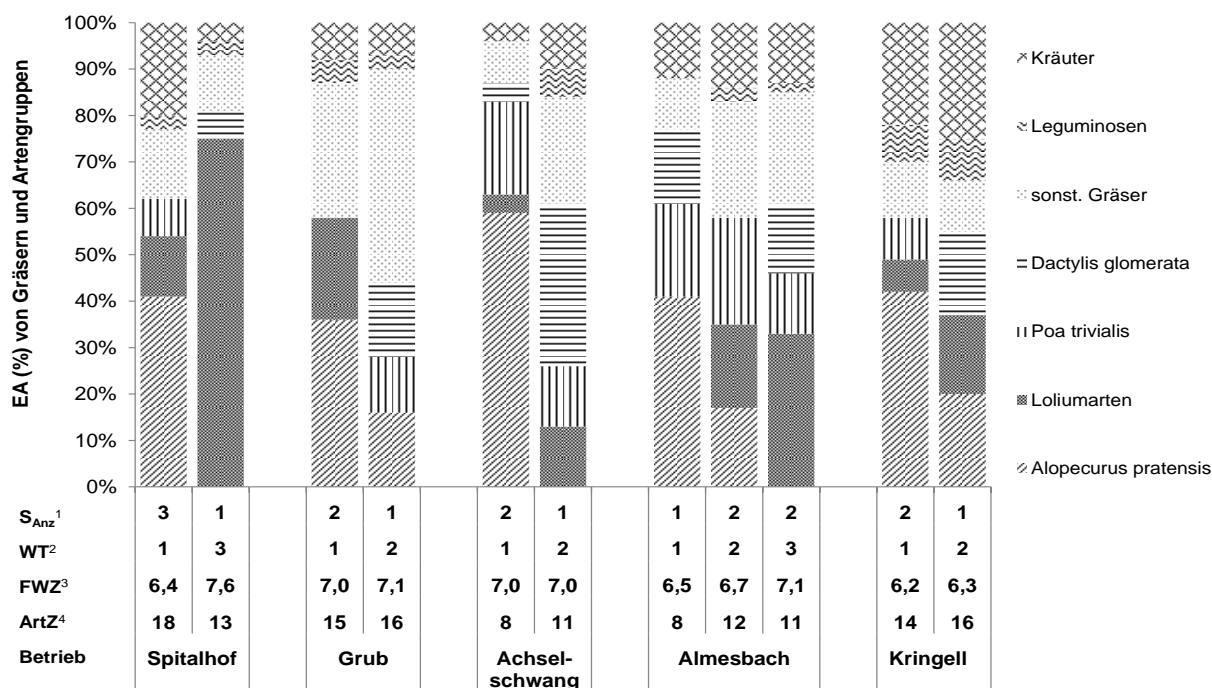
Pflanzenbestände

Das Wirtschaftsgrünland der Betriebe ist der Klasse Molinio-Arrhenatheretea und dem Verband Arrhenatheretalia zuzuordnen und dabei zum überwiegenden Teil der Assoziation Alopecuretum pratensis. Zur Charakterisierung des Wirtschaftsgrünlandes auf Ebene der Betriebsstandorte wurden auf ausgewählten Schlägen eine Bestandsaufnahme der Arten sowie eine Ertragsanteil(EA)-Schätzung nach KLAPP & STÄHLIN (1936) durchgeführt, jeweils vor dem ersten Schnitt im Abstand von zwei Jahren. Die Bestandsaufnahmen wurden nach Wiesentypen (WT) in Anlehnung an WENDLAND et al. (2012) eingeteilt und zusammengefasst (Tab. 2.2). Auf Basis der EA-Schätzungen wurden weitere Parameter wie Artenanzahl (ArtZ) und Futterwertzahl (FWZ) nach KLAPP et al. (1953) je Schlag berechnet (Abb. 2.2).

Tabelle 2.2: Einteilung der Wiesentypen nach Gräser-Ertragsanteilen (EA)

WT	Wiesentyp	Gräser-EA	Weitere Differenzierung
1	Wiesen-Fuchsschwanzwiesen	>60%	Alopecurus pratensis >25%
2	Gräser reiche Wiesen	>65%	Loliumarten <25%, Alopecurus pratensis <25%
3	Weidelgras reiche Wiesen	>75%	Loliumarten >25%, andere Gräser <20%

Quelle: In Anlehnung an WENDLAND et al. (2012) und an frühere Auflagen (1985, 1997)



¹= Anzahl der bonitierten Schläge; ²= Wiesentyp; ³= mittlere Futterwertzahl nach KLAPP et al. (1953); ⁴= mittlere Artenanzahl.

Abbildung 2.2: Ertragsanteile der Hauptbestandsbildner (HBB) der Gräser sowie der Artengruppen aus Bestandsaufnahmen von ausgewählten Schlägen je Betriebsstandort getrennt nach WT mit Angabe der FWZ und ArtZ

Erträge und Qualitäten

Die Gesamtanalyse der Grünlanderträge erfolgte über eine quantitative und qualitative Datenerhebung auf einzelbetrieblichem Niveau über einen vierjährigen Untersuchungszeitraum von 2009 bis 2012 (siehe 2.2.1). Die Ernteerträge vom Grünland wurden über Wiegen aller einzelnen Fuhren an der Fuhrwerkswaage zur Ernte erfasst und schlagbezogen festgehalten (Tab. 2.3). Die Grünlandflächen reichten von drei bis 16 Schlägen je nach Betriebsstandort bei Schlaggrößen von 0,9 bis 13,9 ha. Bei dem Erntegut handelt es sich im Mittel aller Betriebe zu 87 % der geernteten Trockenmasse (TM) um zu silierendes Anwelkmateriale sowie beim Rest um Heu und Grascobs. Während der Ernte erfolgte eine Probenahme je Fuhre zur TM- und Qualitätsbestimmung. Je nach Schlaggröße wurden aus dem Probenpool mehrere Mischproben zur TM-Bestimmung sowie je nach Lagereinheit mehrere Mischproben zur Analyse von Futterqualitätsparametern und Mineralstoffen genommen (Tab. 2.3).

Tabelle 2.3: Datenerhebung und Analytik zur Gesamtanalyse des Grünlands an den untersuchten Betrieben

Datenerhebung	Methode	Anzahl	Analytik	Einheit
Erntemenge (Siliergut, Heu etc.)	Wiegung a. d. Fuhrwerks- waage	Grund- gesamtheit	Wiegung	dt FM ¹ je Fuhre
TM-Bestimmung	-PE ² je Fuhre -Mischprobe ³	4x je Schlag ⁴	Ofen- trocknung ⁵	g TM/kg FM
Futterqualitäten	-PE je Fuhre -Mischprobe ³	3x je Lager ⁶		
-Rohnährstoffe			Weender-Analyse	
-Rohprotein (u.a.)			NIRS ⁷	g XP/kg TM
-nXP, RNB			Schätz- gleichung ⁸	g nXP, RNB/kg TM
-Energie			Schätz- gleichung ⁹	MJ NEL/kg TM
-Mineralstoffe			RFA ¹⁰	g P, K, Mg, S/kg TM

¹= Frischmasse (i.d.R. Anwelkgut); ²= Probenahme; ³= aus der PE je Fuhre; ⁴= Mindestanzahl je Schlag und Hektar mit Erhöhung der Probenanzahl je nach Schlaggröße; ⁵= nach VDLUFA-Verfahren (1976) mit 36 h bei 65 °C und 4 h bei 105 °C; ⁶= i.d.R. je Silo oder anderer Lagereinheit; ⁷= Nahinfrarotspektroskopie; ⁸= Proteinbewertung nach GfE (2001); ⁹= Energiebewertung nach GfE (1995), ab 2011 GfE (2008); ¹⁰= Röntgenfluoreszenzanalyse.

Die Summe der Erntemengen je Schnitt auf Basis der TM ergibt den Ernteertrag je Hektar und Jahr. Die mittleren Rohprotein-, Energie- und Mineralstoffgehalte je Betrieb wurden nach TM-Ertrag gewichteten mittleren Gehalten je Schnitt berechnet. Die Nährstofferträge bzw. -abfuhr wurden aus den TM-Ertrag und den mittleren Nährstoffgehalt je Schnitt auf das Jahr summiert. In den Ertragsanalysen wird entsprechend nach Bewirtschaftungs- und Standortfaktoren differenziert. Von ausgewählten Schlägen mit Pflanzenbestandsaufnahmen wurden ertragsrelevante Einflussfaktoren über eine weitere Ertragsanalyse untersucht.

Statistische Analyse

Die gesamtbetrieblichen Ernteerträge vom Grünland wurden auf Schlagebene je Standort und Jahr über den vierjährigen Untersuchungszeitraum analysiert. Die Besonderheit der Ertragsanalyse liegt auf der schlagbezogenen Ertragserhebung, die erstmals in einem solchen Umfang in der Praxis durchgeführt wurde. Mit Hilfe eines SAS-Makroprogramms (Friendly, 2005) wurde die Ertragsvarianz der Schläge je Standort und Jahr als „boxplots“ unter Einbeziehung des „Interquartilabstands“ (IQR) ausgewertet. Anhand des Variationskoeffizienten (CV) wurde die Ertragsstabilität über die Jahre beurteilt. Eine weitere Ertragsauswertung wurde mittels der Kovarianzanalyse vorgenommen unter Anwendung eines gemischten Modells, da der unbalancierte Datensatz der Ernteerträge sowie die zu untersuchenden Merkmale dies erforderten. Dies wurde mit Hilfe der SAS-Prozedur „Proc mixed“ (SAS® Software 9.3) durchgeführt.

Modellsimulation

Für die Modellanalyse wurde das Simulationsmodell FOPROQ (Kornher et al., 1991) eingesetzt, dessen Modellparametrisierung anhand der Ertragsdaten der Fünf-Schnitt-Wiesen an vier Betriebsstandorten aus den Jahren 2009 bis 2011 erfolgte. Das FOPROQ-Modell berechnet mittels genotypischer Parameter die tägliche Ertrags- und Qualitätsentwicklung. Dazu werden standortspezifische Variablen wie Lufttemperatur, Niederschlag, potentielle Verdunstung sowie die Globalstrahlung zur Berechnung einer spezifischen Umweltveränderungsrate einbezogen. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen können im Modell definiert werden. In dem verwendeten FOPROQ-Modell wird von einer optimalen Nährstoffversorgung ausgegangen. Die eingesetzten Wetterdaten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD). Die Modellsimulation dient einerseits zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Modellalgorithmen für bayerische Grünlandstandorte und andererseits zur Beurteilung der Ertragsstabilität und Produktivität des bayerischen Grünlands durch Simulationen mit neunjährigen Witterungsdaten.

Nährstoffbilanzierung

Aus den Nährstoffabfuhr- bzw. -zufuhrdaten über die aggregierten Grünlandflächen wurden für die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) Bilanzen für das Grünland über den vierjährigen Untersuchungszeitraum aufgestellt. Aus den jährlichen

Nährstoffabfuhren mit der Ernte und den jährlichen Nährstoffzufuhren über die Düngung sowie der N-Fixierung wurde eine einfache Saldierung im vierjährigen Mittel vorgenommen mit Berechnung des Variationskoeffizienten (CV) zwischen den Jahren (Tab. 2.8). Beim N entspricht dies einer Bruttosaldierung. Die Stickstoffverwertung der Grünlandflächen je Betrieb aus der N-Düngung – in Form der „nitrogen use efficiency“ (NUE) ($\text{kg TM} / \text{kg eingesetzten Dünger-N}$) – wurde anhand des Verhältnisses vom mittleren Ernteertrag zur mittleren N-Zufuhr über die Düngung ($N_{\text{ges. ohne } N_{\text{fix.}}}$) im vierjährigen Mittel berechnet (Tab. 2.4). Dabei umfasst $N_{\text{ges.}}$ den mineralischen und organischen Dünger-N zu gleichen Wirkungsgraden (100 % Mineraldüngeräquivalent (MDÄ)).

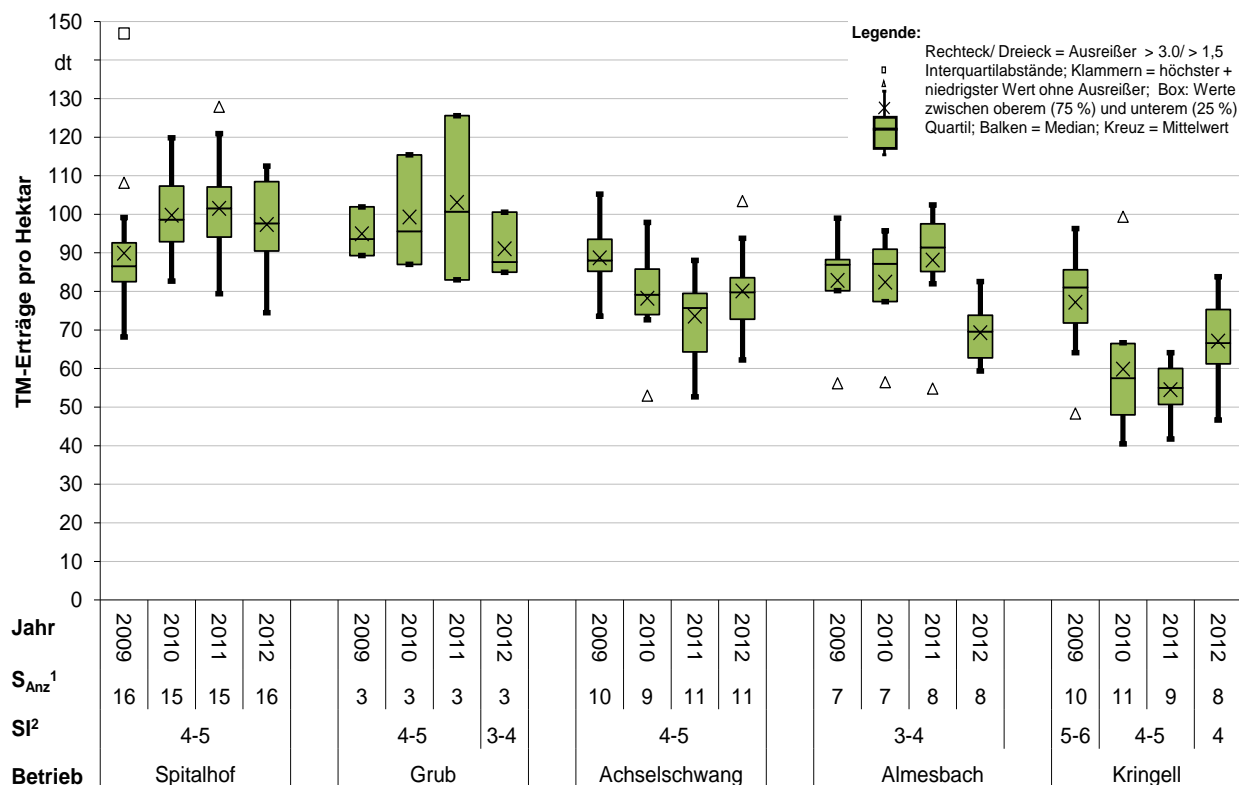
2.3 Ergebnisse

2.3.1 Ertragsanalyse

Ernteerträge auf Schlagebene

Die Ernteerträge der intensiv geführten Grünlandflächen aus den vierjährigen Untersuchungen zeigen eine erhebliche Variabilität in Abhängigkeit von Standort, Bewirtschaftung und Jahr (Abb. 2.3). Auf den Betrieben Spitalhof, Grub und Achselschwang wurden bei vier bis fünf Schnitten und in Almesbach bei drei bis vier Schnitten 80 – 97 dt TM/ha im vierjährigen Mittel geerntet (Tab. 2.4). Der Ökobetrieb Kringell erwirtschaftete bei gleich hoher Schnittintensität und geringerem Düngungsniveau einen Ernteertrag von 65 dt TM/ha im vierjährigen Mittel. Bei den Ertragsvarianzen zwischen den Betrieben sind die Unterschiede im mittleren N-Düngungsniveau als ertragsbeeinflussender Faktor zu beachten (Tab. 2.1; Tab. 2.5). Über das Ertragsmittel je Betrieb zeigen die Variationskoeffizienten der Ernteerträge mit 5 – 8 % eine hohe Ertragsstabilität zwischen den Jahren auf. Die Jahresniederschläge sind an allen Standorten als günstig einzustufen (Tab. 2.1). Jedoch wirkten sich wiederkehrende längere Sommertrockenheitsperioden am Standort Almesbach nicht nur ertragsmindernd aus, sondern führten auch zu einer verringerten Ertragsstabilität (CV 10 %). Diese stärkeren Schwankungen zwischen den Jahren weist auch der Ökobetrieb Kringell mit einem CV von 15 % auf. Diese Schwankungen wurden zusätzlich durch die unterschiedlich hohe Nutzungsintensität im Laufe der Untersuchungsjahre beeinflusst. Ebenso zeigt die Ertragsanalyse auf Schlagebene erhebliche Ertragsspannen zwischen den Schlägen an allen Standorten

(Abb. 2.3). Dahinter stehen als Beispiele im Jahr 2011 Ertragsspannen von 83 bis 126 dt TM/ha bzw. von 53 bis 88 dt TM/ha zwischen Schlägen an den Standorten Grub bzw. Achselschwang.



¹= Anzahl der Schläge; ²= Schnittintensität.

Abbildung 2.3: Ernteerträge vom Grünland auf Schlagebene der untersuchten Betriebe aus den Jahren 2009 – 2012

Tabelle 2.4: Ernteerträge im vierjährigen Mittel von den Grünlandflächen je Betrieb mit Angabe von Niederschlags- und Bewirtschaftungsdaten sowie der Stickstoffverwertung (NUE)

Betrieb	ND ¹		SI ²	S _{Anz} ³	Ernteertrag dt TM/ha			NUE ⁴
	mm	cv% ⁵	n	n	mean	±s	cv%	kg TM/kg N-Düngung
Spitalhof	894	10	4-5	15	95	6	7	53
Spitalhof (I) ⁶	894	10	5	1	122	19	15	53
Grub	811	4	4-5	3	97	5	5	33
Achselschwang	818	6	4-5	10	80	6	8	33
Almesbach	509	19	3-4	8	81	8	10	30
Kringell	724	27	4-5	10	65	10	15	56

¹= Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (1.03. – 31.10.) im vierjährigen Mittel (2009 – 2012); ²= Schnittintensität; ³= Anzahl der Schläge; ⁴= Verhältnis mittlerer Ernteertrag (kg TM/ha) zu mittleren N-Düngung (kg N_{ges}/ha) mit 100 % MDÄ (siehe Kap. 2.2.2) im vierjährigen Mittel; ⁵= Variationskoeffizient (%) zwischen den Jahren; ⁶= einzelner Schlag mit 70 % mittlerem EA an Deutschem Weidelgras, herausgestellt zu den weiteren Grünlandschlägen am Spitalhof mit 40 % mittlerem EA an Wiesen-Fuchsschwanz.

Die Pflanzenbestandsaufnahmen vom Grünland an den einzelnen Standorten und Schlägen zeigen eine hohe Varianz, sodass keine versuchsstandortspezifische Gruppierung nach den Wiesentypen möglich war (Abb. 2.2). Unabhängig davon kamen im Mittel 8 – 18 Pflanzenarten im Grünland über alle Standorte vor. Damit sind alle Flächen botanisch als artenarm zu charakterisieren. An allen Betriebsstandorten trat überwiegend der WT 1 „Wiesen-Fuchsschwanzwiesen“ auf. Eine zunehmende Etablierung des Wiesen-Fuchsschwanzes (*Alopecurus pratensis*) wurde bayernweit im bayerischen Grünlandmonitoring festgestellt (Kuhn et al., 2011). Das hohe Ertragspotenzial des Deutschen Weidelgrases (DW) (*Lolium perenne*) war deutlich auf einer Grünlandfläche des Spitalhofs (I) zu erkennen, auf dem mit 70 % EA an DW ein deutlich höherer Ernteertrag von 122 dt TM/ha im vierjährigen Mittel erwirtschaftet wurde (Tab. 2.4). Bei der Bewertung der Ertragsleistung von intensiv geführten Pflanzenbeständen sollte die zunehmende Verbreitung des Gewöhnlichen Rispengrases (*Poa trivialis*) kritisch einbezogen werden, da dies bereits an einigen Standorten den Platz als zweit- bzw. drittstärksten HBB bei den Gräsern einnahm

(Abb. 2.2). Darin kann eine Erklärung in den zum Teil niedrigen Erträgen der intensiv bewirtschafteten Praxisflächen liegen. Die Wiesenbestände am Ökobetrieb Kringell erhielten mit durchschnittlichen 10 % Weißklee (*Trifolium repens*)-EA über die N-Fixierung nur eine geringe zusätzliche N-Zufuhr bei der insgesamt hohen Nutzungsintensität des Grünlandes. Die NUE vom Grünland lag im vierjährigen Mittel über die untersuchten Betriebe bei 41 kg TM/kg eingesetzten Dünger-N mit einer Spanne zwischen den Betrieben von 30 bis 56 kg TM/kg N-Düngung (Tab. 2.4).

Die Ertragsspannen verdeutlichen, dass auf Ernteerträge mehrere der angesprochenen standort- und bewirtschaftungsbedingten Faktoren einwirken. Die Ertragsstabilität zeigt, dass nur über eine Abgrenzung nach Nutzungsintensität – das häufig für die Ableitung von Ernteerträgen mittels Faustzahlen angeboten wird – keine ausreichend genaue Ertragsabschätzung erzielt werden kann. Anhand ausgewählter Datensätze wird eine weitere Analyse zu den ertragsrelevanten Faktoren vorgenommen.

Ertragsrelevante Faktoren

Um die relative Bedeutung der verschiedenen Einflussgrößen auf die Ertragsbildung der Grünlandbestände statistisch zu analysieren, wurden die Variablen WT, SI, N-Düngung je Schlag und Jahr (N), Summe der Tagestemperaturen > 5 °C je Jahr (Temp), Jahresniederschläge (ND_{Jahr}) und pH-Wert über die Kovarianzanalyse in das statistische Modell einbezogen (Tab. 2.5).

Tabelle 2.5: Ertragsrelevante Faktoren zu den Ernteerträgen (dt TM/ha) sowie deren Schätzwerte der Ertragsfunktion aus der Kovarianzanalyse von ausgewählten Schlägen (n=64)

Effekt	Einheit	Wertebereich	Schätz- wert	t-Wert	p-Wert ¹
WT1		-	-172,67	-2,68	0,0100**
WT2		-	-164,69	-2,53	0,0148*
WT3		-	-165,24	-2,54	0,0142*
SI ²	N	3-6	8,4603	3,06	0,0036**
Temp ³	°C	1.638-2.183	0,04260	2,96	0,0047**
N ⁴	kg N/ha	124-415	0,1050	2,63	0,0113*
ND _{Jahr} ⁵	mm/Jahr	685-1.272	0,02759	1,70	0,0958
pH ⁶	-	5,4-6,6	13,2230	1,57	0,1223

¹= $p > 0,05$., $p \leq 0,05$ *, $p \leq 0,01$ **.; ²= Schnittintensität; ³= Summe der Tagestemperaturen über 5 °C je Jahr; ⁴= N-Düngung je Schlag und Jahr (kg N_{ges.}/ha); ⁵= Summe der Niederschläge je Jahr; ⁶= pH-Wert je Schlag aus der Bodenuntersuchung.

Mit Differenzierung nach den WT ergeben sich folgende Ertragsfunktionen (y= dt TM/ha u. Jahr):

$$y_{WT1} = -172,67 + (8,4603 \times SI) + (0,04260 \times Temp) + (0,1050 \times N) + (13,2230 \times pH) + (0,02759 \times ND_{Jahr})$$

$$y_{WT2} = -164,69 + (8,4603 \times SI) + (0,04260 \times Temp) + (0,1050 \times N) + (13,2230 \times pH) + (0,02759 \times ND_{Jahr})$$

$$y_{WT3} = -165,24 + (8,4603 \times SI) + (0,04260 \times Temp) + (0,1050 \times N) + (13,2230 \times pH) + (0,02759 \times ND_{Jahr})$$

In dem statistischen Ertragsmodell wird nach den drei Wiesentypen differenziert, da es sich um signifikant unterschiedliche Variable handelt (Tab. 2.5). Die Ertragsfunktionen erzielten je nach WT eine sehr unterschiedliche Güte in der Anpassung der gemessenen Erträge (Abb. 2.4). Beim WT 3 wird das höhere Ertragspotenzial des DW durch die höheren EA (mind. >25 % EA) gut wiedergegeben (R^2 : 0,71). Dagegen steigt für WT 1 (R^2 : 0,47) und WT 2 (R^2 : 0,12) der Anteil nicht

durch das Modell erklärter Streuung deutlich an. Eine Ursache kann in der ungenügenden Kategorisierung der Pflanzenbestände in den beiden WT liegen. Als weitere Gräserarten dominieren zum Beispiel alternativ das weniger ertragsstabile Gewöhnliche Rispengras oder das hoch ertragreiche Knautgras (*Dactylis glomerata*) (Abb. 2.2) als Bestandsbildner.

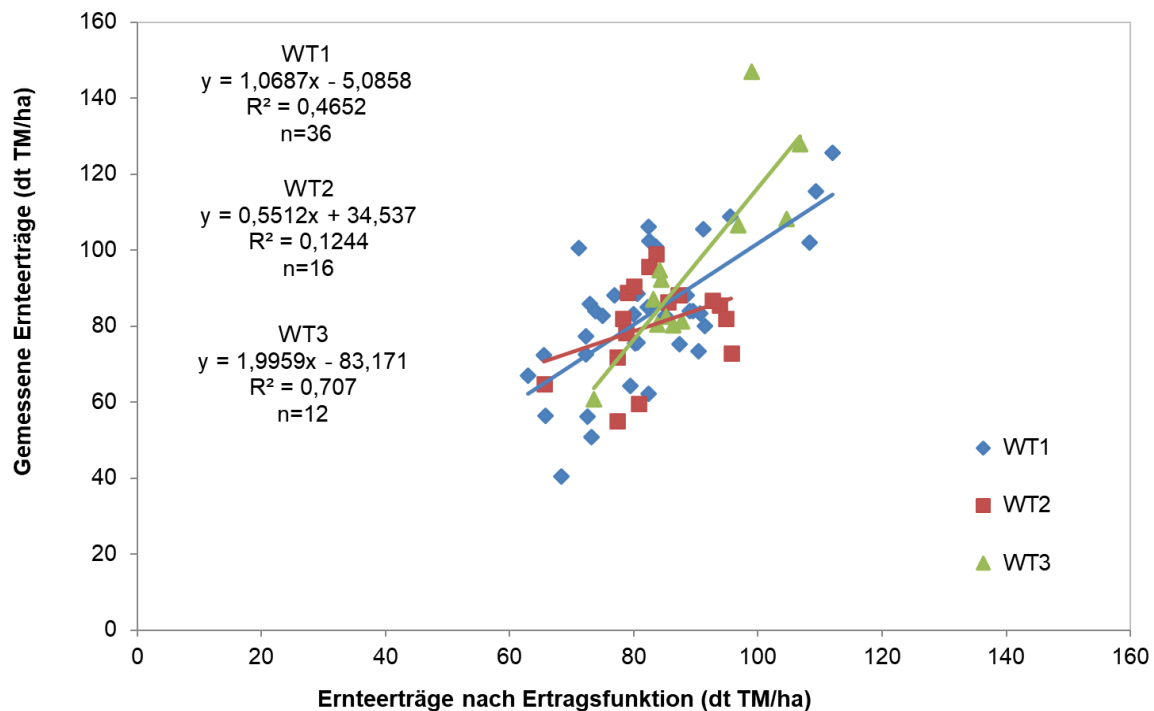


Abbildung 2.4: Regressionsgleichungen nach den ertragsrelevanten Faktoren differenziert nach den WT

Als entscheidende Einflussfaktoren auf den Ertrag stellten sich SI und N heraus. Somit hat die Bewirtschaftung über die Nutzungshäufigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Jahresernteerträge. Bei den Arbeiten zur Kalibrierung von Ertrags- und Qualitätsmodellen gilt die Nutzungsstrategie mit entsprechenden Zeitpunkten und Häufigkeiten als wichtiges Kriterium, die den Ertrag beeinflusst (Herrmann et al., 2005; Kornher et al., 1991; Petersen-Friedrich et al., 1989). Von den klimatischen Werten wurden Temp und ND_{Jahr} als ertragsrelevante Variable in das Modell einbezogen. Dabei zeigt sich die Temp mit einer Basistemperatur von 5 °C in dem Bereich von 1.638 bis 2.183 °C zwischen den Standorten als eine signifikante Einflussgröße. Die ND_{Jahr} schwankten in den Untersuchungsjahren von 685 bis 1.272 mm zwischen den Standorten erheblich und wurden für eine bessere Anpassung in der Ertragsfunktion mit berücksichtigt. Die Bodennährstoffgehalte Phosphor und Kalium lagen an allen

Standorten in optimalen bis (sehr) hohen Gehaltsklassen und waren als ertragsbestimmende Parameter somit nicht signifikant. Obwohl der pH-Wert nur einen tendenziellen Einfluss als Ertragsfaktor nach der statistischen Analyse aufweist, wird durch die Einbeziehung der Variablen in die Ertragsfunktion insgesamt eine genauere Anpassung erzielt. Niedrige pH-Werte im Bereich von 5,4 – 5,6 traten allein am Standort Kringell auf. Diese können negative Auswirkungen auf die Bodenstruktur und somit auch auf die Ertragsbildung haben.

Ertragsstabilität (FOPROQ-Modell)

Um Aussagen zur Ertragsstabilität von den intensiv geführten Grünlandflächen der Betriebe zu machen, wurden die betreffenden Modellparameter des FOPROQ-Modells (Kornher et al., 1991) mit Hilfe von dreijährigen Erntedaten kalibriert. Eine Gegenüberstellung der simulierten zu den gemessenen Erträgen zeigt anhand des hohen R^2 (0,91), dass eine gute Anpassung des Modells an die bayerischen Standortbedingungen erreicht worden ist (Abb. 2.5). Dafür spricht auch der niedrige Prognosefehler RMSE (Root Mean Square Error) im Mittel von 2,4 dt TM/ha und Schnitt. Damit wird belegt, dass die grundsätzlichen Modellalgorithmen, die bisher vor allem für nord- und westdeutsche Klimaverhältnisse kalibriert worden sind, auch auf die süddeutschen Klimaverhältnisse übertragbar und somit anwendbar sind.

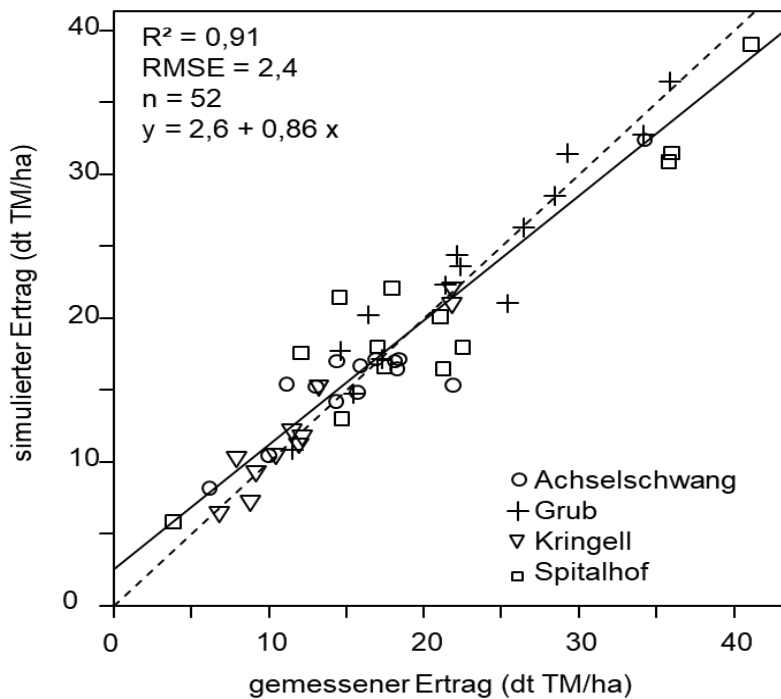


Abbildung 2.5: Kalibrationsstatistik der simulierten zu den gemessenen Ernteerträgen je Schnitt an vier Betriebsstandorten aus drei Jahren

Die Simulation der Ernteerträge nach dem FOPROQ-Modell über einen Zeitraum von neun Jahren zeigt eine deutliche Varianz zwischen den Standorten und den Jahren (Tab. 2.6). Je nach Standort wurde im neunjährigen Mittel (2006 – 2014) 66 bis 118 dt TM/ha erzielt mit Variationskoeffizienten je nach Standort von 15 bzw. 21 % CV zwischen den Jahren. Während der Spitalhof und Grub auch über die Langzeitsimulation als ertragsstabil gelten können, gilt dies mit deutlich erhöhten CV-Werten für Achselschwang und Kringell weniger ausgeprägt. Die mittleren Erträge aus der langjährigen Modellsimulation lagen im Vergleich zu den Untersuchungsjahren 2009 – 2011 über den gemessenen Ernteerträgen. Somit ist zu konstatieren, dass die drei Jahre der Datenerhebung auf den Betrieben repräsentative Verhältnisse widerspiegeln.

Tabelle 2.6: Simulierte Ernteerträge (dt TM/ha) je Jahr und im neunjährigen Mittel (2006 – 2014) an vier Betriebsstandorten

Jahre	Spitalhof	Grub	Achselschwang	Kringell
2006	88	101	82	53
2007	118	127	130	74
2008	95	113	110	59
2009	105	115	94	84
2010	86	102	76	52
2011	131	126	105	71
2012	99	121	99	59
2013	85	100	71	52
2014	111	157	129	87
neunjähriges Mittel	102	118	100	66
±s	16	18	21	14
cv%	15	15	21	21

2.3.2 Rohprotein-, Energie- und Nährstofferträge

Rohprotein (XP)- bzw. N-Erträge

Die XP- bzw. N-Erträge lagen im vierjährigen Mittel über alle Betriebsstandorte im Bereich von 1.125 bis 1.662 kg XP bzw. 180 bis 266 kg N/ha und Jahr. Dabei zeigten sich insgesamt hohe Schwankungen zwischen den Jahren, die insbesondere an den Standorten Kringell, Achselschwang und Grub auftraten ($\pm s$: 385, 267 und 227 kg XP/ha und Jahr) (Tab. 2.7). Der Spitalhof erzielte mit einem mittleren XP-Gehalt von 166 g XP/kg TM die höchsten XP-Erträge von 1.662 kg XP/ha und Jahr. Am Betrieb Achselschwang sowie Almesbach wurde bei unterschiedlicher Schnittintensität ein gleich hoher XP-Ertrag von 1.317 kg XP/ha und Jahr erwirtschaftet. Am Ökobetrieb Kringell wurde von ausgewählten Grünlandschlägen (drei Schläge) 1.125 kg XP/ha und Jahr mit 178 g XP/kg TM erzielt. Über alle Betriebe lagen die mittleren XP-Gehalte im Bereich von 164 bis 178 g XP/kg TM, wobei auch hier deutliche Schwankungen zwischen den Jahren auftraten (Tab. 2.7). Extreme Witterungssituationen, u. a. die Frühjahrstrockenheit 2011 und die damit verbundene geringere Stickstoffmobilisierung haben sich deutlich in niedrigeren XP-Gehalten

widergespiegelt (Köhler et al., 2013). Jedoch sind insgesamt hohe XP-Gehalte durch frühe Schnittzeitpunkte von den intensiv geführten Grünlandbeständen erzielt worden.

Tabelle 2.7: XP- bzw. N- und Energie-Erträge ($\pm s$) vom Grünland sowie mittlere XP-, N-, Energie- bzw. Mineralstoffgehalte¹ und N:S-Quotient² der Betriebe bei Silagenutzung (Analysen vom Anwelkgut) im vierjährigen Mittel (2009 – 2012) mit Angabe der Schnittintensität (SI)

Parameter	Spitalhof	Grub	Achsel- schwung	Almes- bach	Kringell ³
SI	4–5	4–5	4–5	3–4	4–5
N-Ertrag, kg N/ha	266 \pm 10	242 \pm 36	211 \pm 43	219 \pm 31	180 \pm 62
XP-Ertrag, kg XP/ha	1.662 \pm 61	1.514 \pm 227	1.317 \pm 267	1.317 \pm 193	1.125 \pm 385
N-Gehalt, g/kg TM	26,5 \pm 1,5	27,4 \pm 2,6	26,3 \pm 2,9	26,7 \pm 1,8	28,5 \pm 0,9
XP-Gehalt, g/kg TM	166 \pm 9	171 \pm 16	164 \pm 18	167 \pm 11	178 \pm 6
nXP-Gehalt, g/kg TM	139 \pm 3	136 \pm 2	136 \pm 3	135 \pm 6	137 \pm 1
RNB, g/kg TM	4,4 \pm 1,6	5,7 \pm 2,3	4,5 \pm 2,8	5,2 \pm 1,6	6,6 \pm 0,8
Energie-Ertrag, GJ NEL/ha	63 \pm 5	53 \pm 6	48 \pm 4	49 \pm 6	38 \pm 13
Energie, MJ NEL/kg TM	6,2 \pm 0,3	6,0 \pm 0,1	6,1 \pm 0,3	6,0 \pm 0,4	6,0 \pm 0,2
P-Gehalt, g/kg TM	3,9 \pm 0,2	3,8 \pm 0,2	4,1 \pm 0,2	3,7 \pm 0,2	3,8 \pm 0,1
K-Gehalt, g/kg TM	27,4 \pm 1,2	23,6 \pm 1,5	28,2 \pm 1,3	27,4 \pm 1,6	28,5 \pm 1,6
Mg ⁴ -Gehalt, g/kg TM	2,5 \pm 0,1	2,8 \pm 0,1	2,5 \pm 0,2	2,8 \pm 0,2	2,6 \pm 0,1
N:S-Quotient, N:S	12:1 \pm 0,2	9:1 \pm 0,9	10:1 \pm 1,3	11:1 \pm 0,6	12:1 \pm 0,3

¹= nach Ernteertrag gewichtete Mittelwerte je Schnitt und Jahr mit Standardabweichung ($\pm s$) zwischen den Jahren; ²= Stickstoff:Schwefel-Verhältnis; ³= Berechnung anhand ausgewählter Grünlandschläge; ⁴= Magnesium.

Der XP-Ertrag ist eine Funktion des TM-Ertrages und des XP-Gehaltes. Bei Intensivnutzungssystemen des Grünlands wie im vorliegenden Fall ist eine enge Korrelation zwischen TM- und XP-Ertrag gegeben (Abb. 2.6), während der XP-Gehalt den XP-Ertrag nur marginal beeinflusst.

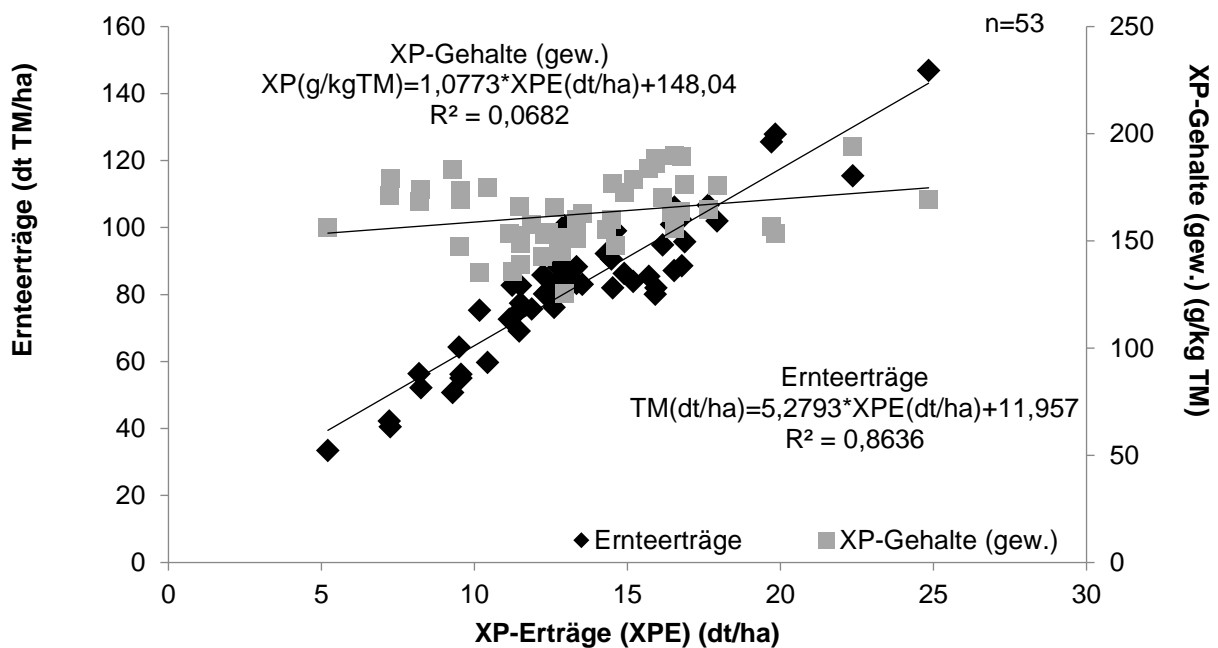


Abbildung 2.6: Regression der Ernteerträge (dt TM/ha) und der XP-Gehalte (gewichtet nach TM-Ertrag (g/kg TM) auf die XP-Erträge (XPE) (dt/ha)

Der absolute Rohproteingehalt ist zur Bewertung von Grasprodukten für die Milchviehfütterung allein nicht ausreichend. Neben dem Rohprotein sind das nutzbare Rohprotein am Duodenum (nXP), das im Pansen unabgebaute Protein (UDP), die ruminale Stickstoffbilanz (RNB) sowie die Gehalte und Erträge an umsetzbarer Energie (ME) wichtige Größen (GfE, 2001; Schuba & Südekum, 2012; Köhler et al., 2013). Für das Anwelkgut vom Grünland ergaben sich Werte im vierjährigen Mittel im Bereich von 135 bis 139 g nXP/kg TM bzw. 4,4 bis 6,6 g RNB/kg TM (Tab. 2.7) und liegen somit im Bereich der Orientierungswerte für Frischgras und gute Grassilagen (DLG, 2011; Spiekers, 2008).

Energieerträge

Von den Grünlandflächen wurden über alle Standorte Energieerträge von 38 bis 63 GJ NEL/ha und Jahr erzielt (Tab. 2.7). Die mittleren Energiegehalte lagen im Bereich von 6,0 bis 6,2 MJ NEL/kg TM. Die große Spanne in den Energieerträgen wurde nahezu ausschließlich durch die Ertragsleistung der Flächen beeinflusst und kaum durch die Variation der Energiegehalte. Stärkere Schwankungen in den Energiedichten ($\pm s$: 0,4) traten am Standort Almesbach auf, da sich in bestimmten Untersuchungsjahren witterungsbedingt der Erntetermin des 1. Schnittes deutlich nach hinten verschob. Die Energiedichte wird vorrangig durch Schnittzeitpunkt bzw.

Pflanzenbestand im Grünland bestimmt, nicht jedoch durch das TM-Ertragsniveau. Die höchsten und stabilsten Energiegehalte und -erträge wurden am Spitalhof erzielt (6,2 MJ NEL/kg TM; 63 GJ NEL/ha). Dafür spricht, dass die Pflanzenbestände am Spitalhof neben der hohen Ertragsleistung einen höheren Anteil an hochwertigen Gräsern und Kräutern aufwiesen (Abb. 2.2). Hohe Energiegehalte im Grobfutter sind eine der Voraussetzungen für hohe Futteraufnahmen (DLG, 2006).

Nährstoffträge

Die P-Erträge lagen über alle Betriebsstandorte im Bereich von 24 bis 39 kg P/ha und Jahr bei P-Gehalten von 3,7 bis 4,1 g P/kg TM im vierjährigen Mittel (Tab. 2.8 und 2.7). Die P-Gehalte des Erntegutes lagen insgesamt über dem bundesweiten Durchschnitt von 3,3 g P/kg TM bei Grassilagen (Spiekers et al., 2012). In der Literatur werden übereinstimmend Ertragsgrenzwerte für maximale TM-Erträge von ~ 2,8 g P/kg TM angegeben (Greiner et al., 2010; Greiner et al., 2014). Unter Berücksichtigung der ebenfalls sehr hohen Boden-P-Vorräte ist somit von einer gewissen P-Übersorgung der konventionell bewirtschafteten Grünlandbestände auszugehen (Tab. 2.1 und 2.8).

Die K-Erträge ergaben Abfuhr im Bereich von 181 bis 275 kg K/ha an allen Standorten (Tab. 2.8). Dabei lagen die K-Gehalte mit 23,6 bis 28,5 g/kg TM auf einem hohen Niveau (Tab. 2.7) und weisen auf einen Kalium-Luxuskonsum (bedingt durch hohe N-Aufnahmen der Bestände in Form von Nitrat) hin, der sich negativ auf die Mg-Aufnahme auswirken kann. Als Ertragsgrenzwert wird beim Kalium ein Wert von 20 g/kg TM als ausreichend angesehen (Greiner et al., 2010). Ebenso zeigt der N:S-Quotient von 11:1 über alle Grünlandflächen keinen Schwefelmangel an, der sich auf das Ertragspotenzial auswirken könnte. Weitere Untersuchungen zum Grünland in Bayern weisen bei den Mineralstoffgehalten insbesondere bei höheren Nutzungsintensitäten sehr hohe P- und K-Gehalte aus (Diepolder et al., 2013). Dabei waren deutlich höhere K-Gehalte mit 31,5 bzw. 34,0 g/kg TM bei den Vier- bzw. Fünf-Schnittwiesen auffällig und liegen somit deutlich über den Faustzahlen der bayerischen Landwirtschaftsverwaltung (Wendland et al., 2012). Die Ergebnisse zu den grünlandbezogenen Nährstoffabfuhr zeigen die großen Streubreiten auf, die bei den NPK-Erträgen in der Praxis vorkamen.

2.3.3 Nährstoffsalden vom Grünland

Die Gehaltsklassen D bzw. E bei den P- und K-Bodenwerten vom Grünland der untersuchten Betriebsstandorte belegen eine langjährige viehintensive Grünlandbewirtschaftung (Tab. 2.8). Die Nährstoffbilanzen des intensiv bewirtschafteten Grünlands ergaben über die aggregierten Grünlandflächen der Betriebe unterschiedliche Ergebnisse in den NPK-Salden im vierjährigen Mittel (Tab. 2.8). Mit Ausnahme des Spitalhofs wurden positive N-Salden im Bereich von 4 bis 69 kg N/ha und Jahr gemessen. Die negativen NPK-Salden des Grünlands am Standort Spitalhof werden durch höchste Nährstoffabfuhr bei hohen TM-Erträgen verursacht.

Tabelle 2.8: Nährstoffsalden der aggregierten Grünlandflächen je Betrieb über Nährstoffzu- und -abfuhr (NPK) im vierjährigen Mittel (2009 – 2012)

Betriebe		Spitalhof	Grub	Achsel- schwung	Almes- bach	Kringell ¹
SI	n	4–5	4–5	4–5	3–4	4–5
Gehalts- klasse ²	P	D	E	E	C	C
	K	D	C	E	B	C
Zufuhr ³	N (kg/ha), CV (%)	204 (10)	312 (12)	266 (2)	278 (10)	184 (2)
	P (kg/ha), CV (%)	33 (10)	17 (16)	51 (8)	38 (23)	43 (4)
	K (kg/ha), CV (%)	162 (12)	160 (17)	202 (5)	164 (26)	191 (3)
Abfuhr ³	N (kg/ha), CV (%)	266 (4)	242 (15)	211 (20)	219 (14)	180 (34)
	P (kg/ha), CV (%)	39 (3)	34 (12)	33 (14)	30 (10)	24 (28)
	K (kg/ha), CV (%)	275 (4)	209 (11)	225 (14)	224 (7)	181 (33)
Saldo⁴	N (kg/ha), (±s)	–62 (12)	69 (33)	55 (39)	59 (48)	4 (8)
	P (kg/ha), (±s)	–5 (4)	–17 (6)	18 (6)	8 (11)	19 (6)
	K (kg/ha), (±s)	–112 (21)	–48 (30)	–24 (31)	–60 (48)	10 (60)

¹= Saldierung auf Basis drei ausgewählter Grünlandschläge über die Jahre 2009 – 2011; ²= siehe auch Tab. 1, ³= jährliche NPK-Zufuhren (mit N_{fix}) und -Abfuhr im vierjährigen Mittel mit Variationskoeffizienten (CV) zwischen den Jahren auf Basis der aggregierten Grünlandflächen, ⁴= NPK-Salden im vierjährigen Mittel der jährlichen NPK-Salden mit ±s zwischen den Jahren, N-Saldo als Bruttobilanz (siehe Kap. 2.2.2).

Beim Phosphor ergaben sich über die ausgewählten Betriebe positive wie negative Salden, die deutlich von der Art und Höhe der Düngung beeinflusst wurden, auch bei vorwiegendem Einsatz von Wirtschaftsdüngern. So waren für die Grünlandflächen in Achselschwang die N/P-Zufuhren im Verhältnis zu den Abfuhren zu hoch. Ferner führte auf dem Ökobetrieb Kringell die Düngung mit Stallmistkompost bei weitgehend ausgeglichenen N-Salden zu positiven P-/K-Salden. Die divergierenden Ergebnisse in den N-/P-/K-Salden ergaben sich durch die unterschiedlichen Düngerformen und untermauern die Bedeutung von Analysen der eingesetzten Wirtschaftsdünger um entsprechend den Düngebedarf richtig zu ermitteln. An den meisten Standorten zeigten sich deutlich die hohen K-Abfuhren mit negativen K-Salden im Bereich von –24 bis –112 kg K/ha und Jahr (Ausnahme Kringell mit 10 kg K/ha und Jahr). Dies steht in Zusammenhang mit den angesprochenen hohen K-Gehalten im Erntegut (siehe 2.3.2; Tab. 2.7), die bis auf Almesbach mit hohen Boden-K-Werten korrespondieren.

2.4 Diskussion

2.4.1 Produktivität des Grünlands

In einer Studie zur Abschätzung der Grünlandproduktivität in Europa wurde die Bedeutung der Ertragsleistung des Grünlandes für die Milcherzeugung herausgestellt (Smit et al., 2008). Mit Hilfe eines statistischen Modells unter Einbeziehung regionaler Daten wurden so für Deutschland durchschnittlich 86 dt TM/ha an Ernteerträgen berechnet mit einer sehr hohen Variabilität in Abhängigkeit der klimatischen Faktoren. Die Ernteerträge von intensiv bewirtschafteten Grünlandbeständen unter bayerischen Standortbedingungen in unserer Studie reichten je nach Nutzungsintensität und Standort von 65 – 97 dt TM/ha im vierjährigen Mittel (Tab. 2.4). Dabei verdeutlicht die Ertragsanalyse, welche hohe Variabilität bei den Ernteerträgen auf kleinräumiger Skala zu berücksichtigen ist. Die gemessenen, teils hohen Ertragsunterschiede zwischen einzelnen Schlägen (siehe Abb. 2.3) sind trotz ähnlichem Bewirtschaftungsniveau erheblich, sodass schlagbezogene Ertragsinformationen unter anderem für die Düngebedarfsermittlung des Landwirts evident sind. Gleichzeitig blieben die mittleren Ernteerträge von den Grünlandflächen aus der Praxis teils hinter den geschätzten Erträgen nach den geltenden Faustzahlen der bayerischen Landwirtschaftsverwaltung (Wendland et al., 2012; Diepolder et al., 2013) zurück. Die

in der bayerischen Beratung eingesetzte Kategorisierung nach WT (Wendland et al., 2012) erfordert eine ausreichende Artenkenntnis, die häufig in der Praxis nicht vorhanden ist. Nur für den WT 3 („Weidelgras reiche Wiesen“) konnte ein ertragsrelevanter Effekt durch den Pflanzenbestand festgestellt werden, da sich bei diesem WT das höhere Ertragspotenzial des wichtigsten Futtergrases DW durch höhere EA bemerkbar machte. In einem Grünland-Monitoring auf bayerischen Wiesen, mit dem der höchste mittlere Ertrag der wichtigsten Gräser ermittelt wurde, stand das DW jedoch erst an fünfter Stelle (Kuhn et al., 2011). Eine Langzeitstudie von LAIDIG et al. (2014) zum Ertragszuwachs landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in den zurück liegenden 30 Jahren belegt u. a. für das DW einen züchterischen Fortschritt für den TM-Ertrag von 0,15 % pro Jahr aus den Daten der Wertprüfung, anhand von Praxiszahlen lag dafür keine Datenbasis vor. Daraus resultiert, dass die Nutzung von Zuchtfortschritten in der Gräserzüchtung nur über erhöhte Anteile des DW in der Praxis genutzt werden kann, da einerseits nur für diese Spezies solche Zuchtfortschritte dokumentiert sind (Smit et al., 2008; Laidig et al., 2014; Salama et al., 2012) und andererseits gezeigt wurde, dass Reinbestände von Gewöhnlichem Rispengras gegenüber solchen von DW Ertragsreduktionen von 50 % aufweisen können (Hartmann et al., 2011).

Fundierte Wachstums- und Futterqualitätsmodelle bieten zunehmend die Möglichkeit, Ertragsleistung und Qualitätsveränderung von Grünlandaufwüchsen über ganze Vegetationsperioden vorherzusagen (Kornher et al., 1991; Herrmann et al., 2005; Petersen-Friedrich et al., 1989). Für die Modelloptimierung sind Feldversuchsdaten notwendig, um Einflüsse von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Erträge und Qualitäten im Modell zu parametrisieren. Anhand der Praxisdaten konnten die Modellparameter des FOPROQ (Kornher et al., 1991) an die bayerischen Standortbedingungen gut angepasst werden (Abb. 2.5), um so eine langjährige Ertragssimulation vorzunehmen. Die simulierten Ernteerträge zeigen hohe Varianzen zwischen den Standorten bzw. zwischen den Jahren auf, die durch Umwelt- als auch Bewirtschaftungseffekte verursacht wurden. Dabei sind die hohen jahresbedingten Ertragsschwankungen auffällig, die die Ertragsstabilität des Grünlands an einigen der Standorte eingrenzt. Eine verminderte Ertragsstabilität resultiert konsequenterweise in einem reduzierten ökonomischen Düngungsoptimum (Petersen-Friedrich et al., 1989), das unsere Betriebsdaten so nicht dokumentieren. Für intensiv geführtes Grünland stellen somit Ertragsmodelle ein geeignetes Werkzeug für die regionale Prognose dar.

Jedoch vermitteln die hohen Ertragsspannen, die innerhalb einer Nutzungsintensität und an einem Standort auftreten, dass die kleinräumigen Effekte auf den Ertrag auch über Ertragsmodelle nicht ausreichend abgebildet werden können. In Summe resultiert daraus, dass technische Lösungen zur Erfassung der schlaggenauen TM-Erträge (z. B. Durchflussmessungen am Häcksler) notwendig sind, um eine entsprechende standortgerechte Nährstoffversorgung der Bestände zu gewährleisten. Entsprechende Techniken sind in der Entwicklung bzw. vor allem im überbetrieblichen Einsatz verfügbar (Köhler et al., 2011; Thurner et al., 2011; Köhler et al., 2014a).

2.4.2 Rohprotein- und Energieerträge vom Grünland

Energie und Rohprotein sind die wesentlichen Qualitätsmerkmale von Grünlandaufwüchsen. Entsprechend ist die Wahl des Nutzungszeitpunktes primär durch den Energiegehalt des Futters zur Ernte determiniert. RANDBY et al. (2012) belegen in einer Untersuchung zu hohen Grobfutterqualitäten mit Wiesen-Lieschgras (*Phleum pratense*) dominierenden Beständen, dass durch sehr frühe Nutzungszeitpunkte hohe Grobfutterleistungen zu erzielen sind. In Intensivgrünlandsystemen zur Milchviehfütterung werden im Jahresdurchschnitt Werte > 6,1 MJ NEL/kg TM angestrebt und im Primäraufwuchs möglichst Werte > 6,4 MJ NEL/kg TM (DLG, 2011). Dies bedingt hohe Anteile von DW im Bestand und mindestens 4 – 5 Nutzungen/Jahr. Diese Zielwerte werden in der vorliegenden Studie insbesondere mit den DW reichen Beständen am Spitalhof realisiert. Auf Basis der durch die Ansprüche an Energiedichte vorgegebenen Nutzungshäufigkeiten ist es in der Rinderfütterung ein weiteres Ziel, eine überwiegende Rohproteinversorgung aus dem Grobfutter sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen (N-Saldo) anzustreben (Schuba & Südekum, 2012; Herrmann et al., 2014). Bei den untersuchten Betrieben lag der Anteil des Rohproteins aus dem Grobfutter zu Beginn des Untersuchungszeitraums zwischen 41 und 61 % (Köhler et al., 2014a). Mit den gesetzten Zielen der Eiweißstrategie über Bund- und Länderprogramme werden dem Grünland in der Diskussion um Einsparpotenziale beim Eiweißimport in der Rinderfütterung die größten Reserven zugesprochen (Stockinger & Schätzl, 2012; Schätzl, 2013). Rund ein Drittel des importierten Sojaproteins wird derzeit in der Rinderfütterung eingesetzt (Stockinger & Schätzl, 2012). Über eine Steigerung der Eiweißerträge von 3 % aus dem Grobfutter könnten rund 206.000 t XP pro Jahr an Kraftfuttereiweiß eingespart werden (Stockinger & Schätzl, 2012).

Die XP-Erträge der Betriebe zeigten große Ertragsspannen von 11 bis 17 dt XP/ha und Jahr (Tab. 2.7). Dabei hatte die TM-Ertragsleistung den höheren Einfluss auf die XP-Erträge als die erzielten XP-Gehalte (Abb. 2.6). Eine hohe NUE ist somit die Voraussetzung für gleichermaßen hohe XP-Gehalte und -erträge und diese hohe NUE wiederum setzt hohe Ertragsanteile an DW voraus (Herrmann et al., 2005; Diepolder & Schröpel, 2002). Die Ansätze zur Verbesserung der XP-Ertragspotenziale liegen in den Bewirtschaftungsmaßnahmen, d. h. da Nutzungszeitpunkt und -häufigkeit primär durch die Energiedichteansprüche determiniert sind, sind vor allem N-Düngung und bestandsverbessernde Maßnahmen (Nachsaat, Kalkung etc.) zu nennen. Im vorliegenden Fall wird der in der Literatur häufig angeführte optimale „Rohproteinkorridor“ von 160 bis 180 g XP/kg TM zumeist eingehalten. In einem bundesweiten Projekt wurden die optimalen N-Intensitäten im Grünland bei Hochleistungsbeständen untersucht (Herrmann et al., 2014). Die Ergebnisse belegen einerseits die hohe N-Aufnahmekapazität DW dominierender Bestände, andererseits streute die optimale N-Zufuhr erheblich je nach Standort und der gewünschten Zielsetzung (Ertrag, Futterqualität). Am Spitalhof lagen die optimalen N-Zufuhren bei 313 kg N/ha für den Ertrag (Grenzertrag: 10 kg TM/kg N) bzw. bei 149 kg N/ha für den XP-Gehalt (Zielwert: 180 g/kg TM). Höhere Rohproteingehalte von Grünlandkonserven bis ~ 200 g/kg TM können durchaus im Sinne der Maximierung der nXP-Versorgung wie der RNB opportun sein, wenn alternative Rationskomponenten mit negativer RNB (z. B. Mais) zur Verfügung stehen (Herrmann et al., 2014). Das Fazit der Untersuchung ist, dass unterschiedliche Strategien zur Ausschöpfung des Ertrags- und XP-Potenzials verfolgt werden können, ohne dabei den N-Saldo negativ zu beeinflussen. Insbesondere über die Wahl des Konservierungsverfahrens kann die Versorgung mit nXP gesteuert werden (Edmunds et al., 2013). Der Anteil an XP aus dem Grobfutter wurde während des Versuchszeitraums an den untersuchten Betrieben durch ein verbessertes Grobfuttermanagement gesteigert (Köhler et al., 2014a). Gleichwohl weisen die auf den Betrieben im Anwelkgut realisierten nXP-Werte von durchgängig unter 140 g darauf hin, dass das Potential aus dem Zusammenspiel von erhöhter Energiedichte zugunsten erhöhter nXP-Werte noch nicht ausgeschöpft ist (Spiekers et al., 2009; Steingäß & Südekum, 2013). Die GfE (2001) empfiehlt eine RNB von 0 – 50 g N pro Kuh und Tag um Eiweißüberschüsse zu vermeiden. Insofern stellen die beobachteten Werte vom Anwelkgut von 4,4 bis 6,6 g N in der RNB für diese Futterkomponente eine

ausgeglichene Eiweißsituation dar und gewährleisten je nach Gestaltung der Gesamtration eine hohe potentielle Stickstoffnutzungseffizienz durch das Tier (Spiekers, 2008).

Im Durchschnitt lagen die XP-Erträge unter den bayerischen Standortbedingungen von intensiv geführtem Grünland bei rund 14 dt XP/ha und Jahr. Im Vergleich zu weiteren Futterpflanzen an den untersuchten Standorten erzielten der Silomais 11 dt XP/ha sowie das Klee gras an einem Standort 17 dt XP/ha im vierjährigen Mittel (Köhler et al., 2014a). Aus Sortenversuchen in Bayern erreichte die Sojabohne rund 9,4 dt XP/ha (LfL, 2016; abzgl. 15 % Verluste) und die Luzerne rund 21 dt XP/ha (LfL, 2011; abzgl. 25 % Verluste). Neben dem hohen XP-Potenzial von Luzerne und Klee gras, deren Anbau in die Fruchtfolge zu integrieren ist, liefert das Grünland bei einer relativ hohen Ertragsstabilität die höchsten XP-Erträge pro Flächeneinheit. Eine Erweiterung des Körnerleguminosenanbaus ist nach wie vor sehr stark von der Wettbewerbsfähigkeit der Ackerfrucht abhängig und weist noch erhebliche Ertragsrisiken auf (Aigner, 2010; Stockinger & Schätzl, 2012). Weiter sind in der Diskussion um die heimischen Eiweißfutterprodukte der zusätzliche Flächenbedarf von Eiweißfrüchten vom Acker und die damit zusammenhängenden Effekte einer indirekten Landnutzungsänderung zu beachten (Heißenhuber & Schätzl, 2013).

2.4.3 Optimierungspotenziale im Futterbausystem

Die Ertragsanalyse unter bayerischen Standortbedingungen verdeutlicht die Variabilität in den Ernteerträgen vom Grünland, die standort-, bewirtschaftungs-, jahres- und schlagbedingt auftraten. Trotz hoher jahresbedingter Variabilität (15 – 21 %), die langjährig erhoben wurde, liefert das Grünland eine relativ hohe Ertragsstabilität, die für einen Milchvieh-/Futterbaubetrieb entscheidend ist. Da Schnittintensität und N-Düngung als wesentliche ertragsrelevante Faktoren ermittelt wurden, kann die Grünlandnutzung in Bezug auf Ertrag und Qualität über Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie im Sinne einer effizienten und umweltgerechten Düngepraxis gesteuert werden. Die Grundlage für diese gezielte Steuerung der Grünlandbewirtschaftung liegt in einer möglichst schlagbezogenen Ertragsermittlung. Darauf aufbauend können fundierte Kalkulationen und Planungen, wie z. B. Dünge- und Futterplanung erfolgen. Die Nährstoffsalden über die aggregierten Grünlandflächen verdeutlichen den hohen Einfluss der Ernteerträge auf die NPK-

Abfahren und somit auf die Bilanzsalden. Für N- und P-Salden gelten auf Betriebsebene bereits verbindliche Zielwerte, die in der DüV geregelt sind. Über eine fundierte NPK-Bilanz auf den Grünlandflächen ist es möglich, eine entzugsorientierte Düngung in der Praxis exakt umzusetzen. Darin liegt ein erhebliches Optimierungspotenzial unter Einhaltung umweltrelevanter Kriterien. Zur angemessenen Systembewertung werden aufgrund der hohen Heterogenität in den betrieblichen N-Flüssen bereits einzelbetriebliche Betrachtungen gefordert (Sundrum, 2012; Oenema, 2013). Dafür sollte die N-Effizienz als Referenz- und Zielgröße zur Beurteilung umweltverträglicher Landwirtschaft stärker etabliert werden (Sundrum, 2012). Aus Versuchsergebnissen von Weidelgras betonten Grünlandbeständen sind bei hohen Nutzungsintensitäten mit negativen N-Salden günstige NUE von über 60 kg TM/kg Dünger-N abgeleitet worden (Diepolder & Raschbacher, 2011; Diepolder & Schröpel, 2002). Dieses Verhältnis weist auf ein hohes N-Nachlieferungspotenzial solch hochproduktiver Grünlandstandorte hin (Diepolder & Schröpel, 2002), das durch die Ergebnisse von den untersuchten Praxisflächen vom Spitalhof mit einer NUE von 53 kg TM je kg eingesetzten Dünger-N bei konstant negativen N-Saldo bestätigt wird. Für die Betriebe mit geringeren NUE (~ 32 kg TM/kg Dünger-N) und mit positiven N-Salden sind verstärkt Strategien für einen effizienten Düngereinsatz in der Grünlandbewirtschaftung zu verfolgen (Taubе, 2014a). Wesentliche Ansätze dafür liegen in verbesserten Gülleapplikationstechniken, die eine möglichst hohe N-Verwertung der Gülle gewährleisten. Geringe NUE in Verbindung mit vergleichsweise hohen Anteilen von unerwünschten Gräsern wie Gewöhnliches Rispengras und Wiesen-Fuchsschwanz lässt auch auf verdichtete Böden schließen, da diese Gräser im Gegensatz zum DW an verminderten Sauerstoffpartialdruck im Boden adaptiert sind. Verschiedene Untersuchungen belegen gleichermaßen die ertragslimitierende Wirkung von Bodenverdichtungen (Diepolder et al., 2009), wie die negativen Effekte auf die NUE und auf erhöhte Treibhausgas-Emissionen (Schmeer et al., 2014).

Je nach Standortbedingungen und gewünschter Nutzungsstrategie sind in der Grünlandnutzung Reserven in Bezug auf Ertrags- und XP-Potenziale vorhanden. Die Untersuchung zum möglichen Leistungspotenzial von DW dominierenden Beständen verdeutlicht, dass bei intensiver Schnittnutzung entsprechend hohe NPK-Abfahren von der Fläche erfolgen, ohne dass dabei N-Austräge vermehrt auftreten (Herrmann et al., 2014). Auch hier zeigen sich Möglichkeiten mit Hilfe der Ertragsermittlung solche

hochproduktive Standorte fachgerecht und optimal zu nutzen. Die unterschiedlichen Ertragspotenziale an den Standorten unterstützen die Forderungen nach regionalen Düngeempfehlungen (Herrmann et al., 2014). So könnte in Zukunft mit Hilfe schlagbezogener Ertragsdaten die Derogationsregelung ohne negative Umwelteffekte verstärkt in Anspruch genommen werden.

Im DAIRYMAN-Projekt wurde insbesondere die Problematik der Nährstoffsituation in viehintensiven Betriebssystemen in Nordwesteuropa aufgegriffen (Elsässer et al., 2013; Herrmann et al., 2011; De Vries et al., 2013). Insbesondere zur P-Problematik waren die hohen Schwankungen in den P-Salden auf Betriebsebene, die zwischen den Partnerregionen auftraten, teils durch hohe Krafffutteranteile verursacht (Elsässer et al., 2013). Anhand der Nährstoffbilanzen über die aggregierten Grünlandflächen für P und K zeigt sich die Nährstoffsituation in den untersuchten Betrieben. Die P- und K-Werte in den Boden-Gehaltsklassen D bis E vom Grünland der untersuchten Standorte verdeutlichen eine langjährige viehintensive Grünlandbewirtschaftung. Auf die hohen Bodennährstoffgehalte ist mit der Unterlassung von Mineraldüngergaben über einige Jahre zu reagieren, gegebenenfalls auch mit der Abgabe von Wirtschaftsdüngern. Bei der Düngeempfehlung für Phosphor ist auf die Bodenuntersuchungswerte zurückzugreifen. Auf Basis neuerer Versuchsergebnisse wurde aktuell vom VDLUFA in einem Positionspapier zur Phosphordüngung vorgeschlagen, die Richtwerte für die Gehaltsklasse C herabzusetzen (VDLUFA, 2015). Weitere Untersuchungen zur P- und K-Versorgung im Grünland verdeutlichen, dass allein vom P- und K-Status des Bodens nicht ausreichend auf den Düngebedarf geschlossen werden kann (Diepolder & Raschbacher, 2013; Greiner et al., 2010). Für eine fachgerechte Düngeempfehlung wird die Einbeziehung der Mineralstoffgehalte aus den Futteranalysen empfohlen. Auf dieser Datengrundlage kann eine entzugsorientierte und teilflächenspezifische Düngeplanung aufgestellt werden, die kurz- und langfristig als betriebliches Controlling zur Düngung dient.

2.5 Schlussfolgerungen

Die Analyse des Grünlandmanagements und der Grünlandproduktivität unter bayerischen Standortbedingungen bestätigt die eingangs aufgestellte These, dass das Grünland für Milchvieh-/Futterbaubetriebe eine sehr wertvolle Ressource als Energie- und Eiweißlieferant ist, die aber noch erhebliche Reserven aufweist. Um ein

optimiertes und gleichzeitig umweltschonendes Produktionsmanagement in der Praxis zu erzielen, muss auf die hohe Variabilität im Ertrag und damit in den Nährstoffabfuhr mit einem konsequenten Erfassen von Menge und Qualität reagiert werden. Diese Ertrags- und Qualitätsdaten liefern in Verbindung mit Prognosemodellen für Zuwachs- und Qualitätsdynamik die Grundlage für eine verbesserte Steuerung der Futterwirtschaft und erhöhen die Aussagekraft von Nährstoffbilanzen für das gesamte Betriebsmanagement. So kann innerbetrieblich über eine Schlagbilanz eine Schwachstellenanalyse in der Düngepraxis erfolgen. Ferner liefern die Ertragsinformationen die Basis für eine entzugsorientierte Düngung, ermöglichen das Rohproteinpotenzial und damit die Grobfutterleistung besser auszuschöpfen und gewährleisten eine optimale Nährstoffverteilung im Betrieb. Bei Problemen mit Nährstoffüberschüssen in spezialisierten Milchvieh-/Futterbaubetrieben ist in erster Linie ein optimiertes Wirtschaftsdüngermanagement zu verfolgen (Taube, 2014a). Insbesondere im Grünland gilt es höhere Effizienzen zu erreichen (Köhler et al., 2014a; Köhler et al., 2014). Die Auseinandersetzung mit dem Produktionsvermögen des Grünlands und den Stoffflüssen im Milchvieh-/Futterbaubetrieb führt grundsätzlich zu einer höheren Wertschätzung der Ressource Grünland und fördert somit eine nachhaltige Nutzung. Die Betrachtung ist nach Möglichkeit bis zu den erzeugten Produkten Milch, Fleisch und Leder zu erweitern. Dies beinhaltet auch die Minimierung der Verluste an Menge und Qualität von der Fläche bis zum Trog und den effizienten Einsatz der Grobfutter in der Ration (Köhler et al., 2014a). Klare Begrifflichkeiten und Definitionen zu den verschiedenen Ebenen des Flächenertrags sollten Anwendung finden (Köhler et al., 2014).

2.6 Zusammenfassung

2.6.1 Zusammenfassung

Von intensiv geführten bayerischen Grünlandbeständen wurde auf Betriebs- und Schlagebene eine umfassende Ertragsanalyse durchgeführt. Dabei weisen die Ernteerträge abhängig von Standort, Bewirtschaftung, Jahr und Schlag eine hohe Variabilität auf. Als wesentliche ertragsrelevante Faktoren wurden Schnittintensität und N-Düngung ermittelt, sodass mit angepassten Bewirtschaftungsmaßnahmen das Leistungspotenzial des Grünlandes zu steuern und somit zu optimieren ist. Über eine Ertragssimulation wurde mit Hilfe des Modells FOPROQ eine weitgehend hohe

Ertragsstabilität über einen neunjährigen Zeitraum von den Grünlandbeständen ermittelt. Dieses Ertragsmodell konnte anhand der Praxisdaten sehr gut an die bayerischen Standortbedingungen angepasst werden und eignet sich somit für regionale Prognosen von intensiv geführten Grünlandbeständen. Jedoch erfordert die Erhebung schlaggenauer Ertragsinformationen den Einsatz technischer Lösungen in der Praxis. Um von Intensivgrünlandssystemen eine hohe Produktivität und Qualität zu erzielen, müssen Maßnahmen zur besseren Etablierung des DW wie z. B. Übersaaten in den Grünlandbeständen ergriffen werden. Insbesondere für eine höhere Energie- und Rohproteinversorgung vom Grobfutter sind im Grünlandmanagement noch Reserven vorhanden. Die Nährstoffsalden vom Grünland zeigen überwiegend annehmbare N-Überschüsse, aber die hohen P- und K-Bodengehalte der Grünlandböden deuten auf einen Verlauf mit hohen P- und K-Überschüssen hin. Daraus folgt, dass ein effizientes Nährstoffmanagement unter Beachtung einzelbetrieblicher Optimierung und umweltrelevanter Kriterien nur mit einem konsequenten Messen von Menge und Qualität zu erreichen ist. Die Ergebnisse der Ertrags- und Qualitätsanalyse untermauern den Stellenwert des Grünlands als wichtigen Energie- und Eiweißlieferant für Milchvieh-/Futterbaubetriebe und leisten einen positiven Beitrag für eine nachhaltige Nutzung der Ressource Grünland.

2.6.2 Summary

A comprehensive yield analysis of intensively managed Bavarian grasslands has been conducted at a farm and field level. The crop yields show a high degree of variability, depending on location, cultivation system, year and field. Mowing frequency and N-fertilisation have been identified as essential factors related to the yield, with the result that the performance potential of the grasslands can be controlled with adapted cultivation measures and thus optimised. With the help of the FOPROQ model, a largely high yield stability over a nine-year period was determined for the grasslands, using a yield simulation. It was possible to adapt this yield model to the local Bavarian conditions very well, using real data, and it is thus suitable for regional prognoses for intensively managed grasslands. However, the collection of field-specific yield information necessitates the use of technical solutions in practice. In order to achieve a high productivity and quality from intensive grassland systems, measures for the better establishment of perennial ryegrass, e.g. overseeding, in the grasslands must be taken. There are still reserves available in grassland management for a higher

supply of energy and crude protein from the roughage, in particular. The nutrient balances from the grassland predominantly show acceptable N-surpluses, but the high P and K content in the soil of the grasslands indicates a development with high P- and K-surpluses. As a result, an efficient nutrient management, taking the optimisation of individual farms and environmental criteria into account, can only be achieved with a consistent measurement of quantity and quality. The results of the yield and quality analysis underpin the significance of grassland as an important provider of energy and protein for dairy/fodder crop farms and make a positive contribution to a sustainable use of the resource of grassland.

2.7 Literatur

- AIGNER, A. (2010). Ertrags- und Anbauentwicklung bei Eiweißpflanzen in Bayern und Deutschland. 61. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2010, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 87–89, <http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/vi ewdownload/526-saatuechtersagung-2010/4233-ertrags-und-anbauentwicklung-bei-eiweisspflanzen-in-bayern-und-deutschland.html>, [Datum: 05.02.2015].
- BMEL [BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT] (2015). Entwurf einer Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen (DüV). 130 Seiten, http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Service/Rechtsgrundlagen/Entwuerfe/EntwurfDuengeverordnung.pdf?__blob=publicationFile. [Stand: 16.12.2015].
- BMELV [BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ] (2012). Eiweißpflanzenstrategie des BMELV. Kapitel 3.2.2, S. 4, Stand: 27.11.2012, http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/EiweisspflanzenstrategieBMELV.pdf?__blob=publicationFile, [Datum: 30.03.2016].
- BMJ [BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ UND VERBRAUCHERSCHUTZ] (2014). Gesetzestext Düngeverordnung (DüV) – Ausfertigungsdatum: 10.01.2006. BMJ in Zusammenarbeit mit der juris GmbH (Hrsg.). http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_v/gesamt.pdf, [Datum: 21.02.2014].
- DAFA [DEUTSCHE AGRARFORSCHUNGSALLIANZ] (2015). Fachforum Grünland – Grünland innovativ nutzen und Ressourcen schützen. http://www.dafa.de/fileadmin/dam_uploads/images/Fachforen/FF_Gruenland/dafa-ff-gruenland_broschuere-dt-2016-01-20-web.pdf, [Datum: 30.03.2016].
- DESTATIS [STATISTISCHES BUNDESAMT] (2015). Statistisches Jahrbuch 2015. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/LandForstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile, [Datum: 29.03.2016].
- DE VRIES, M., DEBRUYNE, L., & AARTS, F. (2013). Sustainability of dairy farming and the implementation of EU environmental directives in the northwest of Europa. <http://edepot.wur.nl/274184>, [Datum: 02.04.2014].

- DIEPOLDER, M., & RASCHBACHER, S. (2011). Effekte unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensität – Güllegaben und Nutzungshäufigkeit – bei einem Standort im Allgäuer Alpenvorland. In: Gülle 11 – Gülle und Gärrestdüngung auf Grünland. Tagungsband Internationale Tagung 17./18.10.2011, Kloster Reute. Elsässer, M., Diepolder, M., Huguenin-Elie, O., Pötsch, E., Nußbaum, H., und Messner, J., Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft und Fischerei (LAZBW) (Hrsg.), Aulendorf, 81–85.
- DIEPOLDER, M., & RASCHBACHER, S. (2013). Phosphor im Grünland – Ergebnisse vom Ertrags- und Nährstoffmonitoring auf bayerischen Grünlandflächen und von Düngungsversuchen. In: Phosphor im Grünlandbetrieb – Bedeutung und aktuelle Problemlberichte. 18. Alpenländisches Expertenforum, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 17–24, <http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/viewdownload/856-expertenforum-2013/16498-phosphor-im-gruenland-ergebnisse-vom-ertrags-und-naehrstoffmonitoring-auf-bayerischen-gruenlandflaechen-und-von-duengungsversuchen.html>, [Datum: 2.04.2014].
- DIEPOLDER, M., RASCHBACHER, S., BRANDHUBER, R., & KREUTER, T. (2009). Auswirkung mechanischer Bodenbelastung auf Dauergrünland – Neue Versuchsergebnisse. Fachinformation aus der Landwirtschaftsverwaltung in Bayern „Schule und Beratung“, Heft 8–9/09, III 27–33, https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/bodenbelastung_gruenland.pdf.
- DIEPOLDER, M., RASCHBACHER, S., HEINZ, S., & KUHN, G. (2013). Erträge, Nährstoffgehalte und Pflanzenbestände bayerischer Grünlandflächen. In: Agrarforschung hat Zukunft – Wissenschaftstagung der LfL. LfL-Schriftenreihe 04/2013, Freising, 185–194.
- DIEPOLDER, M., & SCHRÖPEL, R. (2002). Ergebnisse eines Stickstoffsteigerungsversuches auf einer weidelgrasreichen Wiese im Allgäuer Alpenvorland. Fachinformation aus der Landwirtschaftsverwaltung in Bayern „Schule und Beratung“, Heft 04/2002, Landshut, Sonderdruck, IV-3–7, <http://www.lfl.bayern.de/iab/gruenland/024501/>.
- DLG [DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT] (2000). Die neue Betriebszweiganalyse. Arbeiten der DLG, Band 197, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 117 Seiten.

- DLG (2006). Schätzung der Futteraufnahme bei der Milchkuh. DLG-Arbeitskreis Futter und Fütterung, Bundesarbeitskreis der Fütterungsreferenten in der DLG (Hrsg.). DLG-Information 01/2006, 29 Seiten. http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/fachinfos/futtermittel/futteraufnahme_milchkuh06.pdf, Datum: 20.05.2016.
- DLG (2011). Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. DLG, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 416 Seiten.
- DLG (2014). Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Arbeiten der DLG, Band 199, 2. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 120 Seiten.
- DORFNER, G. (2014). Die Milcherzeugung zwischen freiem Markt und neuen Begrenzungen. 41. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 09./10.04.2014, 1–6. <http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/finish/873viehwirtschaftstagung-2014/16650-viehwirtschaftstagung-2014-tagungsband-gesamt.html>, [Datum: 12.12.2014].
- DORFNER, G., & HOFMANN, G. (2014). Milchreport Bayern 2014 – Ergebnisse der Betriebszweigabrechnung Milchproduktion 2013/2014. LfL-Information 08/2015. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/milchreport-bayern-2014_lfl-information.pdf, [Datum: 20.05.2016].
- EDMUNDS, B., SPIEKERS, H., SÜDEKUM, K., NUSSBAUM, H., SCHWARZ, F. J., & BENNETT, R. (2013). Effect of extent and rate of wilting on nitrogen components of grass silages. Grass and Forage Science, 69, 140–152. doi:10.1111/gfs.12013.
- ELSÄßER, M., HERRMANN, K., JILG, T., HUMMLER, T., & OENEMA, J. (2013). Phosphorbilanzen und Phosphoreffizienz von Milchviehbetrieben in Nordwesteuropa. In: Phosphor im Grünlandbetrieb – Bedeutung und aktuelle Problembereiche. 18. Alpenländisches Expertenforum, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 9–16, <http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/viweownload/856-expertenforum-2013/16499-phosphorbilanzen-und-phosphoreffizienz-von-milchviehbetrieben-in-nordwesteuropa.html>, [Datum: 02.04.2014].
- FRIENDLY, M. (2005). SAS Macro Programs for Statistical Graphics: boxplots: <http://www.datavis.ca/sasmac/boxplot.html>, Version: 09.01.2005.
- GfE [AUSSCHUSS FÜR BEDARFSNORMEN DER GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE] (1995). Zur Energiebewertung beim Wiederkäuer. Proc. Soc. Nutr. Physiol. 4, 121–123.
- GfE (2001). Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 33–56.

- GfE (2008). New equations for predicting metabolisable energy of grass and maize products for ruminant. Proceedings of the Society of nutrition physiology, Band 17, 62. Tagung Göttingen, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 191–198.
- GREINER, B., HERTWIG, F., HOCHBERG, H., PRIEBE, R., RIEHL, G., & SCHUPPENIES, R. (2014). Auswirkungen einer unterlassenen Phosphor- und Kaliumdüngung – Ergebnisse aus sechzehnjährigen Grünlanddüngungsversuchen. In: Multifunktionalität des Dauergrünlandes erhalten und nutzen. 58. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau (AGGF), Arnstadt, 107–110, https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2014_greiner_et_al.pdf
- GREINER, B., SCHUPPENIES, R., HERTWIG, F., HOCHBERG, H., & RIEHL, G. (2010). Ergebnisse aus zwölfjährigen Phosphor- und Kaliumdüngungsversuchen auf Grünland. Kongressband 2010 Kiel, VDLUFA-Schriftenreihe Band 66/2010, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 157–168, www.vdlufa.de/kongress2010/Kongressband2010.pdf.
- HARTMANN, S., HOCHBERG, H., RIEHL, G., & WURTH, W. (2011). Measuring the loss of dry matter yield effected by rough-stalked meadow-grass (*Poa trivialis*). In: Grassland farming and land management systems in mountainous regions. Proceedings of the 16th Symposium of the European Grassland Federation, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, Austria, 241–243, www.europeangrassland.org/fileadmin/media/EGF2011.pdf.
- HEIßENHUBER, A. (2010). Die Konkurrenz um knappe Flächen – Gründe, Entwicklungen, Auswirkungen. Knappe Flächen optimal nutzen – Futter und Substratwirtschaft optimieren. LfL-Jahrestagung, LfL Schriftenreihe 09/2010, Freising, 9–13. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_40227.pdf.
- HEIßENHUBER, A., & SCHÄTZL, R. (2013). Heimische Eiweißfuttermittel – Chancen und Grenzen. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 27–39. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2013_heißenhuber_schätzl.pdf.
- HERRMANN, K., ELSÄßER, M., & JILG, T. (2011). Nachhaltige Milchproduktion in Baden-Württemberg – eine regionale Bewertung im Rahmen des Projektes DAIRYMAN. Arbeitspaket 1. Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg (LAZBW) (Hrsg.), Aulendorf. http://www.lazbw.de/pb/Lde/Startseite/Rinder_und_Schafhaltung/Versuche_und_Projekte/, [Datum: 01.04.2014].

- HERRMANN, A., KELM, M., KORNHER, A., & TAUBE, F. (2005). Performance of grassland under different cutting regimes as affected by sward composition, nitrogen input, soil conditions and weather – a simulation study. *Europ. J. Agronomy* 22, 141–158. doi:10.1016/j.eja.2004.02.002.
- HERRMANN, A., TECHOW, A., KLUß, C., TAUBE, F., BERENDONK, C., DIEPOLDER, M., ELSÄSSER, M., GREINER, B., & NEFF, R. (2014). Mehr Eiweiß vom Grünland. *DLG-Mitteilungen* 4/2014, 76–79.
- HØGH-JENSEN, H., LOGES, R., JØRGENSEN, F. V., VINTHER, F. P., & JENSEN, E. S. (2004). A empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *J. agsy* 82, 181–194. doi:10.1016/j.agry.2003.12.003.
- KLAPP, E., BOEKER, P., KÖNIG, F., & STÄHLIN, A. (1953). Wertzahlen der Grünlandpflanzen. *Das Grünland* 2, 38–40.
- KLAPP, E., & STÄHLIN, A. (1936). Standorte, Pflanzengesellschaften und Leistung des Grünlandes, Ulmer-Verlag, Stuttgart, 122 Seiten.
- KÖHLER, B., DIEPOLDER, M., THURNER, S., & SPIEKERS, H. (2013). Eiweißbereitstellung vom Grünland auf Betriebsebene. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 62–69. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/aggf_2013_koehler_et_al.pdf.
- KÖHLER, B., & KOLBE, H. (2007). Programm BEFU – Teil Ökologischer Landbau. Verfahrensbeschreibung und PC-Anleitung zu Methoden der Bilanzierung und Düngungsbemessung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Dresden. Stand Dezember 2007. <http://orgprints.org/13632/>.
- KÖHLER, B., SPIEKERS, H., DIEPOLDER, M., & DEMMEL, M. (2009). Effiziente Futterwirtschaft und Nährstoffflüsse in Futterbaubetrieben. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau*, Band 10, 53. Jahrestagung der AGGF, Kleve 2009, 65–68. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/effiziente_futterwirtschaft_betriebsebene_30.10.13.pdf.
- KÖHLER, B., SPIEKERS, H., DIEPOLDER, M., & THURNER, S. (2011). Ertragserfassung als Voraussetzung für eine effiziente Grünlandnutzung. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau*, 55. Jahrestagung der AGGF 2011, Oldenburg, Band 12, 92–98. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/aggf_2011_koehler_et_al.pdf.
- KÖHLER, B., SÜDEKUM, K.-H., SPIEKERS, H., & TAUBE, F. (2014). Quantitative Erfassung von Masse- und Stoffströmen im Futterbaubetrieb. *Kongressband 2014 Hohenheim*, VDLUFA-Schriftenreihe 70, 411–415. www.vdlufa.de/download/KB2014_web_gross.pdf.

- KÖHLER, B., THURNER, S., DIEPOLDER, M., & SPIEKERS, H. (2014A). Effiziente Futterwirtschaft und Eiweißbereitstellung in Futterbaubetrieben. LfL-Schriftenreihe 05/2014, Freising, 141 Seiten. <http://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/082872/>.
- KORNHER, A., NYMAN, P., & TAUBE, F. (1991). Ein ComputermodeLL zur Berechnung der Qualität und Qualitätsveränderung von gräserdominierten Grünlandaufwüchsen aus Witterungsdaten. Das Wirtschaftseigene Futter 37, Heft 1+2, 232–248.
- KUHN, G., HEINZ, S., & MAYER, F. (2011). Grünlandmonitoring Bayern – Ersterhebung der Vegetation 2002–2008. LfL-Schriftenreihe 03/2011, Freising, 161 Seiten, www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_41955.pdf
- LAIDIG, F., PIEPHO, H.-P., DROBEK, T., & MEYER, U. (2014). Genetic and non-genetic long-term trends of 12 different crops in German official variety performance trials and on-farm yield trends. Theor Appl Genet (2014) 127, 2599–2617. doi: 10.1007/s00122-014-2402-z.
- LF L [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT] (2011). Versuchsergebnisse der Landessortenversuche Luzerne. <http://www.hortigate.de/Apps/WebObjects/ISIP.woa/vb/bericht?nr=62814>, [Datum: 05.02.2015].
- LF L (2014). Versuchsergebnisse aus Bayern – Sojabohne 2010–2014. <http://www.lfl.bayern.de/ipz/oelfruechte/027791/index.php>, [Datum: 05.02.2015]
- LF L (2016). LfL-Arbeitsschwerpunkt Eiweißstrategie. <https://www.lfl.bayern.de/schwerpunkte/eiweisstrategie/121662/index.php>, [Datum: 20.06.2016].
- OENEMA, J. (2013). Transitions in nutrient management on commercial pilot farms in the Netherlands. PhD Thesis Wageningen. 199 pp. <http://edepot.wur.nl/279713>.
- PETERSEN-FRIEDRICH, E. C., KORNHER, A., & TAUBE, F. (1989). Ertragsbildung unterschiedlicher Sortentypen des Deutschen Weidelgrases im Vegetationsablauf in Abhängigkeit vom Nutzungsregime. 2. Mitteilung: Modellberechnungen. Das Wirtschaftseigene Futter 35, Heft 3, 289–300.
- RANDBY, A. T., WEISBJERG, M. R., NØRGAARD, P., & HERINSTAD, B. (2012). Feed intake and milk yield responses during early lactation of cows offered grass silages harvested at early maturity stages. XVI. International Silage Conference Hämeenlinna Finland, Proceedings, 148–149.
- ROßBERG, D., MICHEL, V., GRAF, R., & NEUKAMPF, R. (2007). Definition von Boden-Klima-Räume für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 59, 155–161. www.journal-kulturrpflanzen.de/artikel.dll?AID=351868.

- ROTZ, C. A., OENEMA, J., & VAN KEULEN, H. (2006). Whole Farm management to reduce nutrient losses from dairy farms: A simulation study. *Applied engineering in agriculture* 22(5), 773–784. doi:10.13031/2013.21992.
- ROTZ, C. A., TAUBE, F., RUSSELLE, M. P., OENEMA, J., SANDERSON, M. A., & WACHENDORF, M. (2005). Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Sci.* 45(6), 2139–2159. doi:10.2135/cropsci2004.0523.
- SALAMA, H., LÖSCHE, M., HERRMANN, A., GIERUS, M., LOGES, R., FEUERSTEIN, U., INGWERSEN, B., STELLING, D., LUESINK, W., & TAUBE, F. (2012). Limited genotype- and ploidy-related variation in the nutritive value of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Acta Agr Scan Sect B – S P.* 62(1), 23–34. doi:10.1080/09064710.2011.563750.
- SCHÄTZL, R. (2013). Futtereiweiß aus heimischen Quellen. Fachinformation aus der Landwirtschaftsverwaltung in Bayern „Schule und Beratung“, Heft 08/2013, Landshut, 43–46.
- SCHMEER, M., LOGES, R., DITTEK, K., SENBAYRAM, M., HORN, R., & TAUBE, F. (2014). Legume-based forage production systems reduce nitrous oxide emissions. *Soil Tillage Res.* 143 (2014), 17–25. doi: 10.1016/j.still.2014.05.001.
- SCHUBA, J., & SÜDEKUM, K. (2012). Pansengeschützte Aminosäuren in der Milchkuhfütterung unter besonderer Berücksichtigung von Methionin und Lysin. *Übersichten Tierernährung* 40, Heft 2, DLG Verlag, Frankfurt a.M., 113–149.
- SMIT, H. J., METZGER, M. J., & EWERT, F. (2008). Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agrc. Sys.* 98, 208–219. doi:10.1016/j.agry.2008.07.004.
- SPIEKERS, H. (2008). Ansprüche der Milchviehhaltung an das Grundfutter vom Grünland. In: *Effiziente Grünlandbewirtschaftung – Deutscher Grünlandtag und 22. Allgäuer Grünlandtag. LfL-Schriftenreihe 07/2008, 41–48.* http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_313_49.pdf, [Datum: 20.05.2016].
- SPIEKERS, H. (2008A). Rentable Milchproduktion bei steigenden Futterkosten. In *Milchproduktion in Bayern. Ein Betriebszweig steht vor Herausforderungen.* Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), München, Nr. 30/2008, 29–36.
- SPIEKERS, H. (2012). Milch und Fleisch effizient erzeugen. In: *Perspektiven einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Tierernährung*, 50. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung (BAT) e. V., Tagungsband, Freising, 53–58. http://lte.wzw.tum.de/fileadmin/BAT/50_BAT-Tagung_2012_Tagungsband.pdf.

- SPIEKERS, H., ETTLE, T., PRIES, M., & GRÜNEWALD, K.-H. (2012). Kalkulation der Nährstoffausscheidungen beim Rind. VDLUFA Kongressband 2012 Passau, VDLUFA-Schriftenreihe Band 68/2012, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 710–717. www.vdlufa.de/download/KB2012_print-14-12-12.pdf.
- SPIEKERS, H., & KÖHLER, B. (2010). Mehr Netto vom Brutto – Effizienz der Futterwirtschaft verbessern! Trendreport Spitzenbetriebe Milchviehhaltung. DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 91–98.
- SPIEKERS, H., NUSSBAUM, H. J., & POTTHAST, V. (2009). Erfolgreiche Milchviehfütterung. 5. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 576 Seiten.
- STEINGAß, H., & SÜDEKUM, K.-H. (2013). Proteinbewertung beim Wiederkäuer – Grundlagen, analytische Entwicklungen und Perspektiven. Übersichten zur Tierernährung 41 Heft 1, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 51–73.
- STMELF [BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN] (2012). Bayerischer Agrarbericht 2012. <http://www.agrarbericht-2012.bayern.de/tabellen-karten/files/k18.pdf>, [Datum: 18.02.2014].
- STOCKINGER, B., & SCHÄTZL, R. (2012). Strategien zur Erhöhung des Anteils heimischer Eiweißfuttermittel in der Nutztierfütterung. VDLUFA Kongressband 2012 Passau, VDLUFA-Schriftenreihe Band 68/2012, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 665–672. www.vdlufa.de/download/KB2012_print-14-12-12.pdf.
- SUNDRUM, A. (2012). Optimierung der Nährstoffeffizienz in der Milchviehhaltung. VDLUFA Kongressband 2012 Passau, VDLUFA-Schriftenreihe 68, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 122–129. www.vdlufa.de/download/KB2012_print-14-12-12.pdf.
- TAUBE, F. (2010). Effiziente Ressourcennutzung – Futterbausysteme für die Milcherzeugung. In: 23. Hülsenberger Gespräche 2010 Lübeck, Schriftenreihe der Schaumann Stiftung, Hamburg, 176–183.
- TAUBE, F. (2014). Nährstoffflüsse im Milchvieh-Futterbaubetrieb – Optimierungspotenziale im Hinblick auf eine novellierte Düngeverordnung. In: 5. Agrarwissenschaftliches Symposium des Hans-Eisenmann-Zentrums, Tagungsband, Freising, 11–13.
- TAUBE, F. (2014A). Nährstoffflüsse im Milch-Futterbaubetrieb – Optimierungspotenziale im Hinblick auf eine novellierte DüV. „5. Agrarwissenschaftliches Symposium“, Hans-Eisenmann-Zentrum, Vortrag, Freising, 25.09.2014.
- TAUBE, F., GIERUS, M., HERRMANN, A., LOGES, R., & SCHÖNBACH, P. (2014). Grassland and globalization – challenges for northwest European grass and forage research. Grass and Forage Science 69, 2–16. doi:10.1111/gfs.12043.

- TAUBE, F., HERRMANN, A., GIERUS, M., LOGES, R., & SCHÖNBACH, P. (2011). Nachhaltige Intensivierung der Futterproduktion zur Milcherzeugung. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 12, 55. Jahrestagung der AGGF 2011 Oldenburg, 13–29. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2011_taub_e_et_al.pdf.
- THURNER, S., FRÖHNER, A., KÖHLER, B., & DEMMEL, M. (2011). Online measurement of yield and dry matter content of wilted grass with two forage harvesters – comparison with and verification of reference measurements. Proceedings Precision Agriculture 2011, Ed. J.V. Stafford, 8th European conference on Precision Agriculture 2011, Prague, Czech Republic, 628–637.
- VDLUFA [VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER FORSCHUNGS- UND UNTERSUCHUNGSANSTALTEN] (1976). Methodenbuch Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln 3. 1, 3. Auflage, <http://www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php/de/mb-iii-futtermittel>.
- VDLUFA (2015). Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung – Anpassung der Richtwerte für die Gehaltsklassen ist geboten und notwendig. VDLUFA Positionspapier, 9 Seiten. http://vdlufa.de/joomla/Dokumente/Positionspapiere/2015_Phosphord%C3%BCngung_nach_Bodenuntersuchung.pdf.
- WBA [WISSENSCHAFTLICHE BEIRÄTE FÜR AGRARPOLITIK] & WBD [WISSENSCHAFTLICHE BEIRÄTE FÜR DÜNGUNGSFRAGEN] (2013). Novellierung der Düngeverordnung: Nährstoffüberschüsse wirksam begrenzen. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 219, 12 Seiten. doi: <http://dx.doi.org/10.12767/buel.v0i219.28.g77>.
- WEIß, D., SCHNEIDER, S., BELLOF, G., DORFNER, G., SCHÄUFELE, R., AUERSWALD, R., & THOMET, P. (2008). Effizienz im Milchviehbetrieb. Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung in Fulda, 09/10.04.2008, Tagungsunterlagen, 101–104.
- WENDLAND, M., DIEPOLDER, M., & CAPRIEL, P. (2012). Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland – Gelbes Heft. 10. Unveränderte Auflage 2012, LfL, Freising, LfL-Information, 97 Seiten. www.lfl.bayern.de/iab/duengung/031924/.

Dank

Ich bedanke mich bei Dr. Mario Hasler von der Christian-Albrechts-Universität in Kiel für die Unterstützung bei der statistischen Analyse. Ebenso gilt mein Dank dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Projektförderung und der H. Wilhelm Schaumann Stiftung für die finanzielle Unterstützung in der Form eines Abschluss-Stipendiums.

Kapitel 3

Dry matter losses of grass, lucerne and maize silages in bunker silos

Brigitte Köhler¹, Michael Diepolder², Johannes Ostertag¹, Stefan Thurner³ & Hubert Spiekers¹

¹Bavarian State Research Center for Agriculture, Institute for Animal Nutrition and Feed Management, Prof.-Dürnwächter-Platz 3, D-85586 Poing-Grub, Germany

²Bavarian State Research Center for Agriculture, Institute for Agricultural Ecology, Organic Farming and Soil Protection, Lange Point 12, D-85354 Freising, Germany

³Bavarian State Research Center for Agriculture, Institute for Agricultural Engineering and Animal Husbandry, Vöttinger Str. 36, D-85354 Freising, Germany

Published in **Agricultural and Food Science**, 2013, 22(1): 145–150; DOI: <https://doi.org/10.23986/afsci.6715>

3 Dry matter losses of grass, lucerne and maize silages in bunker silos

3.1 Abstract

An efficient feed management is important for a sustainable and economic agricultural production. One of the main points for improving the efficiency is the reduction of feed losses. In the present investigation the dry matter (DM) losses of grass, lucerne and maize silages in farm scaled bunker silos were analysed. The method of determining DM losses was the total-in versus total-out DM mass flow of the silos, including the determination of DM content and other silage parameters via manual sampling. The results taken from 48 silos showed on average for all investigated crops 9 – 12% of DM losses. Density and feed out rate showed a negative correlation to DM losses in maize silages. According to the applied method for determining DM losses on farm scale, a guideline of 8% can be suggested for maximum DM losses in bunker silos for grass and maize silages. The described method seems to be applicable for improving the feed management by using largely automated measurements on the harvest and feeding side.

3.2 Introduction

Agricultural production faces worldwide challenges due to climate change, population growth and loss of agricultural land. Therefore, the efficiency optimisation in feed management is highly relevant for a sustainable and economic feed production (Humphreys et al. 2009). One major possibility to improve the efficiency is the reduction of feed losses in the silos. An efficient silage system for feed production should ensure a low level of losses and a high silage quality. In respect of the losses at storage, investigations indicated DM losses on average, established during ensiling and storage, of approximately 16% (Watson and Nash 1960) and 32% (Bastiman and Altman 1985), respectively. However, only 7% of energy losses during the ensiling process are supposed to be unavoidable (Zimmer 1980). Because those results were obtained from measurements in bench scale silos, transferability of these test results to practice is questionable. Mayne and Gordon (1986) reported 6% DM losses of wilted grass silages in silos of 100 t capacity. However, aerobic deterioration and reheating as discussed by Spiekers et al. (2009) as a major source of DM losses has not been

taken into account. Therefore, concerning DM losses of farm scale bunker silos, reliable values are still not available. For this reason, in the present study DM losses at storage for 48 silos were examined. The silos were investigated by the total-in versus total-out procedure to obtain reliable information about acceptable dimensions of DM losses for farm scale bunker silos. The aim of the study was to define promising starting points in order to improve the efficiency in feed management and furthermore, to develop a useful tool to control DM losses in farm scale bunker silos.

3.3 Material and methods

The mass flow of silages was examined on one organic and two conventional farms. These farms belong to the Bavarian State Research Center for Agriculture with a total livestock of between 70 to 190 dairy cows. The long-term mean precipitation ranges from 800 – 1100 mm and the annual mean temperature from 7 – 8 °C, respectively. Data were collected over a period of four years from 2008 to 2011. The DM losses were determined from 26 grass, 4 lucerne and 18 maize silos. The feed sources of the farms involved included permanent grassland, maize (all farms) and further forage crops such as grass-clover mixture, lucerne or annual ryegrass on two farms. Permanent grassland was dominated by grass species (approximately 80 % contribution to total DM), in particular by *Alopecurus pratensis*. Only the organic farm had a proportion of 40 – 50 % of grass-red clover-mixture, which is analysed with the grass silos. The fertilisation level ranged from 100 – 290 kg N ha⁻¹ for grassland and from 150 – 200 kg N ha⁻¹ for maize. On all farms five cuttings per year from permanent grassland are the usual practice. In most cases, the wilting period did not exceed 24 hours for grass and 48 hours for lucerne. Annual yields were on average 6 – 10 t DM ha⁻¹ for grass, 8 t DM ha⁻¹ for lucerne and 10 – 17 t DM ha⁻¹ for maize, respectively. The good practice of ensiling on the farms was in accordance with the guidelines recommended by the German research and advisory group feed preservation (DLG 2011). At harvest time the ensiled materials were sampled and analysed for their characteristics (Table 3.1).

All crops were harvested with a self-propelled forage harvester, cut to a theoretical chopping length of 20 – 50 mm for grass, grass-clover and lucerne or 4 – 9 mm for maize. Silage additives were used for lucerne, partly for grass, but not for maize. For

lucerne, a chemical additive was applied consisting of a mixture of sodium nitrate and hexamethylenetetramine (2 l/t FM). On the organic farm, molasses (30 l/t) and homofermentative lactic acid bacteria (*L. plantarum*, 3×10^5 cfu/t) were added to grass and grass-clover mixture. On one conventional farm, a mixture of *L. plantarum*, *L. rhamnosus*, *P. pentosaceus*, *L. buchneri* and *L. brevis* was used for grass. On the second conventional farm no silage additives were applied. The grass and maize silages were conserved in side walled bunker silos using silo pit foils, underlay films, silage films and protective covers and weighed down with gravel bags. The bunker silos capacities ranged from 170 m³ to 690 m³. The harvested mass per hour did not exceed the fourfold weight of vehicles used for compaction. All silos were kept closed for at least six weeks.

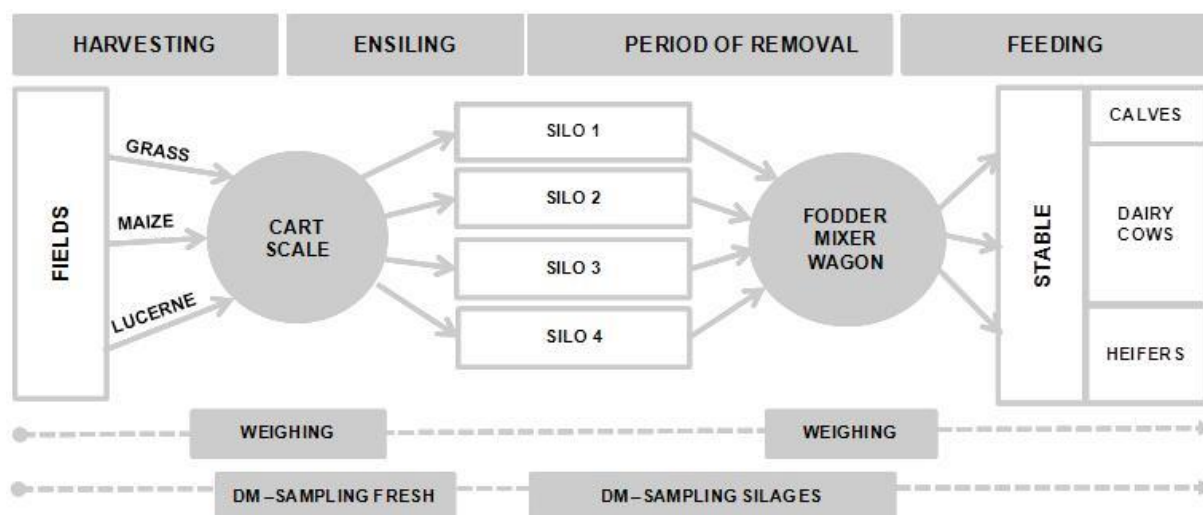


Figure 3.1: Principle of measurements used for the total-in vs. total-out method

The total-in versus total-out procedure is defined as the method of determination for the DM losses in the farm scale bunker silos. Figure 3.1 shows the principle behind the measurements from harvesting to feeding. During the harvest, every wagonload was weighed on a 40 t cart scale (measurement accuracy ± 10 kg). In general, four samples per ha were retrieved from the harvested ensiling materials. The samples were taken from each wagonload after unloading with a random sampling of 5 – 10 single samples. Pooled samples were used for analysing DM contents and crude nutrients. Results of the crude nutrient content determinations were transferred to the respective silos. The analysis of sugars was performed by NIRS. The buffering capacity reveals the quantity of lactic acid in g, which had to be added to lower the pH of 1 kg DM to 4.0.

During the period of removal (three months on average), all feedstuffs were taken out of the silos by a fodder mixer wagon equipped with a digital weighing system. Therefore each feed portion was weighed separately. The DM content of the silages was determined weekly, using a core drill for sampling (Pioneer™-drilling jig; drilling depth 40 cm). Three samples were taken at different heights from the face of the silos. The DM samples were dried in a cabinet dryer and subsequently, corrected for volatiles (Weißbach and Kuhla 1995). The applied equations for grass/lucerne were $DM_{corrected} (\%) = 2.08 + 0.975 * DM_{uncorrected} (\%)$ and for maize $DM_{corrected} (\%) = 2.22 + 0.96 * DM_{uncorrected} (\%)$. Silo controllings (as described by Spiekers et al. 2009) were undertaken once, when half of the silo had been removed. As parameters of the silages the fermentation quality, DM density and temperature were analysed (Table 3.2). The mean density in the silos was calculated using three measurements (top, middle, bottom) at the silo face, using a special core drill ($r = 4.60$ cm; drilling depth approximately 20 cm). Temperatures were measured at six points at a depth of 40 cm. The feed out rate from each silo was calculated from the feed removal on a weekly basis.

The determination of DM losses was calculated by subtracting the removed DM masses from the ensiled masses, summing up all single values. Spoiled materials, which were not used for feeding, were regarded as losses. Evaluation of all data was carried out by statistical analysis (SAS 9.2). The normal distribution was tested, correlations were calculated with the Pearson correlation coefficient and for boxplots a SAS macro program (Friendly 2005) was used. The correlations between silage density and feed out rate to DM losses were analysed.

3.4 Results and discussion

With reference to the nutrient values and fermentation coefficients, we observed a wide range of the investigated ensiled materials (Table 3.1). However, on average a good ensilability was achieved according to Weißbach et al. (1974). Nevertheless, the wide range of the material gives a better transferability of the results to practical conditions. In accordance with the predicted ensilability, good fermentation qualities could be obtained (Table 3.2). Major differences were found for grass silages. In 7 of 19 grass silages butyric acid was analysed and is a sign for an unfavourable ensiling process.

Table 3.1: Chemical composition, feeding value and fermentation coefficients of three different types of ensiled material

		Grass (n=26)		Maize (n=18)		Lucerne (n=4)	
	unit	mean	min-max	mean	min-max	mean	min-max
DM	g kg ⁻¹ DM	316	229-503	356	295-451	316	222-385
CP ¹	g kg ⁻¹ DM	176	137-237	72	61-79	199	152-225
ADFom ²	g kg ⁻¹ DM	300	213-338	250	189-294	369	356-382
NEL	MJ kg ⁻¹ DM	5.9	5.5-6.7	6.5	6.2-7.0	5.7	5.5-5.9
FC ³	-	42	33-55	54	44-69	36	26-45

¹CP: crude protein, ²ADFom: acid detergent fibre, without residual crude ash; ³FC: fermentation coefficient = DM % + 8 * (sugar/buffering capacity) according to Weißbach et al. 1974.

Table 3.2: Parameters for preservation quality and feed management for the three different types of silage material

Parameter	unit	Grass			Maize			Lucerne		
		n	mean	min-max	n	mean	min-max	n	mean	min-max
Dry matter (DM)	g kg ⁻¹	22	293	223-419	16	356	286-441	4	352	268-409
Lactic acid	g kg ⁻¹ DM	19	55	23-129	14	48	26-69	4	72	46-94
Acetic acid	g kg ⁻¹ DM	19	22	7-50	14	17	7-38	4	30	18-50
Propionic acid ¹	g kg ⁻¹ DM	5	3	2-5	0	-	-	2	4	2-5
Butyric acid ¹	g kg ⁻¹ DM	7	10	3-23	0	-	-	2	8	2-14
pH	--	19	4.4	3.8-4.8	14	3.9	3.7-4.3	4	4.7	4.4-5.3
Density	kg m ⁻³ DM	22	194	155-278	16	246	215-299	4	244	203-288
Feed out rate	m week ⁻¹	19	2.1	1.1-3.4	18	2.1	1.0-3.6	4	1.9	1.3-2.4
Temperature	°C	22	-	3-37	16	-	2-23	4	-	5-23

¹Propionic and butyric acid: n = number of analysis which exceeded the limit of detection

By the measurement of the temperature, a reheating was determined in 2 maize and 5 grass silages in the upper layers of the evaluated silos. The wide range of the compaction quality of the silages was in agreement with findings of Richter et al. (2009). In some cases compaction was lower than recommended for maize silages, primarily (DLG 2011). Altogether a high feed out rate on average could be realised due to the convenient proportion between silo face and feed removal per day. The general requirements for ensiling material, silage making and feed management were achieved at all farms. Hence transferability of the results to practice is justifiable.

The DM losses determined for 48 farm scale silos are presented in figure 3.2. The collected data followed a normal distribution. For maize silages an average of 10% DM losses was observed, for grass silages 9% and for lucerne silages 12%, respectively. The average DM losses from these silage types seem to be low. This was unexpected, in particular of the grass silages, because DM losses of grass silages in laboratory scale exceeded those of maize silages (Thaysen et al. 2007). Grass silages, which were shown to be most heterogeneous, revealed the largest range of DM losses from -2% to 26%, followed by maize silages from -4% to 19% and lucerne silages from 6% to 15%.

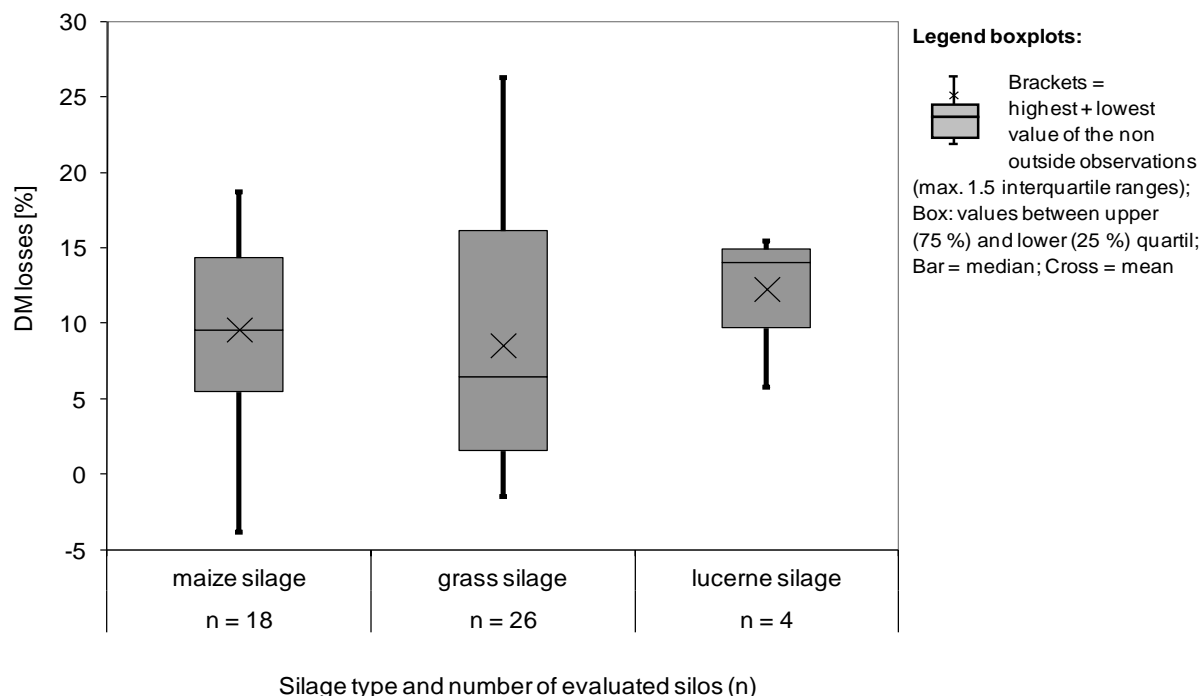


Figure 3.2: DM losses (%) of silages determined by the total-in vs. total-out method

With respect to other characteristics of silage quality the grass silages showed the highest variability for DM contents and densities. Nevertheless, for one grass silo 26% losses of DM were determined. For this silo an intense reheating could be observed, however, the appearance of butyric acid was found. The high DM losses could be explained with the occurrence of this parameters and the ascertained low feed out rate.

Further tests showed, that the feed out rate had a negative significant correlation coefficient with the DM losses for both silages (maize -0.555 , grass -0.570) (Table 3.3). A negative correlation with the density was significant for the maize silos (-0.625). Furthermore, no correlation between the density and the DM losses of grass silos was found.

Table 3.3: Correlation coefficients of density and feed out rate with the dry matter losses of the maize and grass silos

Variable	DM losses of maize silos (n=18)		DM losses of grass silos (n=26)	
	n	correlation	n	correlation
Density, kg m ⁻³ DM	15	-0.625^*	18	-0.039
Feed out rate, m week ⁻¹	22	-0.555^*	19	-0.570^*

*significance with: $0.05 > p > 0.01$

These relations should be taken into account, because in most cases maize silages did not reach the recommended density levels. However, besides density there are several other parameters causing DM losses in silos. Referring to the farm scale study of Borreani and Tabacco (2012), who investigated maize silages for aerobic deterioration, the influence of the recommended feed out rate was proven. Moreover, the mean feed out rate in the cited study was lower than in the present investigation. Our findings also exhibited low levels of DM losses in general. Compared to the values of other studies (McGechan 1989), it is probably attributed to the good ensiling practice and the partial high feed out rate on the participating farms.

As negative values for DM losses are impossible, they have to be ascribed to the precision of the method, which strongly depends on the accuracy of the data collection and their susceptibility to errors. Potential sources of error are an inadequate

distribution of control points for DM determination, as well as inaccurate weighing by the fodder mixer wagon. The correctness and frequency of DM determination is crucial, especially for the investigation of the heterogeneous grass silages (Turner et al. 2011). Therefore, progress of DM determination by the implementation of online NIRS systems on the fodder mixer wagon (Twickler et al. 2012) could be an improvement for the proposed method. Supported by technical measurements of the permanent process the method appears to be applicable for farms in spite of different procedures for feeding. In the present study, fifty percent of the ascertained values were below 8% of DM losses. Thus, according to the present results a maximum value of 8% unavoidable DM losses can be set as a guideline for bunker silos, independent of the crop. This method of control could be implemented by using technical measurements with justifiable effort on practical farms.

3.5 Conclusions

A method for the determination of DM losses in bunker silos has been described. The DM losses in grass silages seem to be comparable with those for maize, assuming there is a good practice of ensiling. The density and feed out rate showed a negative correlation to DM losses in maize silages. As a guideline for maximum DM losses in bunker silos, 8% emerged to be an adequate value. In spite of problems concerning data collection, the method seems to be adaptive and useful for commercial farms as a tool of control.

Acknowledgements

This study was financed by the Bavarian State Ministry of Food, Agriculture and Forestry", as part of the project "Efficient Feed Management and Nutrient Flows on Dairy Farms" (A/08/01).

3.6 References

- Bastiman, B. & Altman, J.F.B. 1985. Losses at various stages in silage making. *Research and Development in Agriculture* 2: 19–25.
- Borreani, G. & Tabacco, E. 2012. Effect of silo management factors on aerobic stability and extent of spoilage in farm maize silages. In: Kuoppala et al., Proceedings of the 16th International Silage Conference Hämeenlinna, Finland: 71–72.
- DLG 2011: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. Frankfurt/Main: DLG-Verlag, 416 p.
- Friendly, M. 2005. SAS Macro Programs for Statistical Graphics: boxplots: <http://www.datavis.ca/sasmac/boxplot.html>.
- Humphreys, J., Aarts, H.F.M., Watson, C.J., Wachendorf, M., Le Gall, A., Taube, F. & Pflimlin, A. 2009. Sustainable options for grassland-based dairy production in the northwest of Europe. Tearmann: *Irish Journal of Agri-Environmental Research* 7, 175–194.
- Mayne, C.S. & Gordon, F.J. 1986. Effect of harvesting system on nutrient losses during silage making. 2. In-silo losses. *Grass and Forage Science* 41: 341–351.
- McGechan, M.B. 1989. A review of losses during conservation of grass forage. Part 2, storage losses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 45: 1–30.
- Richter, W., Zimmermann, N., Abriel, M., Schuster, M., Kölln-Höllrigl, K., Ostertag, J., Meyer, K., Bauer, J. & Spiekers, H. 2009. Hygiene bayerischer Silagen: Validierung einer Checkliste zum Controlling am Silo. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Schriftenreihe 9: 130 p.
- Spiekers, H., Ostertag, J., Meyer, K., Bauer, J. & Richter, W.I.F. 2009. Managing and controlling silos to avoid losses by reheating of grass silage. In: Broderick et al., Proceedings of the 15th International Silage Conference Madison, USA: 317–318.
- Thaysen, J., Honig, H., Kalzendorf, C., Spiekers, H. & Staudacher, W. 2007. Silage Additives: Aspects of feed legislation, efficacy of DLG-approved products and recommendations for application. *Übersichten Tierernährung* 35: 55–91.
- Turner, S., Fröhner, A., Köhler, B. & Demmel, M. 2011: Online measurement of yield and dry matter content of wilted grass with two forage harvesters – comparison with and verification of reference measurements. In: Precision Agriculture 2011. Ed. J.V. Stafford, Proceedings of the 8th European Conference on Precision Agriculture 2011, Prague, Czech Republic: 628–637.
- Twickler, P., Büscher, W. & Maack, C. 2012. Sensor controlled total-mixed-ration for nutrient optimized feeding of dairy cattle. In: Kuoppala et al., Proceedings of the 16th International Silage Conference Hämeenlinna, Finland: 316–317.

- Watson, S.J. & Nash, M.J. 1960. The conservation of grass and forage crops. Edinburgh: Oliver and Boyd: 758 p.
- Weißbach, F. Schmidt, L., & Hein, E. 1974. Method of anticipation of the run fermentation in silage making, based on the chemical composition of the green fodder. Proceedings of the 12th International Grassland Congress Section 2, Moscow, USSR: 663–673. Cited in: DLG 2011.
- Weißbach, F. & Kuhla, S. 1995. Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfutter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur. *Übersichten Tierernährung* 23: 189–214.
- Zimmer, E. 1980. Efficient silage systems. Proceedings of the British Grassland Society Occasional Symposium No 11 Brighton, UK: 186–197.

Kapitel 4

Dry-matter losses and changes in nutrient concentrations in grass and maize silages stored in bunker silos

Brigitte Köhler¹, Friedhelm Taube², Johannes Ostertag³ (†), Stefan Thurner⁴, Christof Kluß² & Hubert Spiekers⁵

¹Hesse Department of Agriculture Affairs, Kassel, Germany

²Institute of Crop Science and Plant Breeding – Grass and Forage Science/Organic Agriculture, Christian-Albrechts-University (CAU), Kiel, Germany

³Agricultural Technology Centre Augustenberg, Karlsruhe, Germany, †deceased

⁴Institute for Agricultural Engineering and Animal Husbandry, Bavarian State Research Centre for Agriculture (LfL), Freising, Germany

⁵Institute for Animal Nutrition and Feed Management, Bavarian State Research Centre for Agriculture (LfL), Poing-Grub, Germany

Published in Grass and Forage Science, 2019, 74(2), 274–283; DOI:

<https://doi.org/10.1111/gfs.12430>

4 Dry-matter losses and changes in nutrient concentrations in grass and maize silages stored in bunker silos

4.1 Abstract

To reduce losses and improve forage use efficiency in dairy farming systems, mass and nutrient flows during silage production have to be measured from the field to feed bunk. However, data on these losses at the farm scale are scarce. Thus, we examined dry matter (DM) losses and changes in nutrient concentrations [proximate constituents, nitrogen (N), phosphorus (P)] and energy values [net energy for lactation (NEL)] of silages on three experimental farms from ensiling to feed-out. The investigated material included forages from permanent grassland and whole-crop maize that were stored in 64 side-walled bunker silos. To determine DM losses, the total-in vs. total-out method was applied. Additionally, the changes in the nutrient concentrations were measured by comparing the concentrations before and after ensiling. Data analyses were carried out by using ANOVA, and the means across groups were compared via multiple contrast tests. On average, the farms had good silage production management. Average values showed a trend towards higher DM losses during the ensiling process with grass (9%) than maize (7%). The N and P concentrations of the silages remained mainly unchanged during the ensiling process, suggesting that the total losses of N and P were also low (< 10%). Regarding the fibre fractions, ensiling resulted in a significant reduction in the concentration of amylase-treated ash-excluded neutral detergent fibre (aNDFom) for grass (11%) and maize (15%), while ash-excluded acid detergent fibre (ADFom) was not affected by the ensiling process. These changes resulted in slightly improved energy values in the silages.

4.2 Introduction

Agricultural production faces the challenge of achieving a good balance between profit and satisfying environmental requirements and regulations. The increasing demand for food of animal origin and the growing competition for land have triggered the need to improve efficiency in production systems (Godfray et al., 2010; Taube et al., 2014). Enhancing N use efficiency (NUE) and reducing environmentally relevant emissions from agricultural systems are key approaches to improving efficiency in production systems (Mihailescu et al., 2014; Misselbrook et al., 2013). Dairy farming systems have very complex material flows that should be measured both quantitatively and qualitatively at the farm scale to control and improve management processes (Rotz et al., 2006; Köhler et al., 2014). In particular, feedstuff management should be optimised with regard to efficient and sustainable production (Wilkinson, 2011).

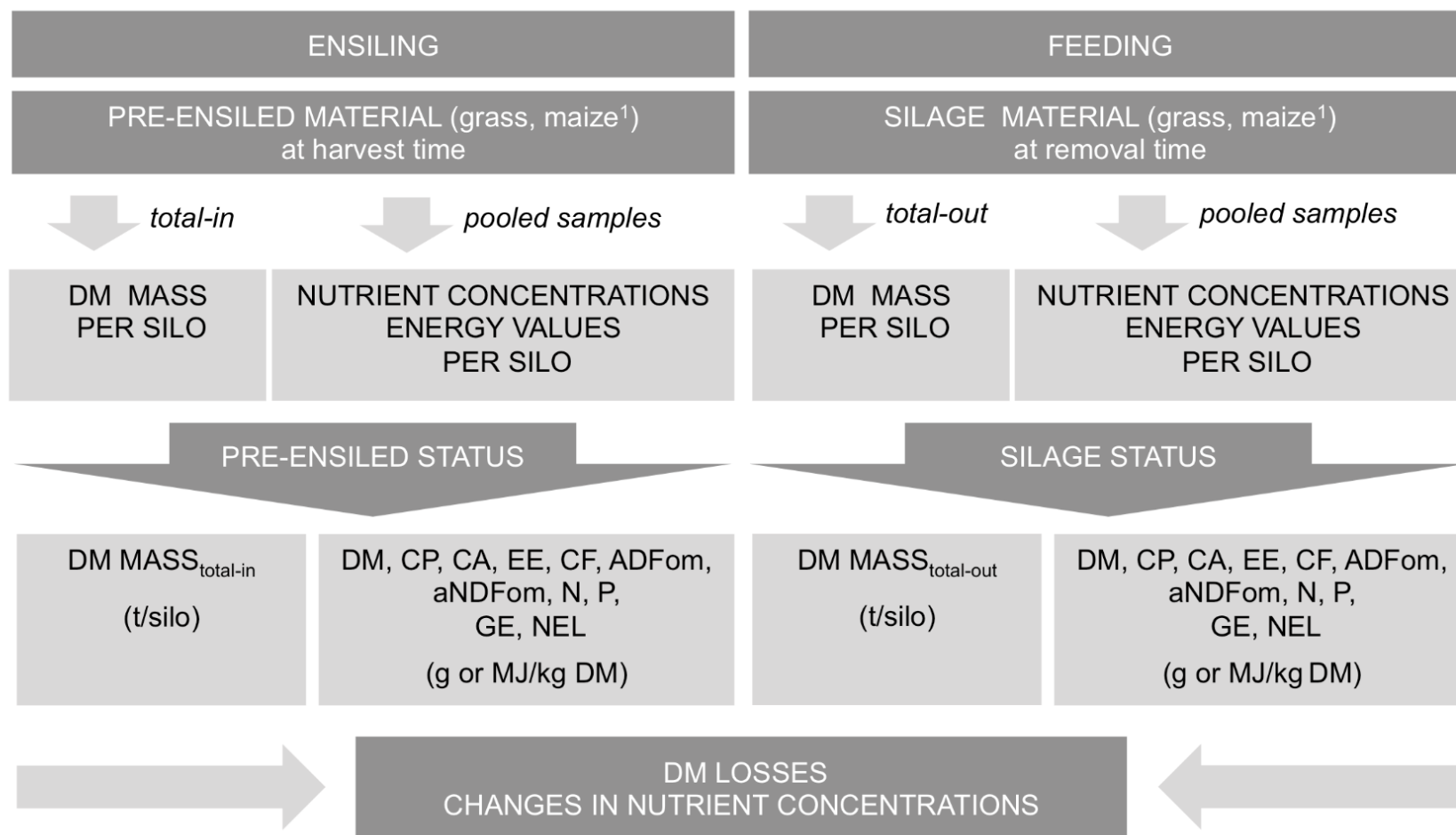
In many European countries, silage production accounts for a large share of the feed and substrate supply (Wilkinson and Toivonen, 2003). For dairy farms, feed costs are, and always have been, a decisive economic factor (Zimmer, 1980; Chamberlain, 2013). Silage making should thus be designed to preserve energy value and to obtain good fermentation quality (Pahlow, 2007). All silage management practices should focus on the supply of high-quality forage to reduce the costs of purchased feedstuffs. A key approach to achieve this target is to reduce forage losses in the silo.

In general, studies have shown that feed losses from silos range widely. Dry matter (DM) losses during storage range, on average, from 6% (Mayne and Gordon, 1986) to 16.1% (Watson and Nash, 1960) and can reach up to 31.9% (Bastiman and Altman, 1985). To identify weak points in silage management, losses must be quantified from ensiling to feeding. During the silage feed-out phase, a high level of aerobic stability of the silage is essential for preserving its high level of quality. It is crucial to minimise losses due to aerobic deterioration by optimally adjusting management factors during the ensiling process (Wilkinson and Davies, 2013). However, only a few investigations have been conducted on silo losses from ensiling to feed-out under practical conditions (Köhler et al., 2013; Robinson et al., 2016). A previous analysis by our group (Köhler et al., 2013) encompassing 48 silos with grass, maize and lucerne silages—carried out with a total-in vs. total-out method—revealed mean DM losses of 9 to 12%. For the present investigation, we significantly extended the database to have more statistical power, allowing us to identify the fate of mass and nutrient flows due to the quality of

the silage produced in bunker silos at the farm scale. We also sought to extend the accuracy of the measurements regarding nutrient concentrations before and after ensiling. Therefore, we fully analysed the mass flows from the pre-ensiled material (wilted or fresh) stage to the stage when the silages were ready to be fed. For our analysis, we hypothesised that best practices for silage making at the farm scale maintain consistently high values of energy and nutrient concentrations (N/P) in the silages and thus minimise losses to the environment.

4.3 Materials and methods

The mass flow and the changes in the nutrient concentrations from ensiling to feed-out were examined for forages on three experimental farms of the Bavarian State Research Centre for Agriculture (LfL), Germany (figure 4.1). The dairy farms, which were located in different regions of Bavaria, had a total of 100 to 190 dairy cows. The long-term annual mean temperatures ranged from 7.7 to 8.8°C, and the four-year mean precipitation (2008–2011) ranged from 780 to 984 mm. The determination of the DM losses from the silages was based on the total-in vs. total-out method described by Köhler et al. (2013). In addition to previously published data, we extended the database by adding silages from a fourth production year on two of the three experimental farms and by incorporating some “sandwich” silages on the new third farm. The “sandwich” technique means that the silos were half filled with a layer of grass and were then filled with a layer of maize. Finally, the changes in the nutrient concentrations of pre-ensiled material compared to those of silage material were examined to determine the changes in nutritive values and losses of N and P.



¹whole-crop maize; DM, dry matter; CP, crude protein; CA, crude ash; EE, ether extract; CF, crude fibre; ADFom, ash-excluded acid detergent fibre; aNDFom, amylase-treated ash-excluded neutral detergent fibre; N, nitrogen; P, phosphorus; GE, gross energy; NEL, net energy for lactation.

Figure 4.1: Measurements based on the total-in versus total-out method

4.3.1 Silage production

Data on the investigated material, which included data from the crop years 2008 to 2011, were collected over a period of six years, from 2008 to 2013. The feed sources on the farms included forage from permanent grassland and whole-crop maize, and on two farms, they included grass-clover mixtures and annual ryegrass. The permanent grassland was dominated by grass species (with a share of approximately 88% of the total DM), in particular by *Alopecurus pratensis* and *Lolium perenne*. Only farm number three produced grass silage with a mean proportion of a grass-red clover mixture of approximately 25%, which was ensiled and analysed along with the grass material in the silo. Fertiliser was applied according to requirements and ranged from 240 to 280 kg N/ha and from 17 to 50 kg P/ha for the grassland and from 150 to 200 kg N/ha and from 20 to 35 kg P/ha for whole-crop maize; however, the grass-clover swards received no artificial N fertilisers. In practice, the farms took three to five cuts from the permanent grassland per year. The annual yields, on average, amounted to 8.0 to 9.1 t DM/ha for grass, 10.6 t DM/ha for grass-red clover mixtures and 15.7 to 17.0 t DM/ha for whole-crop maize. Köhler et al. (2017) described the grassland management practices on the experimental farms in detail.

The silage-making procedures were in line with the good practice standards described by the Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (2011), which is the German expert panel for forage conservation. Silage management occurred under the same conditions as those for harvesting, filling and sealing described by Köhler et al. (2013). Furthermore, on farm number one, a silage additive was used in 15 grass silos. This inoculant, which was composed of *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Pediococcus pentosaceus*, *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus brevis*, was applied at a rate of 100,000 colony forming units (cfu)/g fresh matter (FM). This product had received the DLG Quality Mark in the categories 1 c (improved fermentation process) and 2 (improved aerobic stability) (Pauly and Wyss, 2019). The bunker silo capacities ranged from 170 to 1,000 m³. The silages were conserved in side-walled bunker silos with fresh forage weights from 37 to 897 tonnes per silo. All silos were covered for at least six weeks.

Table 4.1: Criteria of the measurements for feed material analysis

Measurement steps	Measurement	Accuracy (technique)	Alternative collection at the farm scale	
			Collection	Limit
Harvest material ¹	weight of each wagon load; cart scale (40 t max. performance)	± 10 kg each load; correction for fuel consumption		
Allocation to silo	handwritten record	–	merged	max. four silos
Silage material	weight on fodder mixer wagon with digital weighing systems, controlling for the daily feed rations	± 1–2 kg each weighing; corrective equations ²	handwritten record; validation of the silage quantities depends on rations (therefore without measuring corrective equations)	validated; ≤ 14 days without recording, continually
Removal from silo	programmed feed components, handwritten record	–	merged (corresponding to the step: allocation to silo)	
Residual silo stock	volume measurement (height*width*depth) + measured bulk density ³	94% (rel.) ±11 ⁴	volume measurement including bulk density ⁵	≤ 10% proportion of quantities
Sale of silage	weight of each wagon load; cart scale	± 10 kg each load		

¹wilted or fresh material; ²applied equations for the three farms: $fx_{(one)} = 0.984 x$; $fx_{(two)} = 1.014 x - 17.56$; and $fx_{(three)} = 1.0248 x - 17.415$, corrected for the data from the fodder mixer wagon for each farm to adjust for the two weighing systems (cart scale and fodder mixer wagon); ³measurement of bulk density is described in Köhler et al. (2013), ⁴accuracy of this measurement: mean relative value (in %) with standard deviation (SD); ⁵bulk density value according to Richter et al. (2009).

4.3.2 Investigations of DM losses

The DM losses were determined from 32 grass silos, 25 whole-crop maize silos and seven “sandwich” silos with grass and whole-crop maize. Losses were assessed using the total-in vs. total-out method as described in Köhler et al. (2013). Table 4.1 shows the measurement criteria for determining DM losses at the farm scale. Data that did not meet these criteria were excluded. The DM losses were calculated by subtracting the removed DM mass from the pre-ensiled DM mass, summing all single values. For this investigation, the database was reviewed by using a calculation tool based on Access software. The DM contents of the silage material, which were determined on a weekly basis, were allocated to the silage mass that was removed during the same period. Spoiled material, which was not used for feeding, was regarded as a loss. To calculate the DM losses, the data on a FM basis that did not reveal losses per silo were excluded from the investigation, as they might have resulted from incorrect data in the quantity-based measurement and not from methodical errors.

To determine the DM contents (table 4.2), pooled samples were taken from the pre-ensiled material at harvest time and from the silage material from the silo face during removal by using a core drill (Pioneer™-drilling jig, drilling depth 40 cm). The sampling method is described in more detail in Köhler et al. (2013). The DM content was determined using gravimetric method 3.1 by VDLUFA (2012), and for this method, samples were heated for 36 hours at 65°C and for four hours at 105°C. The DM content of the silage material was corrected for volatiles using the equations $DM_{corrected} (\%) = 2.08 + 0.975 \times DM_{uncorrected} (\%)$ for grass and $DM_{corrected} (\%) = 2.22 + 0.96 \times DM_{uncorrected} (\%)$ for maize (Weißbach and Kuhla, 1995). The key measures of silo control included visual and sensory controls and the determination of pH, temperature and bulk density (Bundesarbeitskreis Futterkonservierung, 2011). For our investigation, physical parameters were assessed as described by Spiekers et al. (2009). The procedure was explained in detail by Köhler et al. (2013): assessments were carried out once per silo when half of the silage had been removed. The samples for bulk density were taken from three spots (top, centre, and bottom) on the silo face. The temperature was measured at six spots (top: left/middle/right; centre; and bottom: left/right) on the silo face at depths of 40 and 100 cm. To investigate the fermentation profiles of the silages, pH value, fermentation acid (lactic, acetic, propionic and butyric

acids) and ammonia (NH₃-N) concentrations were analysed with an ion chromatography method according to Richter et al. (2009).

Table 4.2: Sampling frequency of the investigated materials (grass; whole-crop maize)

Parameters	Pre-ensiled material ¹	Silage material ²
DM content	four times per ha	once a week
Proximate constituents	three times per silo	once a month
Minerals	three times per silo	once a month
Sugar ³	three times per silo	once a month
Buffering capacity ⁴	once per silo	—
Fermentation acids ⁵	—	once per silo
pH value	—	once per silo
NH ₃ -N	—	once per silo

¹pre-ensiled material during harvest time, ²silage material from the silo during feed-out, ³sugar analysed by the Luff-Schoorl method (VDLUFA, 2012), ⁴buffering capacity = quantity of lactic acid in g that had to be added to lower the pH value of 1 kg of DM to pH four, ⁵fermentation acids (lactic, acetic, propionic and butyric acids) with ion chromatography method according to Richter et al. (2009).

4.3.3 Investigation of changes in nutrient concentrations

Wilted or fresh material—defined as pre-ensiled material in this study—was sampled at harvest time just before ensiling and as silage material from the silo face, which was sampled during the feed-out of the silage (figure 4.1). The chemical compositions and preservation quality parameters of both materials were analysed. Pooled samples were obtained for analysis of the nutrient concentrations and energy contents per silo three times from the pre-ensiled material and once a month from the silage material (table 4.2). The pooled samples from the pre-ensiled material were taken from the DM content sample, which was obtained from 5 to 10 single samples randomly taken from each wagonload after unloading. The bulk samples of the silages were derived from the weekly DM content samples. The chemical components [DM, crude protein (CP), crude ash (CA), ether extract (EE), crude fibre (CF), acid detergent fibre expressed exclusive of residual ash (ADFom), neutral detergent fibre assayed with heat-stable amylase and expressed exclusive of residual ash (aNDFom) and phosphorus (P)] were analysed (VDLUFA, 2012). Near infrared spectroscopy (NIRS) was used for the prediction of the Weende proximate constituents using the NIRSystems 6500

equipment (Foss GmbH, Hamburg, Germany). On farm number one, we partly used analyses of silage material based on wet chemical processes (VDLUFA, 2012). Sugar was also analysed with NIRS using the Luff-Schoorl method (sugar, method 7.1.1; VDLUFA, 2012). The NIRS calibration was based on wet chemical reference measurements. The accuracy [root mean square error of prediction (RMSEP)] of the applied NIRS calibration for the Weende analysis is outlined in table 4.3. The total phosphorus concentration was examined using X-ray fluorescence analysis (RFA) (VDLUFA, 2012). The buffering capacity (BC) revealed the quantity of lactic acid per g, that had to be added to lower the pH value of 1 kg of DM to pH four. The fermentation coefficient (FC) was calculated according to Weißbach et al. (1974). The energy values of net energy for lactation (NEL) and gross energy (GE) were calculated with equations according to GfE (1995). The GfE equations (2008) were applied for silage material beginning in 2009 and for pre-ensiled material beginning in 2011. The nutrient and mineral concentrations of the pre-ensiled and silage material were pooled and paired to each silo, resulting in mean values. Based on these values, the changes in the concentrations were determined.

Table 4.3: Root mean square error of prediction¹ [RMSEP] (%) of the applied NIRS calibration equations for grass and maize and their products [empirical values (unpublished)]

NIRS analysed compounds	RMSEP (%)
CP for grass	0.5
for maize	0.3
CF	1.0
EE	0.3
Sugar	1.0
ADFom	0.3
aNDFom	2.5
Gas production	1.5
ESOM	2.0

¹as described by ISO 12099 (VDLUFA, 2016); CP, crude protein; CF, crude fibre; EE, ether extract; sugar, analysed by the Luff-Schoorl method (VDLUFA, 2012); ADFom, ash-excluded acid detergent fibre; aNDFom, amylase-treated ash-excluded neutral detergent fibre; gas production, gas production (Hohenheim gas test); ESOM, enzyme-soluble organic matter.

4.3.4 Statistical analysis

Data analysis was carried out using the statistical software R (R Core Team, 2018). Forage species (grass; whole-crop maize) and conservation status (pre-ensiled; silage) were fixed factors, while year (2008 to 2011) and farm were random. Changes in DM masses, nutrient concentrations and energy values were analysed using ANOVA (analysis of variance), and the means across groups were compared via multiple contrast tests. In addition to the DM loss analysis, correlations of feed-out rate and bulk density to DM losses were examined using the Pearson correlation coefficient.

4.4 Results

4.4.1 Silage management

Table 4.4 documents the fermentation profiles of the silages and the physical parameters of the silo controls. The mean nutrient concentrations of the grass and whole-crop maize material in the bunker silos—pre-ensiled material compared to silage—are shown in figure 4.2. The silages from the 64 investigated silos were analysed at the farm scale over several harvest years. Consequently there were wide ranges in nutrient concentrations as well as variations in the chemical and physical parameters. In general, the substrate used for ensiling was of high quality. In agreement with the predicted ensilability according to Weißbach et al. (1974), both crops had good fermentation qualities.

On average, the maize and grass silages had the pH values of 3.9 and 4.4, respectively, which are recommended for good fermentation (Bundesarbeitskreis Futterkonservierung, 2011). There were differences between silages in fermentation acid patterns for both grass and maize (table 4.4). Butyric acid was detected in 10 out of the 54 silos. Eleven per cent of the affected silages showed values above the limit of 3 g butyric acid/kg DM set by Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (2011). However, the $\text{NH}_3\text{-N}$ of grass and maize showed usual values of 7 and 8%.

Table 4.4: Ensilability of the pre-ensiled material plus the chemical and physical parameters of the silage material (grass; whole-crop maize) from the silo controls as defined in Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (2011)

Parameters		Grass			Maize		
	Unit	n	Mean	Range	n	Mean	Range
Ensilability							
BC ¹	g/kg DM	40	84	40–116	30	33	21–67
FC ²	–	40	43	28–78	30	54	41–65
Chemical parameters							
DM	g/kg	28	325	238–508	26	368	286–443
pH	–	28	4.4	3.8–5.6	26	3.9	3.7–4.3
Lactic acid	g/kg DM	28	59	20–129	26	44	26–68
Acetic acid	g/kg DM	28	20	7–50	26	15	6–38
Propionic acid ³	g/kg DM	7	3	2–5	2	1	1–2
Butyric acid ³	g/kg DM	8	9	2–23	2	1	1–2
NH ₃ -N	%/N _{total}	25	7	2–34	25	8	4–17
Physical parameters							
Bulk density	kg/m ³ DM	33	218	155–370	29	260	215–299
Feed-out rate	m/week	34	2.1	1.1–3.8	33	2.3	1.1–3.3
Temperature							
40 cm	°C	33	15	5–25	28	15	6–23
100 cm	°C	33	14	6–23	28	15	5–22

¹buffering capacity (g lactic acid/kg DM) ²fermentation coefficient = DM % + 8 * (sugar/buffering capacity) (according to Weißbach et al., 1974), ³propionic and butyric acids with number of analyses that exceeded the limit of determination.

On average, the silages had bulk densities of 218 kg DM/m³ for grass and 260 kg DM/m³ for maize. However, the individual silos greatly varied in bulk density. Once the DM contents were considered, maize silages most frequently (seven out of 26 silages) showed bulk densities below the values recommended by Richter et al. (2009). Temperature was measured at the six locations on the silo face at a depth of 40 cm and averaged 15°C; therefore, there was no evidence of reheating. However, temperature measurements at single spots (in the top of the silo face) at this depth, showed that 12% of the examined silages had considerable differences in core

temperature, according to the reheating scheme defined by Richter et al. (2009). The feed-out rate from the silo averaged 2.1 to 2.3 m/week, but with a variation between individual silos from 1.1 and 3.8 m/week.

4.4.2 DM losses and changes in nutrient concentration

The DM losses and changes in nutrient concentration from the grass ($n = 39$) and whole-crop maize silos ($n = 32$) were determined by a statistical analysis that compared means across groups ($p < 0.05$), as presented in figure 4.2.

The DM losses ($DM_{\text{total-in:total-out}}$) were generally low, with a trend that was not statistically significant for losses to be higher for grass (average 9%) than for maize (7%). There was a large variation between individual silos, especially for grass silages. To depict the ranges of DM losses in the investigated silos, the results are presented as boxplots in figure 4.3. The DM losses ranged from -4.5 to 21.9 % in the grass silages, from -5.5 to 15.0 % in the maize silages and from -0.9 to 12.3 % in the “sandwich” silages. Further analysis of the DM losses in all silages showed that the feed-out rate has a significant negative correlation between feed-out rate and DM loss, but no relationship between bulk density and DM loss (table 4.5).

The chemical components and the energy values of the grass and maize crops differed significantly. Grass silages showed a strong reduction in the mean DM content after ensiling (from 324 to 310 g DM/kg). In contrast, the maize material was characterised by stable DM contents of approximately 355 g DM/kg. However, conservation status had no significant influence on the DM contents of either crop. On average, the grass material was characterised by high CP concentrations in the pre-ensiled material (171 g/kg DM), while the silages showed slightly lower CP concentrations (163 g/kg DM). This result is in line with the protein degradation processes during ensiling of grass, but the difference in CP before and after ensiling was not statistically significant. The CP concentration of maize was also not significantly affected by the ensiling process (73 to 75 g/kg DM).

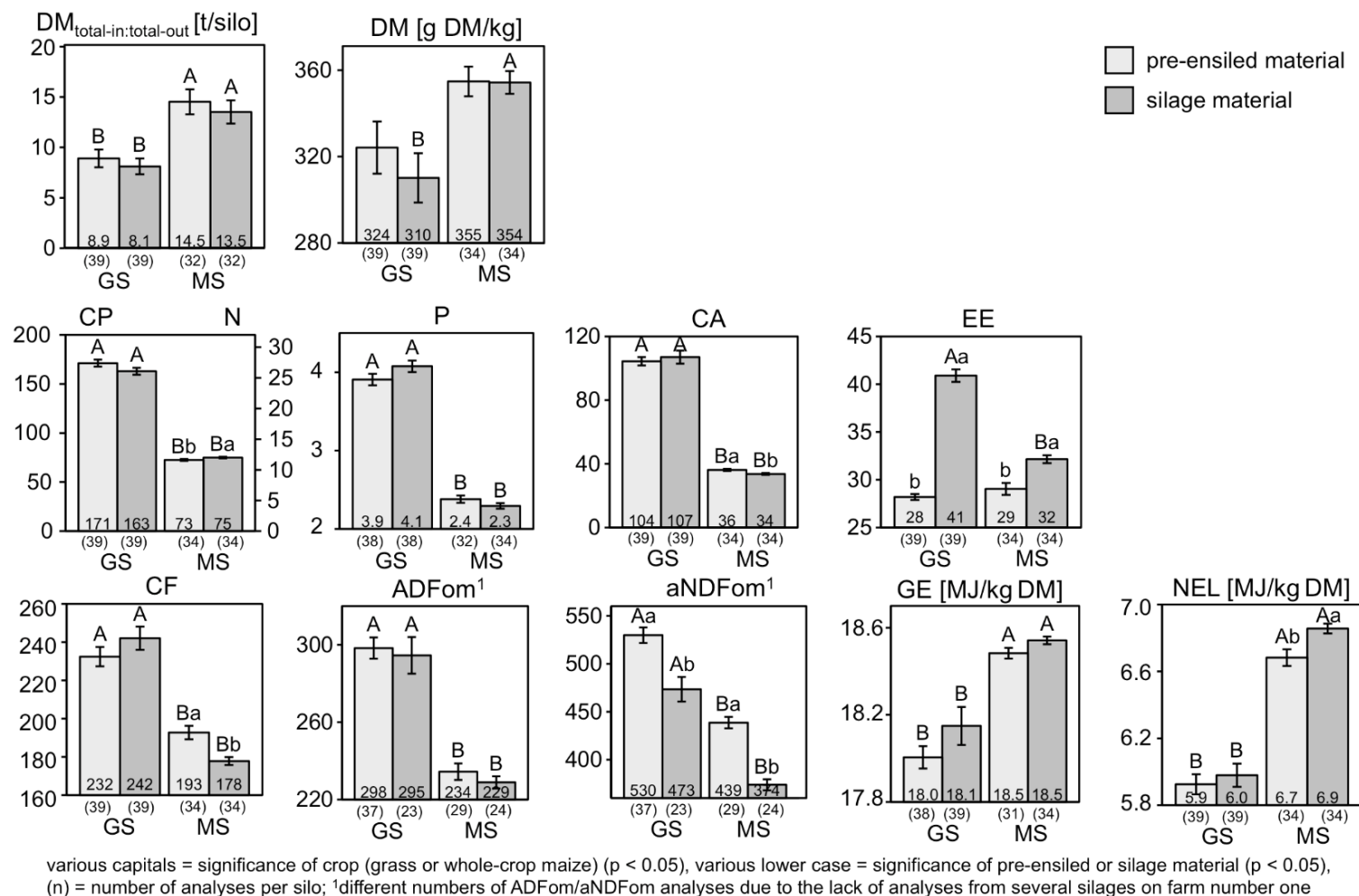
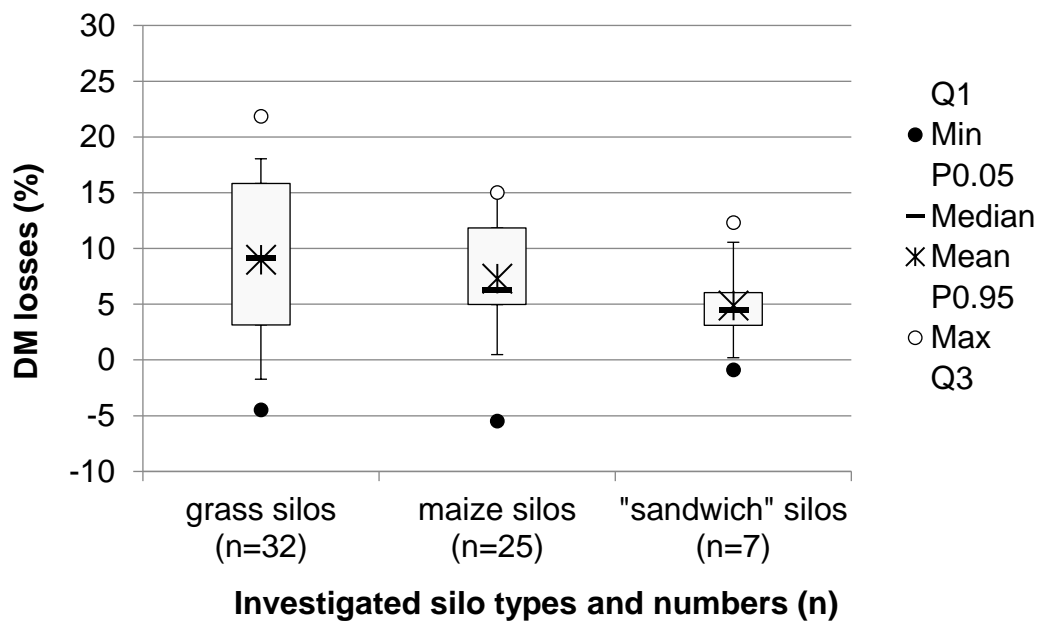


Figure 4.2: Comparison of the means across groups of grass (GS) and whole-crop maize material (MS) regarding DM losses (DM_{total-in:total-out}), proximate constituents, nitrogen (N), phosphorus (P) and energy values (GE and NEL) (in g/kg DM unless stated)



Q1: 0.25 quantile; Min: minimum, P: percentile; Max: maximum; Q3: 0.75 quantile

Figure 4.3: Dry matter (DM) losses (%) of the investigated bunker silos (n=64) with grass, whole-crop maize and “sandwich” (grass and whole-crop maize) silages, as shown by boxplots

The EE concentrations in both crops were significantly influenced by the conservation status and ensiling resulted in an increased from 28 to 41 g/kg DM in grass and from 29 to 32 g/kg DM in maize. The phosphorus concentrations differed between the forage species—grass averaged 3.9 g/kg DM; maize, 2.4 g/kg DM—but were not changed by ensiling. Regarding CF, only the maize showed considerable changes due to conservation, with the concentration decreasing from 193 to 178 g/kg DM. While the ensiling process did not affect ADFom, aNDFom was significantly reduced in both forages. The concentration of aNDFom distinctively decreased from 530 to 473 g/kg DM in grass and from 439 to 374 g/kg DM in maize due to the ensiling process.

The changes in the chemical constituents through ensiling were linked to the energy content of the analysed material. However, a decrease in the energy content could not be shown with the predicted equations for NEL. On average, the energy values increased slightly from 5.9 to 6.0 MJ/kg DM for grass and from 6.7 to 6.9 MJ/kg DM for

maize due to the ensiling process. Similarly, ensiling did not affect GE, with average values for grass of 18.0 and for maize of 18.5 MJ/kg DM.

4.5 Discussion

4.5.1 DM losses

All three farms used silage production management practices that resulted in good fermentation profiles according to the recommendations by the Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (2011). Despite the wide ranges in the investigated material and in the fermentation parameters—representing the situation on commercial farms very well—there was no evidence of undesirable fermentation processes. The level of DM losses can be attributed to various factors (Pahlow and Muck, 2009). However, aerobic deterioration at the silo face by reheating induced by yeasts has to be taken into account (Spiekers et al., 2009; Ostertag et al., 2013). Zimmer (1980) designated optimum values of less than 7% for unavoidable energy losses caused by residual respiration and fermentation. Microbial activity leads to organic matter (OM) degradation in the first hours of the ensiling process, which affects DM losses. Thus, on average, the DM losses measured in our dataset for grass and whole-crop maize silos were close to the optimum range. These data also indicated the reliability of our total-in vs. total-out measurements, as they are also in line with the results from Borreani et al. (2018), who reviewed factors that affect DM losses.

Due to the complexity of the fermentation process and the additional sources of variation from silage production management at the farm scale, it is difficult to identify the specific drivers of the losses at the farm scale compared to those at laboratory scale (McGechan, 1990). Some of the specific values from silage production—especially the measured increased temperatures in the upper layers of a few investigated silos—indicated reheating. However, while evaluating DM losses at the farm scale, no measurable correlation between these losses and temperature differences could be determined. This result shows that the level of DM loss may depend on several factors. A significant negative correlation could only be determined between DM losses and feed-out rate (table 4.5). This is in accordance with the results of the previous investigation by Köhler et al. (2013).

Table 4.5: The Pearson’s correlation coefficient (r) of the feed-out rate and the bulk density in relation to the DM losses (%) of the investigated silos (n = 64)

Parameters	Unit	n	DM losses (%)
Feed-out rate	m/week	58	−0.274*
Bulk density	kg/m ³ DM	60	−0.050

*significance 0.05>p>0.01

A comparison of the methods used to detect DM losses by Ostertag et al. (2013) highlighted that investigations at laboratory and farm scales are not comparable. However, non-representative sampling has been identified as one large source of variation (McDonald et al., 1991). The non-representative sampling method to determine the DM mass per silo could be a reason for the implausible results from several of our investigated silos, as depicted in the boxplots (figure 4.3). However, intensive sampling was implemented in our study to determine DM contents by using the total-in vs. total-out method (see table 4.2), resulting in coefficients of variation—based on the mean DM contents per silo—that did not exceed 10% for maize and 23% for grass material.

The variation in the DM losses can be explained by possible errors in the measuring of the mass flow and also by an incorrect measurement of the true DM content. This, for example, refers to the presumed losses due to oven drying, which show considerable differences depending on the concentrations of fermentation acids and alcohols etc. (Weißbach and Kuhla, 1995). For oven drying of silages the equations for the correction should be applied considering the concentrations of fermentation acids. To avoid sampling errors in future investigations, it is recommended to measure the DM contents in the entire material flow on the forage harvester and fodder mixer wagon with modern sensor technology.

Robinson et al. (2016), who also used the total-in vs. total-out method, analysed DM losses as “shrink losses” from seven commercially sized maize silage piles. The low total DM losses of 2.8% (volatile corrected) that they measured were attributed to the high bulk densities of the silages and high feed-out rates. Thus, considering that digital and automatic working weighing systems are increasingly used in practice, the total-in vs. total-out method seems to be a powerful tool for economic analyses of silage

production (Borreani and Tabacco, 2014). However, the buried bag method is considered to be more accurate for investigations of losses ascertaining individual factors (Borreani et al., 2018).

4.5.2 Changes in nutrient concentration

The chemical components (except EE concentrations) and the energy values of the grass and maize crops differed significantly, as expected. In our dataset, there was no evidence of malfermentation processes that can be associated with a higher degradation of components such as protein and amino acids. The change in the DM contents of the grass silages—which commonly have wide ranges—were characterised by a large reduction in OM during the ensiling process. A loss of OM in grasses has already been documented by Mayne and Gordon (1986). This effect was not observed in maize to this extent. Gerlach et al. (2018) showed that the DM contents of maize before and after ensiling were not affected by storage.

Due to proteolytic and desmolytic processes during ensiling, an increase in non-protein N (NPN) compounds has an impact on the CP fraction (McDonald et al., 1991; Hoedtke, 2010). As grass silages contain higher proportions of volatile N components from NPN compounds than maize silages, protein is degraded to a greater extent in grass than in maize silages, resulting in a tendency towards reduced concentrations of CP in grass silages after ensiling. During the ensiling of maize, fermentation slightly intensifies the degradation of N-free components, which results in a tendency towards an increase in the CP concentrations of maize silages. This is supported by Gerlach et al. (2018) who observed that the NPN and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations of whole-crop maize increased continuously with the length of storage. Exclusively under laboratory conditions, Udén (2018) determined that ensiling resulted in a larger loss in OM than of CP. Thus despite the transformation processes in the CP fraction, the larger reduction in OM can result in increased CP concentrations after ensiling, when expressed on an OM basis.

The EE concentrations were significantly higher in the silages than in the pre-ensiled material. Gerlach et al. (2018) demonstrated the same significant increase in the EE concentration for maize before and after ensiling. As EE analyses also account for fermentation acids and other non-triglycerides through extraction (M. Schuster,

personal communication, May 23, 2018; H. Schenkel, personal communication, September 30, 2018), this increase in the silages was expected. However, further study is required as the processes behind the increase have not yet been quantitatively described (Ostertag et al., 2016).

N and P fluxes within the dairy farm are of interest in terms of enhancing the nutrient use efficiency of dairy farming systems. Thus, the P concentrations in our dataset are relevant beyond the perspective of animal nutrition and diet composition. Our dataset showed that the P concentrations were not affected by conservation status. The large variations in mineral concentrations in silages have been discussed in several investigations (McDonald et al., 1991). The level of P in silages from permanent grassland depends on various factors such as botanical composition, harvest time and growth stage (Schlegel et al., 2016). Furthermore, the soils in grasslands on the investigated dairy farms mainly showed a good P supply (optimal to high P content classes in soils) as a result of the long-term fertilisation practices (Köhler et al., 2017). A recent study by Schlegel et al. (2018) showed that in silages, the average macromineral concentration was higher in silage than in the unensiled herbage because of the loss of fermentable carbohydrates. This process explains why the P concentrations tended to increase or remain stable in our study. Therefore, good silage management practices (without silage effluent or spoilage) prevent considerable P losses.

Interesting results were revealed when the ADFom and aNDFom concentrations were compared between the pre-ensiled material and silages. Regarding NDF degradation, structural carbohydrates can be used as substrates for enzymatic hydrolysis during ensiling (McDonald et al., 1991). For both forages, a significant reduction in aNDFom was evident, while ADFom was not affected by the ensiling process. The considerable reduction in aNDFom is obviously related to the depletion of hemicellulose, which is triggered by weak organic acids. The same effect of reduced aNDFom concentrations but stable ADFom concentrations has been described for lucerne and cocksfoot by Nadeau et al. (2000) and Yahaya et al. (2001). Further investigations by Gerlach et al. (2018) confirmed that a considerable depletion of aNDFom was caused by ensiling maize. In the end, this process (causing an increase in OM digestibility) might compensate for the breakdown of sugars (causing a reduction in OM digestibility),

resulting in NEL contents being stable before and after ensiling in grasses, whilst overcompensation (higher NEL values in silages) is likely in maize. This greater aNDFom degradation explains the significant increase in the energy value of maize silage for milk production. An increase in energy (NEL) from fresh to ensiled maize—estimated on the basis of gas production—was determined by Gerlach et al. (2018). In addition, a compensatory supply of carbohydrates through fermentation leads to stable values of the energy contents in grass and maize silages.

The GE values were slightly higher for silages than pre-ensiled material both for grass and whole-crop maize and the NEL results followed a similar pattern. McDonald et al. (1991) discussed several investigations that have also shown higher GE values in well-preserved silages than in fresh forage. At the farm scale, Mayne and Gordon (1986) measured smaller energy losses than DM losses. Considering this evidence from the literature, our data convincingly reflect the situation at the farm scale.

4.6 Conclusions

We showed that DM losses from grass and whole-crop maize forages due to ensiling can be consistently measured by the total-in vs. total-out method, and we also showed that the best silage production methods at the farm scale completely conserve N and P in the feedstuff. Thus, this technique is an appropriate tool to quantify the mass and nutrient flows in this hot spot of the management chain at the farm scale. We highlight the importance of improved measurement systems with digital and automatic weighing equipment to effectively control the best practices for feedstuff management.

Acknowledgements

This study was financed by the Bavarian State Ministry of Food, Agriculture and Forestry as part of the project “Efficient Feed Management and Nutrient Flows on Dairy Farms” (A/08/01). Moreover, Brigitte Köhler would like to thank the H. Wilhelm Schaumann foundation for financial support in the form of a completion grant.

4.7 References

- Bastiman, B., & Altman, J. F. B. (1985). Losses at various stages in silage making. *Research and Development in Agriculture*, 2, 19–25.
- Borreani, G., & Tabacco, E. (2014). Improving corn silage quality in the top layer of farm bunker silos through the use of a next-generation barrier film with high impermeability to oxygen. *Journal of Dairy Science*, 97, 2415–2426. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7632>
- Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., & Muck, R. E. (2018). Silage review: factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101, 3952–3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
- Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (2011). *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*. [Handbook of feed and substrate preservation in practice]. Frankfurt am Main, Germany: DLG-Verlag.
- Chamberlain, T. (2013). Understanding the economics of dairy farming: feed costings. *Livestock*, 18, 158–163. <https://doi.org/10.12968/live.2013.18.5.158>
- Gerlach, K., Pfau, F., Pries, M., Hünting, K., Weiß, K., Richardt, W., & Südekum, K.-H. (2018). Effects of length of ensiling and maturity group on chemical composition and in vitro ruminal degradability of whole-crop maize. *Grass and Forage Science*, 73, 599–609, <https://doi.org/10.1111/gfs.12362>
- GfE (Ausschuss für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) (1995). Zur Energiebewertung beim Wiederkäuer. *Proceedings of the Society of Nutrition Physiology*, 4, 121–123.
- GfE (Ausschuss für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) (2008). New equations for predicting metabolisable energy of grass and maize products for ruminant. *Proceedings of the Society of Nutrition Physiology*, 17, 191–198.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812–818. DOI: 10.1126/science.1185383
- Hoedtke, S. (2010). Proteinabbau und Proteinbewertung in Silagen. VDLUFA-Kongress Kiel, *VDLUFA-Schriftenreihe*, 66, 127–144. <https://www.vdlufa.de/kongress2010/Kongressband2010.pdf>

- Köhler, B., Diepolder, M., Ostertag, J., Thurner, S., & Spiekers, H. (2013). Dry matter losses of grass, lucerne and maize silages in bunker silos. *Agricultural and Food Science*, 22, 145–150. <https://doi.org/10.23986/afsci.6715>
- Köhler, B., Spiekers, H., Kluß, C., & Taube, F. (2017). Leistungen vom Grünland im Futterbaubetrieb – Analyse auf Betriebsebene unter bayerischen Standortbedingungen. *Berichte über Landwirtschaft*, 95, 2–32. <http://dx.doi.org/10.12767/buel.v95i1.138>
- Köhler, B., Südekum, K.-H., Spiekers, H., & Taube, F. (2014). Quantitative Erfassung von Masse- und Stoffströmen im Futterbaubetrieb. VDLUFA-Kongress Hohenheim, *VDLUFA-Schriftenreihe*, 70, 411–415.
- Mayne, C. S., & Gordon, F. J. (1986). Effect of harvesting system on nutrient losses during silage making. 2. In-silo losses. *Grass and Forage Science*, 41, 341–351.
- McDonald, P., Henderson, A. N., & Heron, S. J. E. (1991). *The Biochemistry of Silage*. Marlow, UK: Chalcombe Publications.
- McGechan, M. B. (1990). A review of losses arising during conservation of grass forage. Part 2, storage losses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 45, 1–30. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(05\)80135-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(05)80135-0)
- Mihailescu, E., Murphy, P. N. C., Ryan, W., Casey, I. A., & Humphreys, J. (2014). Nitrogen balance and use efficiency on twenty-one intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. *The Journal of Agricultural Science*, 152, 843–859. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000045>
- Misselbrook, T., del Prado, A., & Chadwick, D. (2013). Opportunities for reducing environmental emissions from forage-based dairy farms. *Agricultural and Food Science*, 22, 93–107. <https://doi.org/10.23986/afsci.6702>
- Nadeau, E. M. G., Russell, J. R., & Buxton, D. R. (2000). Intake, digestibility, and composition of orchardgrass and alfalfa silages treated with cellulase, inoculant, and formic acid fed to lambs. *Journal of Animal Science*, 78, 2980–2989. <https://doi.org/10.2527/2000.78112980x>
- Ostertag, J., Köhler, B., Schneider, D., & Spiekers, H. (2013). Dry matter losses in silage making – comparison of three different methods of detection. In: Rajčáková, L. (Ed.), *Proceedings of 15th International Conference Forage Conservation*, High Tatras, Slovak Republic, 95–96.
- Ostertag, J., Schuster, M., & Spiekers, H. (2016). Untersuchungen zur Vorausschätzung von Silageinhaltsstoffen aus dem Siliergut. VDLUFA-Kongress Rostock, *Kurzfassungen der Referate [abstracts of presentations]*, 90.

- Pahlow, G. (2007). Grundlagen und Grundsätze der Silierung [Basics and principles of ensiling]. *Übersichten zur Tierernährung*, 35, 1–11.
- Pahlow, G., & Muck, R. E. (2009). Managing for improved aerobic stability. In: Broderick, G. A., Adesogan, A. T., Bocher, L. W., Bolsen, K. K., Contreras-Govea, F. E., Harrison, J. H., & Muck, R. E. (Eds.), *Proceedings of the XV International Silage Conference*, Madison, USA, 77–90.
- Pauly, T., & Wyss, U. (2019). Efficacy testing of silage additives - methodology and existing schemes. *Grass and Forage Science*, 74(2), 201–210. DOI: 10.1111/gfs.12432.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Richter, W., Zimmermann, N., Abriel, M., Schuster, M., Kölln-Höllrigl, K., Ostertag, J., Meyer, K., Bauer, J., & Spiekers, H. (2009). Hygiene bayerischer Silagen: Validierung einer Checkliste zum Controlling am Silo. *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Schriftenreihe*, 09, 130 p.
- Robinson, P. H., Swanepoel, N., Heguy, J. M., Price, T., & Meyer, D. M. (2016). “Shrink” losses in commercially sized corn silages piles: Quantifying total losses and where they occur. *Science of the Total Environment*, 542, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.090>
- Rotz, C. A., Oenema, J., & Van Keulen, H. (2006). Whole farm management to reduce nutrient losses from dairy farm: A simulation study. *Applied Engineering Agriculture*, 22, 773–784.
- Schlegel, P., Wyss, U., Arrigo, Y., & Hess, H.-D. (2016). Mineral concentrations of fresh herbage from mixed grassland as influenced by botanical composition, harvest time and growth stage. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.06.022>
- Schlegel, P., Wyss, U., Arrigo, Y., & Hess, H.-D. (2018). Changes in macro- and micromineral concentrations in herbage during the harvesting and conservation processes. *Grass and Forage Science*, 73, 918–925. <https://doi.org/10.1111/gfs.12382>
- Spiekers, H., Ostertag, J., Meyer, K., Bauer, J., & Richter, W. I. F. (2009). Managing and controlling silos to avoid losses by reheating of grass silage. In: Broderick, G. A., Adesogan, A. T., Bocher, L. W., Bolsen, K. K., Contreras-Govea, F. E., Harrison, J. H., & Muck, R. E. (Eds.), *Proceedings of the XV International Silage Conference*, Madison, USA, 317–318.

- Taube, F., Gierus, M., Herrmann, A., Loges, R., & Schönbach, P. (2014). Grassland and globalization – challenges for northwest European grass and forage research. *Grass and Forage Science*, 69, 2–16. <https://doi.org/10.1111/gfs.12043>
- Udén, P. (2018). Fresh and ensiled forage plants – total composition, silage losses and the prediction of silage composition from the crop. *Grass and Forage Science*, 73, 420–431. <https://doi.org/10.1111/gfs.12328>
- VDLUFA (2012). VDLUFA-Methodenbuch, Bd. III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. 8. Ergänzungslieferung. Darmstadt, Germany: VDLUFA-Verlag.
- VDLUFA (2016). Arbeitspapier zur Bestimmung der Messunsicherheit für die NIRS-Analytik. Retrieved from <https://www.vdlufa.de/de/>
- Watson, S. J., & Nash, M. J. (1960). *The conservation of grass and forage crops*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 758 p.
- Weißbach, F., & Kuhla, S. (1995). Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfutter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur [Substance losses in determining the dry matter content of silage and green fodder: arising errors and possibilities of correction]. *Übersichten Tierernährung*, 23, 189–214.
- Weißbach, F., Schmidt, L., Peters, G., & Hein, E. (1974). Method of anticipation of the run fermentation in silage making, based on the chemical composition of the green fodder. *Proceedings of the XII International Grassland Congress, Sec. 2*, Moscow, USSR, 663–673, cited in: DLG 2011.
- Wilkinson, J. M. (2011). Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal*, 5, 1014–1022. <https://doi.org/10.1017/S175173111100005X>
- Wilkinson, J. M., & Davies, D. R. (2013). The aerobic stability of silage: key findings and recent developments. *Grass and Forage Science*, 68, 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00891.x>
- Wilkinson, J. M., & Toivonen, M. I. (2003). *World silage: a survey of forage conservation around the world*. Lincoln, UK: Chalcombe Publications.
- Yahaya, M. S., Kimura, A., Harai, J., Nguyen, H. V., Kawai, M., Takahashi, J., & Matsuoka, S. (2001). Effect of length of ensiling on silo degradation and digestibility of structural carbohydrates of lucerne and orchardgrass. *Animal Feed Science and Technology*, 92, 141–148. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00265-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00265-6)

Zimmer, E. (1980). Efficient silage systems. *Proceedings of the British Grassland Society Occasional Symposium No 11*, Brighton, UK, 186–197.

Kapitel 5

Generaldiskussion

5 Generaldiskussion

5.1 Einleitung

Milchvieh-/Futterbausysteme zeichnen sich durch sehr komplexe Nährstoffflüsse aus, die zur Verbesserung der Ressourcennutzungseffizienz genauer zu beleuchten sind. Nährstoffkreisläufe optimieren, Nährstoffverluste begrenzen und negative Umwelteffekte vermeiden: Dies sind die konkreten Anforderungen, die an eine nachhaltige Landbewirtschaftung gestellt werden (Misselbrook et al., 2013; Taube et al., 2014). Vor dieser Herausforderung steht insbesondere die Futterproduktion, denn das Grobfutter liefert den größten Anteil an der Futterversorgung für Rinder. Dennoch hat sich in der Praxis bisher kein gängiges Erfassungssystem für Massen und Qualitäten beim Grobfutter etabliert, mit dem betriebsbezogen und kontinuierlich die notwendigen Daten ermittelt werden können. Dabei ließen sich mit diesen Daten erhebliche Reserven für eine effiziente Futterwirtschaft ableiten, um Nährstoffflüsse im Sinne einer hohen Futternutzungseffizienz optimal auszurichten. Diese Potenziale wurde mit der vorliegenden Arbeit mittels eines quantitativen Forschungsansatzes untersucht. Dabei wurde insbesondere das Grünland der Milchvieh-/Futterbaubetriebe umfassend analysiert, da es aufgrund seines hohen Flächenanteils mit 28,5 % der LN in Deutschland (Destatis, 2021) eine wichtige Ressource für die Milchviehfütterung darstellt, bisher aber nur sehr wenig Ertragsdaten aus der Praxis vorliegen. Die grünlandbasierte Milchproduktion hat eine hohe Bedeutung für Milchvieh-/Futterbausysteme, da das Verdauungssystem der Wiederkäuer optimal an die Verwertung von Grasprodukten angepasst ist (Spiekers & Ettle, 2020). Da der Großteil des Grobfutters aus Gras und Mais über die Silierung bereitgestellt wird, wurden die Nährstoffströme vom Feld bis zum Silo anhand von Praxisdaten untersucht, um Masse- und Nährstoffverluste innerhalb der Prozesskette herauszuarbeiten.

In der vorliegenden Arbeit wurde den Fragen nachgegangen,

- ob durch eine systematische Quantifizierung im Futterbaubetrieb ein Kontrollsystem für Grobfuttermassen in der Praxis aufgebaut werden kann, mit dem neben der FUE auch Ansätze zur Erhöhung der NUE in Milchvieh-/Futterbausystemen verfolgt werden können.

- ob sich mittels kleinräumiger Ertrags- und Futterqualitätsdaten vom Grünland eine standortangepasste und schlagspezifische Nutzungsintensität in der Praxis ausrichten lässt, die zu einer optimierten und umweltverträglichen Nutzung des Ertrags- und Rohproteinpotenzials führt.
- wie hoch die Masse- und Qualitätsverluste von Gras- und Maissilagen entlang der gesamten Futterproduktionskette vom Feld bis zum Trog sind.

Um die Leistungen des Grünlands unter einer praxisüblichen Bewirtschaftung zu beurteilen, wurde erstmals eine vollständige Ertragsanalyse vom Grünland unter bayerischen Standortbedingungen auf Betriebs- und Schlagebene durchgeführt. Anhand der dabei erhobenen Ertrags- und Qualitätsdaten wurden die Nährstoffzu- und abfuhr für das Grünland auf Betriebsebene bilanziert. Aus den Ergebnissen, die im Kapitel 2 dargestellt sind, konnten Schlussfolgerungen für eine verbesserte Bewirtschaftung betreffend Düngung, Nutzungsintensität und Nachsaaten des Grünlands abgeleitet werden. Die Ertragsdaten wurden zusätzlich zur Parametrisierung des Simulationsmodell FOPROQ eingesetzt, um mittels weiterer Simulationsläufe die Ertragsstabilität des Grünlands zu beurteilen und die Anwendung des Modells unter den Umweltbedingungen des süddeutschen Raums zu testen.

Der Frage, wie hoch Masse- und Nährstoffverluste im Silo bei Gras- und Maissilagen unter Praxisbedingungen sind, wurde in den weiteren Studien nachgegangen (Kapitel 3 und 4). Dafür wurde ein Erfassungssystem nach der Total-in-Total-out-Methode konzipiert, mit dem an definierten Mess- und Beprobungsstellen Mengen, Trockenmasse und Nährstoffgehalte erhoben wurden (Kapitel 3). Die Erfassungsmethode ist so konzipiert, dass sie sich direkt als Hilfsinstrument in der Praxis einsetzen lässt. In der nachfolgenden Studie (Kapitel 4) wurden – auf Basis der erfassten Futtermengen – die Veränderungen in den Nährstoff- und Energiegehalten bei den Silagen untersucht, um Aussagen zu möglichen Verlusten im Futterwert zu treffen bzw. das Auftreten von N- und P-Verlusten und den damit im Zusammenhang stehenden möglichen negativen Umwelteffekten, die die Futterwirtschaft verursacht, zu beurteilen. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Studien zu den Futterströmen entlang der Kaskade vom Feld bis zum Tier diskutiert.

5.2 Zusammenfassende Darstellung und Einordnung der Untersuchungsergebnisse

Für die Untersuchungen wurde an fünf bayerischen Milchvieh-/Futterbaubetrieben die Futterproduktion unter praxisüblicher Bewirtschaftung analysiert, um Aussagen zu den Masse- und Nährstoffströmen zu treffen. Dazu wurde vom Grünland auf Schlagebene eine Ertrags- und Nährstoffanalyse durchgeführt. Mit weiteren Messungen wurden die zu silierenden Futterflächen (Gras, Klee gras und Silomais) vom Feld bis zum Trog untersucht. Auf Siloebene wurden die Erntemengen und Nährstoffgehalte — vor und nach dem Silieren — erfasst und analysiert, um Veränderungen durch den Silierprozess festzuhalten und mögliche umweltrelevante N/P-Verluste bei Silagen zu ermitteln. Zusammenfassend sind aus den Untersuchungen folgende Ergebnisse und Folgerungen festzuhalten:

- Intensiv bewirtschaftete Grünlandflächen (4 bis 5 Schnitte) wiesen eine weitgehend hohe Ertragsstabilität auf. Dennoch zeigte sich eine hohe Variabilität in den Ernteerträgen in Abhängigkeit von Standort, Bewirtschaftung und Jahr. Diese Variabilität wurde mit zwei Methoden festgestellt: Ertragsanalyse (quantitative Messung) und Ertragssimulation (FOPROQ-Modell). Dabei zeigte die Ertragsanalyse, dass bereits auf Schlagebene hohe Ertragsspannen auftraten.
- Mehrere der vorliegenden Umwelt- und Bewirtschaftungsfaktoren hatten einen Einfluss auf die Ernteerträge der intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen. Darauf kann der Landwirt insbesondere über die Schnittintensität und die N-Düngung Einfluss nehmen.
- Die Produktivität der intensiv geführten Grünlandbestände reichte im vierjährigen Mittel von 65 bis 97 dt TM/ha. Durch die Einhaltung früher Schnittzeitpunkte wurden im Mittel optimale Rohproteingehalte von 16 bis 18 % erzielt.
- Die gemessenen Ernteerträge lagen zumeist unterhalb der zu erwartenden Ertragsniveaus, die nach der DüV (BMJ, 2017) zur Ermittlung der Stickstoffbedarfswerte herangezogen werden. Gleichzeitig verdeutlicht die hohe Ertragsvarianz in der Praxis, dass ein einzelner Bewirtschaftungsfaktor wie z. B. die Schnittintensität nicht ausreicht, um eine standortbezogene

Ertragsschätzung abzuleiten. Eine entzugsgerechte Düngebedarfsermittlung ist erst auf Basis schlagbezogener Ertragsdaten möglich. Damit lassen sich Ansätze für eine optimale Nutzung (TM, Rohprotein, Energie) des Grünlands unter Einhaltung ausgeglichener Salden verfolgen und eine optimale Nährstoffverteilung im Futterbaubetrieb umsetzen.

- Zur Ermittlung von TM-Verlusten bei Silagen – vom Feld (Einlagerungsmenge) bis zum Silo (Auslagerungsmenge) – wurde eigens ein Verfahren konzipiert: Mit der Total-in-Total-out-Methode können Mengenflüsse in der Praxis kontrolliert werden. Gleichzeitig lassen sich mit Hilfe von Kennwerten aus dem "Controlling am Silo" (Richter et al., 2009) Verfahrensabläufe im Futterbaubetrieb optimieren.
- Die TM-Verluste lagen im Mittel mit 9 % bei Gras- und 7 % bei Maissilagen auf einem niedrigen Niveau. Zwischen den einzelnen Silos traten jedoch große Streuungen auf. Durch ein begleitendes Silocontrolling sollte verstärkt auf die Zusammenhänge zwischen Verdichtung, Vorschub und Nacherwärmung geachtet werden. Insbesondere der Vorschub hatte einen signifikanten Einfluss auf die TM-Verluste. Die Ergebnisse zeigen, dass die Masseverluste in der Praxis durch ein gutes Silagemanagement unter 8 % gehalten werden können. Dieser Wert wird als Benchmark festgelegt.
- Bei Einhaltung optimaler Siliervorgänge kommt es durch den Silierprozess nicht zu signifikanten Veränderungen in den N- und P-Gehalten bei Gras- und Maissilagen. Auf Praxisebene wird deshalb angenommen, dass bei einer guten Silierpraxis neben den unvermeidbaren Verlusten keine weiteren Verluste bei Stickstoff und Phosphor in Gras- und Maissilagen auftreten.
- Durch den Silierprozess kommt es bei Gras- und Maissilagen zu Veränderungen im Futterwert. Während sich die ADFom-Gehalte nicht wesentlich veränderten, war in den aNDFom-Gehalten ein signifikanter Abbau festzustellen. Durch die organischen Säuren, die während des Gärprozesses entstehen, werden Hemizellulosen zu leicht löslichen Kohlenhydraten (Zuckerfraktionen) abgebaut. Diese leicht löslichen Fraktionen stellen wiederum die benötigte Energie für die Umbauprozesse während der Silierung bereit, was sich in stabilen bzw. erhöhten Energiegehalten in den Gras- bzw. Maissilagen

widerspiegelt. Insgesamt sichert die Einhaltung einer guten Silierpraxis hochwertiges Futter (Silagen) und vermeidet zusätzliche N/P-Verluste in die Umwelt.

- Grundsätzlich bestätigen die Ergebnisse, dass in der Mengenerfassung ein wesentlicher Ansatz zur Optimierung des gesamten Futtermanagements im Betrieb liegt. Trotz einiger Ungenauigkeiten in der quantitativen Erfassung, die überwiegend methodisch bedingt sind, konnten die Betriebe anhand der Daten Optimierungsmaßnahmen ableiten. Um die Futterströme genauer erfassen zu können, müssen mehr praktikable Lösungen zur Messung der Trockenmassen und Inhaltsstoffe (Rohprotein etc.) über automatisierte und sensorgestützte Techniken an Maschinen entwickelt werden.

5.3 Futtermengen im Futterbaubetrieb – Kaskade vom Feld bis zum Tier

Um die biologischen und verfahrenstechnischen Prozesse vom Feld bis zum Trog optimal zu steuern, sollten innerbetriebliche Futterströme kontinuierlich erfasst, quantifiziert und bewertet werden. Für die Silierpraxis existieren bereits Zielwerte, um optimale Futterqualitäten zu erreichen (DLG, 2011; Spiekers & Brandl, 2018). Das Defizit besteht vielmehr in einer fehlenden Mengen- und Qualitätserfassung in der Futterwirtschaft (Spiekers, 2012; Spiekers & Ettle, 2020). Die vorliegenden Untersuchungen setzen daher an einer quantitativen Stoffstromanalyse an, die Futterverluste bei Silagen unter praxisüblichen Bedingungen entlang der definierten Kaskade vom Feld bis zum Tier beziffert und Verlustpfade beleuchtet.

Die Erfassung der Futtermengen für den Betrieb beginnt im Wesentlichen mit den Ernteerträgen, die auf Schlagebene erhoben werden sollten. In der Praxis ist die Ermittlung von **Feldverlusten**, die Rückschlüsse auf den potenziellen Pflanzenaufwuchs zulassen, sehr schwierig. Feldverluste sind stark abhängig von Witterung, Material und Technikeinsatz und schwanken daher erheblich. Vor allem bei der Silagebereitung werden die Feldverluste im Wesentlichen durch den TM-Gehalt des Ernteguts beeinflusst (Honig, 1977). ROTZ (1994) beziffert Feldverluste bei der Silageproduktion im Mittel mit 12 % an TM bei Gras und gibt dabei eine Spanne von 5 bis 33 % an TM-Verlusten an. In den vorliegenden Untersuchungen wurde für die

Grassilageerzeugung ein Feldverlust von 9 % an TM angesetzt, der bei guter Silierpraxis einem mittleren Wert entspricht (LfL, 2006). Über eine optimale Verfahrensplanung können Feldverluste gering gehalten werden.

Der **Ernteertrag** liefert als zentrale Steuerungsgröße im Futterbaubetrieb die notwendigen Informationen, um das gesamte Produktionsverfahren, vor allem das Düngemanagement auf eine ressourcenschonende Nutzung auszurichten. Die im Kapitel 5.4 angesprochene hohe Variabilität in den Ernteerträgen unterstreicht die Bedeutung der einzelbetrieblichen, auf Schlagebene abgegrenzten Ertragsermittlung, auf deren Basis eine entzugsorientierte Düngung durchzuführen ist. Denn die Variabilität zeigt deutlich, dass das Ertragspotenzial von Einzelflächen allein über Faustzahlen nicht ausreichend genau ermittelt werden kann. Auch die Düngebedarfsermittlung sollte auf Basis von einzelbetrieblichen Ertragsdaten erfolgen, was nach Regelung der geltenden DüV möglich ist (BMJ, 2017). Während sich vor allem das Ausmaß von Futtermittelimporten negativ auf die N-Salden von Futterbaubetrieben auswirkt, zeigen Untersuchungen, dass sich durch ein angepasstes, entzugsorientiertes Düngemanagement N-Überschüsse reduzieren lassen (Taubе & Kelm, 2006; Oenema, 2013).

Von den Ertragsdaten pro Fläche lassen sich die Futtermengen je Lagereinheit, die Einlagerungsmenge, dokumentieren. In den vorliegenden Untersuchungen konnten mit der Total-in-Total-out-Methode die **Einlagerungs- und Auslagerungsmengen** im Silo so genau gemessen werden, dass Lagerverluste im Silo unter praxisüblichen Bedingungen ermittelt wurden (Kapitel 3 und 4). Im Mittel liegen die **TM-Verluste** mit 9 % bei Gras- und 7 % bei Maissilagen nahe an jenem Optimum, das ZIMMER (1980) als unvermeidbare Energieverluste (total < 7 %) durch Restatmung und Fermentation definierte. Die Praxissilos zeigten allerdings auch eine sehr hohe Streuung der TM-Verluste (–4,5 % bis 21,9 % TM bei Grassilagen; –5,5 % bis 15,0 % TM bei Maissilagen). Um Ursache und Ort des Verlustgeschehens zu erfassen, sind die in den Leitlinien zur guten fachlichen Praxis der Silierung (DLG, 2011) erarbeiteten Kennwerte für das Siliermanagement heranzuziehen. BORREANI et al. (2018) haben in einer Übersichtsstudie gezeigt, dass die Unterschiede in den Silageverlusten – vom Einsilieren bis zur Entnahme aus dem Silo – bei einem guten Siliermanagement nur rund 8 %, und bei einem weniger guten dagegen rund 31 % betragen können. Diese

Unterschiede verdeutlichen, wie wichtig ein optimales Siliermanagement für eine verlustarme Futtergewinnung ist.

In der Futterkonservierung haben sich Untersuchungsmethoden wie Laborsilos und Bilanznetze etabliert, mit denen sich das Verlustgeschehen im Silo weiter eingrenzen lässt, sodass Verlustfaktoren gezielt identifizieren werden können (Borreani et al., 2018). Dagegen werden mit der Total-in-Total-out-Methode alle Siloverluste erfasst, die während des Silier- und Entnahmeprozesses auftreten. Dabei spielt auch die aerobe Stabilität von Silagen eine wichtige Rolle, da sich physikalische Faktoren und Fehler im Siliermanagement bei den Silagen gerade in der Entnahmephase bemerkbar machen (Wilkinson & Davies, 2013). Eine ausreichende Dichte im Silostock hat bei Silagen mit TM-Gehalten von mehr als 35 % den größten Einfluss auf die TM-Verluste (Wilkinson & Muck, 2019). Die Total-in-Total-out-Methode ermöglicht ein Controlling des betrieblichen Siliermanagements, indem Schwachstellen im Betriebsablauf aufgedeckt und Maßnahmen zur Verbesserung der Silierpraxis ergriffen werden. So wurde über die Gesamtmengenerfassung im Silo (Kapitel 4) eine Korrelation zwischen TM-Verlust und Vorschub festgestellt ($r = -0,274$ ($P < 0,05$)). Die hohen Streuungen bei den TM-Verlusten, die unter Praxisbedingungen auftraten (Kapitel 3; Kapitel 4) zeigen, dass es Verbesserungsoptionen im Management gibt. So gewährleistet eine fundierte Futtermengenerfassung einen ausreichenden Vorschub entsprechend des Futterbedarfs der Tiere. Auch SPÖRNDLY (2018) schlussfolgert aus seiner Untersuchung, es müsse mehr auf die Bedingungen während der Entnahmephase geachtet werden, da diese einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Ausmaß an TM-Verlusten habe. Wird in der Praxis auf ein konsequentes und genaues Messen geachtet, kann mit der angewandten Methode eine relativ hohe Genauigkeit in der Mengenerfassung erzielt werden.

Bei der Ermittlung der TM-Gehalte bei den Silagen kann es bei der Probenahme am Siloanschnitt auch zu messbedingten Abweichungen kommen. Häufig liegt die Fehlerquelle in einem zu geringen Stichprobenumfang (fehlende Repräsentativität) oder in abweichenden TM-Gehalten durch mögliche Witterungseinflüsse an der Anschnittsfläche im Silo. In den vorliegenden Untersuchungen wurde durch die Systematik der Probenahme eine hohe Repräsentativität in der TM-Ermittlung gewährleistet (Grassilos CV = 23 %, Maissilos CV = 10 %). Trotzdem traten bei

einzelnen Praxissilos positive Salden bei der Ermittlung der TM-Verluste auf. Sie sind auf mögliche Witterungseinflüsse am Anschnitt zurückzuführen. Auch SPÖRNDLY (2018) erklärt das Vorkommen positiver Salden mit einem Wassereintritt an der Anschnittsfläche. Um solche messbedingten Fehler zu vermeiden, empfiehlt sich eine laufende Messung des TM-Gehaltes mit Hilfe automatisierter Techniken im Gutstrom am Feldhäcksler bzw. am Futtermischwagen.

Durch den Silierprozess kommt es neben den Masseverlusten auch zu Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Futters. Welche Auswirkungen die Silierung auf den Futterwert von Silagen hat, ist aufgrund der zahlreich vorhandenen epiphytischen Mikroorganismen nach wie vor schwer zu bestimmen (Gerlach, 2020). Anhand der Untersuchungsergebnisse auf Siloebene zu den Nährstoffgehalten bei Gras- und Maissilagen lässt sich folgern, dass es bei Einhaltung einer guten fachlichen Silierpraxis nicht zu wesentlich mindernden Änderungen im Futterwert kommt (Kapitel 4). Durch die Silierung wird organische Masse abgebaut, was sich bei den Grassilagen stärker zeigte als bei den Maissilagen. Ebenso finden proteinabbauende Prozesse (Proteolyse und Desmolyse) statt, die zu Veränderungen in den Rohproteinfraktionen führen und deren Ausmaß von mehreren Faktoren abhängig ist (Hoedtke et al., 2010).

Bei den Grassilagen kam es durch den höheren Anteil flüchtiger N-Komponenten an den NPN-Verbindungen zu einem stärkeren Proteinabbau als bei den Maissilagen. Jedoch hatte sich der Rohproteingehalt bei beiden Silagen durch die Silierung nicht signifikant verändert. Hingegen war ein deutlicher Abbau in den NDFom-Gehalten bei Gras- (11 %) und Maissilagen (15 %) zu erkennen, während die ADFom-Gehalte bei beiden Silagen unverändert blieben. Denn pflanzeneigene Enzyme bauen Hemizellulosen zu leicht löslichen Kohlenhydraten ab, die dann für die Umbauprozesse (Proteolyse) während der Silierung als Substratquelle genutzt werden. Dies spiegelt sich auch in den weitgehend stabilen Energiegehalten bei den Grassilagen ($\approx 6,0$ MJ NEL/kg TM) bzw. sogar in einem leichten Anstieg bei den Maissilagen ($\approx 6,9$ MJ NEL/kg TM) wider. Diese positive Wirkung auf den Futterwert bei Silagen durch die Kompensation im Abbau von Kohlenhydraten wurde in mehreren Versuchsergebnissen diskutiert (Kapitel 4). MAYNE & GORDON (1986) stellten bei Silagen auf der Praxisebene ebenfalls geringere Energieverluste als

Trockenmasseverluste fest. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass bei der Produktion von Silagen unter optimalen Silierbedingungen qualitativ hochwertige Futtermittel weitgehend verlustarm erzeugt werden können. Aus den quantitativen Analysen der TM-Verluste bei Gras- und Maissilagen wurde ein Wert von 8 % TM-Verlust als Benchmark abgeleitet, der als Zielwert für ein optimales Siliermanagement in der Praxis angestrebt werden sollte.

Geht es um die Nachhaltigkeitsbewertung von Milchvieh-/Futterbausystemen, sind die Stickstoff- und Phosphorflüsse besonders zu berücksichtigen. Da ein überwiegender Teil des Grobfutters über Silagen bereitgestellt wird, können die Verlustpfade entlang der Futterkette vom Feld bis zum Trog im System erheblich sein. Anhand der vorliegenden Untersuchungen der Masse- und Nährstoffströme konnten zusätzlich zu den silierbedingten TM-Verlusten keine erhöhten Stickstoff- und Phosphorverluste über den Silierprozess festgestellt werden. Die Nährstoffanalysen der Silagen ergaben keine signifikanten Veränderungen in den N- und P-Gehalten durch die Silierung. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass unerwünschte Prozesse während der Silierung nicht nur zu Futterwertverlusten, sondern auch zu einer erhöhten Bildung klimarelevanter Gase (Buttersäuregärung führt zu erhöhter Methanbildung) führen können (Van Schooten & Philipsen, 2012; Schmithausen et al., 2022).

Um die Eiweißversorgung aus dem Grobfutter zu verbessern, kann über den Ernte- und Silierprozess durchaus steuernd auf die Eiweißqualität eingewirkt werden. Untersuchungen von EDMUNDS et al. (2014) haben gezeigt, dass Feldliegezeiten die Proteinqualität beeinflussen. So lässt sich durch schnelleres Anwelken mit höheren Anwelkgraden (> 50 % TM) der Anteil an pansenstabilem Protein (UDP) erhöhen. Hohe Grobfutterleistungen sind nach wie vor ein entscheidender Faktor, um die Effizienz in der Milchviehfütterung zu verbessern. So zeigen z. B. die Studien von RANDBY et al. (2012) und ALVAREZ et al. (2022), dass auch bei nur geringer Kraftfutterergänzung hohe Milchleistungen erzielt werden können, wenn hochwertige Grassilagen verfüttert werden. Auch die Versuchsergebnisse aus dem Verbundprojekt „optiKuh“ bestätigen, dass mit einer höheren Energiedichte im Grobfutter Kraftfuttermengen – vor allem bei einem niedrigeren Kraftfutterniveau (150 g/kg ECM) – kompensiert werden können (Hertel-Böhnke et al., 2018).

Unter den tier- wie futterbedingten Faktoren, die die **Futteraufnahme** der Milchkuh beeinflussen, variieren die Anteile Grob- zu Kraftfutter je nach Leistung, Laktationsstand und Energiedichte (Spiekers et al., 2009). Die kontinuierliche Erfassung der vorgelegten Futtermengen (**Futterangebot**) ermöglicht dem Betrieb, tatsächlich aufgenommene Grobfutter zu ermitteln und so eine genaue Rationskontrolle durchzuführen. Im Rahmen der Gesamtermittlung wurden an zwei Betrieben die Futtermengen der Milchviehherde (Futterangebot abzüglich des Futterrestes) ausgewertet, die über die am Futtermischwagen gespeicherten Futtermengen erfasst wurden (Köhler et al., 2014).

Tabelle 5.1: Futter- und Leistungsdaten der Milchviehherden von zwei Betrieben (ACH und ALM), berechnet auf Basis der erfassten Futterverbräuche in den Jahren 2010 und 2011

Futter- und Leistungsdaten	Einheit	ACH		ALM	
		2010	2011	2010	2011
Milchviehherde	n	172	178	115	121
Milchleistung	kg ECM Kuh ⁻¹ Jahr ⁻¹	9.187	9.072	8.508	8.728
TM-Aufnahme	kg TM Kuh ⁻¹ Tag ⁻¹	19,3	19,1	19,8	20,7
- aus GF ¹	kg TM Kuh ⁻¹ Tag ⁻¹	11,2	10,9	13,8	14,5
- aus KF ²	kg TM Kuh ⁻¹ Tag ⁻¹	8,2	8,2	6,0	6,2
GF-Aufnahme	dt TM Kuh ⁻¹ Jahr ⁻¹	41	40	51	53
KF-Einsatz ³	dt TM Kuh ⁻¹ Jahr ⁻¹	30	30	22	23
KF-Einsatz	g KF kg ⁻¹ ECM	324	330	257	258
Futтереffizienz	kg ECM kg ⁻¹ TM	1,3	1,3	1,3	1,3
XP-Aufnahme	kg XP Kuh ⁻¹ Tag ⁻¹	3,0	3,0	2,9	3,1
- aus GF	kg XP Kuh ⁻¹ Tag ⁻¹	1,0	1,0	1,5	1,7
- aus KF	kg XP Kuh ⁻¹ Tag ⁻¹	1,9	2,0	1,5	1,4
GFL I ⁴	kg ECM Kuh ⁻¹ Jahr ⁻¹	2.510	2.240	4.351	4.960
GFL II ⁵	kg ECM Kuh ⁻¹ Jahr ⁻¹	1.780	1.820	3.507	3.684

¹Grobfutter, ²Kraftfutter, ³inklusive Mineralfutter ⁴Grobfutterleistung berechnet aus Energielieferung Grobfutter minus Erhaltungsbedarf; ⁵kraftfutterbereinigte Grobfutterleistung

Obwohl beide Betriebe ein ähnlich hohes Milchleistungsniveau haben, weisen sie in der Rationsgestaltung ein sehr unterschiedliches Verhältnis von Grob- zu Kraftfutter auf (Tab. 5.1). Die Unterschiede liegen in der Grobfutteraufnahme per se und in der Rohproteinversorgung aus dem Grobfutter (ACH: 35 %, ALM: 50-55 %). Beide

Betriebe setzen maisbetonte Rationen (rund 50 % des Grobfutters) ein, jedoch wurde das mögliche Rohproteinpotenzial der Grasprodukte – insbesondere am Betrieb ACH – nicht effektiv genutzt. Hier liegen Reserven in der Fütterung. Würden sie effektiver genutzt, ließen sich der Zukauf von Kraftfutter reduzieren, Futterkosten sparen und schlussendlich Nährstoffimporte in das Futterbausystem vermindern. Das Ergebnis aus dem Controlling der Futtermittelverbräuche führte dazu, dass in den Betrieben an mehreren Stellen Maßnahmen zu Verbesserung der Silagequalität, der Lagerkapazität und der Kraftfutterdosierung ergriffen wurden, die den Futtereinsatz insgesamt optimierten (Köhler et al., 2014). Die Daten über die tatsächlichen Futtermittelverbräuche liefern wichtige Informationen, wo noch betriebliche Reserven für einen effizienteren Futtereinsatz liegen. Damit die Daten über Futtermengen in der Praxis jedoch besser genutzt werden, sollte die auf dem Markt befindliche Agrarsoftware kompatibler bzw. die Datenauslese einfacher gestaltet sein.

Schon mit der Wahl und Ausrichtung eines Futterbausystems werden Weichen für umwelt- und ressourcenschonende Leistungen gestellt, was den ökonomischen Erfolg der Betriebe beeinflusst. Aus diesem Grund sollte der Erhaltungsbedarf anteilig dem Grob- und Konzentratfutter auf Basis des jeweiligen Anteils der Energiebereitstellung in der Ration angerechnet werden (Mues et al., 2021). Denn mit der gängigen Berechnungsmethode der „kraftfutterbereinigten“ Grobfutterleistung aus der BZA wird nur der fehlende Anteil des Energiebedarfs als Restgröße dem Grünland bzw. den Ackerfutterflächen zugerechnet, wodurch insbesondere das Grünland systematisch unterbewertet wird (Spiekers et al., 2009). Dies führt zu falschen Schlussfolgerungen für den Wert des Grobfutters. Jedoch kann mit Hilfe der Futtermengen- und Qualitätserfassung die Energielieferung aus dem Grobfutter (GF I) einzelbetrieblich ermittelt werden. Doch auch bei dieser Methode wird nach wie vor der gesamte Erhaltungsbedarf der Energielieferung aus dem Grobfutter angerechnet (Tab. 5.1). Beiden Methoden liegen daher unzureichende Berechnungsansätze zugrunde. Andere Ansätze zur Berechnung der Flächenleistung (kg ECM/ha) berücksichtigen die Energielieferung aus dem Grobfutter anteilig der Futterflächen, so dass bei der Milchleistung die tatsächliche Energieleistung des Grünlands ausgewiesen werden kann (Leisen et al., 2013). Auch THOMET et al. (2013) haben mit der Futterkonvertierungseffizienz (kg ECM/kg TM Jahresration) und der

Nettoflächenleistung (kg ECM/ha Futterfläche) andere Bewertungsmaßstäbe für Milchproduktionssysteme vorgeschlagen, indem die betriebsfremden Futterflächen mit einbezogen werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass sich mit einzelbetrieblichen Futterdaten effektive Optimierungsmaßnahmen für eine effiziente und ressourcenschonende Milchproduktion ableiten lassen.

Aus den vorliegenden Untersuchungen wurden beispielhaft für das Grünland die TM-Verluste über die gesamte Futterkette – vom Pflanzenaufwuchs bis zur Futteraufnahme – abgebildet (Tab. 5.2). Insgesamt traten bei einer Silageproduktion beim Grobfutter – berechnet für Grassilagen – bei guter fachlicher Praxis vom Feld bis zum Trog TM-Verluste in Höhe von rund 24 % auf. Liegen dem Betrieb diese Zahlen von den einzelnen Verlustpfaden und -orten vor, so kann er das Futtermangement individuell anpassen. In Zukunft wird die Ressourceneffizienz ein wichtiger Gradmesser sein für Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitsbewertungen von Milchviehbetrieben bzw. zur Bewertung von Milchvieh-/Futterbausystemen. Die systemübergreifenden Begriffsdefinitionen in der Futterwirtschaft entlang der gesamten Kaskade vom Feld bis zum Trog helfen dabei eine gemeinsame Bewertungsebene zu etablieren.

Tabelle 5.2: Verluste an Futtermengen (dt TM/ha; % TM) entlang der Kaskade (vom Feld bis zum Trog) ausgehend vom Grünland zur Ermittlung des Futterverbrauchs am Trog (dt TM/ha) anhand der eigenen Studie

Ertrags- und Mengen-ebene ¹	Futter-menge	TM-Verlust	Futter-mengen-erhebung	Grünland nach Ernteertrag ² (dt TM/ha)		Verlustbeschreibung und weitere Verlust-quellen
				von	bis	
Pflanzen-aufwuchs	100	0		71	107	
Ernteertrag	91	-9	eigene Studie: Wiegung auf Schlagebene (Kap. 2)	65	97	<u>Feldverluste</u> 9% TM bei Gras, 7% TM bei Silomais (LfL, 2006); 12% TM inkl. Mähen, Wenden, Schwaden (Rotz, 1994); 6-20% TM für Zetten und Wenden, 2-3% TM 24h-Silage (Demmel et al., 2010)
Einlagerungs-menge	90	(-1)	eigene Studie: Total-in (Kap. 3 u. 4)	64	96	<u>Transportverluste</u> nach Ermittlung der Ernteerträge
Auslagerungs-menge	82	-9	eigene Studie: Total-out (Kap. 3 u. 4)	59	87	<u>Lagerungsverluste</u> (unvermeidbar/vermeidbar) inkl. Verderb. Eigene Studie: mittlere TM-Verluste: 9% Grassilage, 7% Maissilage
Futterangebot	81	(-1)	eigene Studie: (Köhler et al., 2014)	58	87	<u>Entnahmeverluste</u> einschl. Atmungsverluste
Futter-aufnahme	76	-6	eigene Studie: (Köhler et al., 2014)	54	81	<u>Futternvorlageverluste</u> Trogverluste bzw. Futterrest ³ , 5% TM Vorlage-verluste (Steinwider et al., 2017)
Futterverluste ⁴ (dt TM/ha)				-17	-25	
TM-Verluste ⁴ (%)				24		

¹nach Definition (siehe Kapitel 1.3; (DLG, 2016)); ²Spanne der gemessenen Ernteerträge von den untersuchten Betrieben und Abzug der Verluste entlang der Kaskade, ³Trogverluste inkl. des Futterrests; vom Futterrest keine Futterselektion berücksichtigt, ⁴in Bezug auf Grassilagen.

5.4 Produktivität und Leistungen vom Grobfutter im Futterbaubetrieb

Grobfutter leistet den größten Anteil zur Futter- und Nährstoffversorgung für Rinder bzw. Milchkühe. Die Herausforderung für Milchvieh-/Futterbausysteme besteht darin, die Futterproduktion auf eine möglichst hohe Grobfutterverwertung auszurichten, um effizient Milch und Fleisch zu erzeugen (Spiekers & Ettle, 2020). Gleichzeitig sind die Nährstoffflüsse in den jeweiligen Nutzungssystemen so zu steuern, dass negative Effekte auf die ökologischen Funktionen des Grünlands möglichst vermieden werden (Isselstein et al., 2011; Taube et al., 2014). Die Produktivität der Grünland- und Ackerfutterflächen sollte dem Betrieb bekannt sein, damit er das Leistungspotenzial entsprechend effizient und ressourcenschonend nutzen kann. Doch fehlende Ertragsdaten führen häufig zu einer falschen Bewertung der Futterwirtschaft bzw. des gesamten Produktionssystems (Oenema, 2013). Da in der Praxis nur wenige Daten vorliegen, wurde in den Untersuchungen (Kapitel 2) insbesondere die Ertragsleistung vom Grünland unter praxisüblicher Bewirtschaftung analysiert.

Die Analyse der Ernteerträge vom Grünland an den fünf bayerischen Futterbaubetrieben hat aufgezeigt, welche **Variabilität** in diesen Erträgen selbst bei vergleichbaren Bewirtschaftungsniveaus vorherrscht. Die Ernteerträge von intensiv bewirtschaftetem Grünland reichten von 65 bis 97 dt TM/ha im vierjährigen Mittel, wobei die Varianz (CV = 5-15 %) durch mehrere Faktoren beeinflusst wurde. Daraus folgt, dass sich das Ertragspotenzial von Futterflächen nur durch eine kleinräumige und konsequente Erfassung genauer abbilden lässt. Denn aus schlagbezogenen Ertragsinformationen lassen sich weitere Optimierungsmaßnahmen ableiten, insbesondere solche die eine entzugsorientierte Düngebedarfsermittlung ermöglichen. Auch DIEPOLDER et al. (2016) stellen bei dem Ertrags- und Nährstoffmonitoring vom bayerischen Grünland große Streuungen im Ertrag und in den Nährstoffgehalten fest. Die hohe Variabilität zeigt, dass Faustzahlen, die für Nährstoffzu- und -abfuhr zur Düngebedarfsermittlung herangezogen werden, einzelbetriebliche Gegebenheiten und Jahreseffekte nicht wiedergeben können. Die Ergebnisse der Futteranalysen von Grünlandaufwüchsen wiesen sowohl bei den eigenen Analysen auf den fünf Versuchsbetrieben als auch aus dem Monitoring (Diepolder et al., 2016) überwiegend hohe Phosphor- und Kaliumgehalte auf, die eine Überversorgung belegen. Auch die

Bodenwerte für P und K ergaben bei drei der fünf Versuchsbetriebe eine eindeutige Überversorgung (Kapitel 2). Beides weist auf eine langjährige viehintensive Bewirtschaftung des Grünlands hin. Für eine fachgerechte P- und K-Düngung wird empfohlen, neben dem Bodenstatus die Mineralstoffwerte aus der Futteranalyse mit einfließen zu lassen. Langjährige Untersuchungen zur P- und K-Versorgung des Grünlands (Greiner et al., 2014; Schuch et al., 2013; Diepolder & Raschbacher, 2016a) verdeutlichen diese Zusammenhänge. Infolgedessen wurden für die Düngeempfehlung die Richtwerte für Phosphor in allen Boden-Gehaltsklassen abgesenkt (VDLUFA, 2018). Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass auf Basis einzelbetrieblicher Ertrags- und Futteranalysen eine entzugsorientierte Düngebedarfsermittlung umgesetzt und das Düngemanagement somit verbessert werden kann.

Wachstums- und Futterqualitätsmodelle können der Praxis wichtige Ertragsprognosen liefern, damit sie optimale Futterqualitäten erzielen. Anhand der Ertragsdaten aus den vorliegenden Untersuchungen konnten die Parameter des FOPROQ-Modells gut an die bayerischen Standortbedingungen angepasst werden ($R^2 = 0,91$; RMSE = 2,4). Dabei zeigten sich in der langjährigen Ertragssimulation vor allem standort- und jahresbedingte Unterschiede (CV = 15-21 %). Jedoch können auch Ertragsprognosemodelle keine ausreichend genauen Ertragsinformationen auf kleinräumiger bzw. einzelbetrieblicher Ebene liefern. Daraus ergibt sich, dass eine betriebsspezifische Grünlandnutzung nur mit langjährigen Schlagdaten geplant werden kann. So kann es für den Betrieb effizient sein, einerseits Verbesserungsmaßnahmen wie z. B. nachsäen auf ertragreichen Schlägen durchzuführen, aber auch, die Nutzungsintensität auf weniger ertragreichen Schlägen zu reduzieren.

Eine auf Schlagdaten basierende Grünlandbewirtschaftung zeigt in der Praxis das größte Potenzial, die Nutzungseffizienz zu erhöhen und zugleich negative Umwelteffekte zu vermeiden. So hat ein bundesweit an verschiedenen Grünlandstandorten durchgeführter Steigerungsversuch gezeigt, dass unterschiedliche Ertrags- und Rohproteinpotenziale je nach Produktivität des Standortes ausgeschöpft werden können, ohne dass dies den N-Saldo negativ beeinflusst (Herrmann et al., 2014). Für die Düngepraxis ließen sich daraus regionale

Düngeempfehlungen ableiten. Ein solches Vorgehen setzt jedoch voraus, dass fundierte Ertragsinformationen aus der Praxis vorliegen.

Die eigenen Analysen ergaben, dass das Grünland trotz der jahresbedingten Ertragsschwankungen je nach Standort ($CV = 5-15\%$) eine relativ hohe **Ertragsstabilität** aufwies. Um eine Futterversorgung vom Grünland zu sichern und Futterengpässe zu vermeiden ist eine Futterplanung notwendig, die ein verlässliches Mengenerfassungssystem im Betrieb voraussetzt. Die Betriebe stehen zudem vor der zunehmenden Herausforderung, auch in der Futterwirtschaft den Veränderungen durch den Klimawandel zu begegnen. Die Notwendigkeit, die Erträge trotz zunehmender Witterungsextreme auf stabilem Niveau zu halten bzw. Futterbestände toleranter und resilienter zu machen, wird sich wegen der klimatischen Veränderungen verstärken. Untersuchungen über die Auswirkungen von Dürre auf Grünlanderträge belegen, dass Artenmischungen eine höhere Trockenheitstoleranz und -resistenz aufweisen können als reine Grasbestände (Hofer et al., 2016). Dabei ist die Artidentität entscheidend, d. h. dass vor allem Arten mit erwünschten Merkmalen (Leguminosen und Nichtleguminosen) vertreten sind (Hofer et al., 2017). So können Bestände, die aus mehreren funktionellen Gruppen (Gräser, Leguminosen und Kräuter) zusammengesetzt sind, Stressfaktoren wie z. B. Trockenheit besser kompensieren. LORENZ et al. (2020) haben festgestellt, dass in Vielartengemengen durch die unterschiedlichen Wachstumsmuster eine höhere innerjährliche Ertragsstabilität erzielt werden kann. Daher sollten die positiven Effekte solcher Pflanzenartenkombinationen bei der Konzipierung von (Saatgut)-Mischungen stärker berücksichtigt werden (Komainda et al., 2020). Zudem lassen sich bestimmte Leguminosenarten wie Rotklee, Weißklee und Hornklee durch Nachsaaten in Grünlandbeständen erfolgreich etablieren (Techow, 2018). WEGGLER et al. (2020) haben in einer Langzeitbeobachtung zu Leguminosennachsaaten festgestellt, dass TM- und Eiweißerträge mit etablierten Leguminosenanteilen in einer Grünlandnarbe verbessert werden können.

Die Untersuchungen an den bayerischen Futterbaubetrieben ergaben, dass das intensiv bewirtschaftete Grünland ein relativ hohes **Rohproteinpotenzial** aufwies (Köhler et al., 2013). Die mittleren Rohproteinerträge lagen zwischen 11 bis 17 dt/ha (Kapitel 2). Die mittleren Rohproteingehalte (164 bis 178 g XP/kg TM) entsprachen

weitgehend den Leistungsansprüchen für Milchvieh. Der große Einfluss der Schnittfrequenz auf den XP-Gehalt wurde bereits mehrfach untersucht (Hochberg et al., 2013; Diepolder & Raschbacher, 2016b). Schwankungen in den Rohproteingehalten waren auf Jahreseffekte zurückzuführen, die witterungsbedingt durch verspätete Schnittzeitpunkte verursacht wurden.

Die Tierernährung stellt für eine bedarfsgerechte Versorgung hochleistender Tiere hohe Ansprüche an die **Proteinqualität** (Spiekers et al., 2009). So hat die Wahl des Konservierungsverfahrens einen Einfluss auf diese, denn eine schnelle Silierung mit kurzen Feldliegezeiten wirkt sich positiv aus (Edmunds et al., 2014). Auch eiweißreiches Ackerfutter kann die Proteinqualität erhöhen. Futterleguminosen zeichnen sich gegenüber reinen Grasbeständen in der Regel durch höhere Rohproteingehalte aus. Daher sollten Klee gras und Luzerne in Milchviehrationen integriert werden (Spiekers et al., 2011). Futterleguminosen weisen außerdem eine höhere Nutzungselastizität auf, wodurch der Futterwert langsamer sinkt (Lüscher et al., 2014). Zudem enthalten sie sekundäre Inhaltsstoffe wie kondensierte Tannine oder das Enzym Polyphenoloxidase (PPO) wie beim Rotklee. Durch diese Sekundärmetabolite, die je nach Art der Leguminose in sehr unterschiedlichen Konzentrationen vorkommen, besteht ein sog. „Proteinschutz“ vor dem ruminalen Proteinabbau (Loges, 2013) – dem Wiederkäuer steht damit mehr Eiweiß am Dünndarm zur Verfügung. Ausgewählte Kräuter wie die Futterzichorie (*Cichorium intybus*) und der Spitzwegerich (*Plantago lanceolata* L.) können durch ihre hohen Konzentrationen an Gesamtphenolen zu einer verbesserten N-Verwertung beim Wiederkäuer beitragen (Hamacher, 2016). Weitere Untersuchungen der Arbeitsgruppe von Prof. Taube (CAU zu Kiel) ergaben, dass Futterleguminosen und Kräuter in gemäßigttem Grünland einen Beitrag zur Verbesserung der Futterqualität leisten (Hamacher et al., 2021). Insgesamt trägt die effizientere Nutzung des Grobfutterpotenzials des Grünlands und der Ackerfutterflächen mit Klee gras bzw. mit Vielartengemengen zu einer verbesserten heimischen Eiweißversorgung und zusätzlich zu den Ökosystemleistungen wie Ressourcenschutz, Klimaschutz (Minderung der THG-Emissionen) und Biodiversität bei (Suter et al., 2015; Reinsch et al., 2021; Loges et al., 2018).

Die Ergebnisse zu den **Energieerträgen** vom Grünland (Kapitel 2) machten mit einer Spanne von 38.000 bis 63.000 MJ NEL/ha deutlich, dass in der Grobfuttererzeugung noch erhebliche Reserven vorhanden sind. Die Studien von RANDBY et al. (2012) und ALVAREZ et al. (2022) zeigen, dass mit hochwertigen Grassilagen bei einer nur geringen Kraftfutterergänzung hohe Milchleistungen gehalten werden können. Um das Potenzial hoher Grobfutterleistungen besser auszunutzen, sollte eine Bestandesführung mit leistungsfähigen Pflanzenbeständen mehr Beachtung zukommen. Ziel ist es, in der Milcherzeugung die Proteinversorgung aus ökonomischen (Einsparung von Kraftfutter) und ökologischen (Verringerung des Nährstoffimports) Gründen weitgehend über das betriebseigene Grobfutter abzudecken. Die Effizienz von Milchvieh-/Futterbausystemen hängt im starken Maße vom Betriebsmanagement ab, daher ist eine genaue Schätzung der Futtereffizienz im Betrieb erforderlich (Lorenz et al., 2019).

Die N-Effizienz ist ein angemessener Indikator, um die Umweltverträglichkeit der Futterproduktion zu beurteilen. Anhand der **NUE** kann festgestellt werden, ob die Ertrags- und Rohproteinpotenziale eines Standortes bestmöglich genutzt werden. Die NUE kann in die N-Verwertungseffizienz (kg TM/kg N-Düngung) und in das N-Aneignungsvermögen differenziert werden. Letzteres wird Düngemittel betreffend z. B. mithilfe der Differenzmethode ermittelt. Eine geringe N-Effizienz kann auf Schwachstellen in der Bewirtschaftung hinweisen, die auf N-Verluste zurückzuführen sind. So fielen an den fünf Betriebsstandorten trotz ähnlich hoher Nutzungsintensitäten die N-Verwertungseffizienzen mit 30 bis 56 kg TM/kg N-Düngung sehr unterschiedlich aus. Zur Verbesserung der Stickstoffverwertung (optimale Ressourcennutzung) sollten insbesondere Maßnahmen beim Düngen dahingehend umgesetzt werden, dass der N-Saldo der Flächenbilanz nahezu ausgeglichen ist. Dies erfordert zudem leistungsstarke Pflanzenbestände, die das Ertragspotenzial des Standorts optimal ausnutzen.

Laut REINSCH et al. (2018) liegt das größte Minderungspotenzial für Stickstoffverluste im Futterbau in einer bedarfsangepassten Düngung. In einer weiteren Studie zu THG-Emissionen unterschiedlicher Landnutzungssysteme zeigten die Autoren, dass N-Verluste vor allem durch die NH₃-Emissionen bei Lagerung und Ausbringung von Gülle auftreten und dass dieser Verlustpfad je nach System Anteile von 66 % bis

85 % der Gesamt-N-Verluste ausmachen (Reinsch et al., 2021). In der Praxis sollte sich die Handhabung einer verlustarmen Gülleausbringung auf Grünland weiter verbessern, denn mit dem Technikeinsatz sind gleichzeitig negative Effekte auf die Futterhygiene zu vermeiden (LfL, 2021). Als weitere Maßnahme, um NH_3 -Verluste bei der Ausbringung zu verringern, wird zur Absenkung des pH-Wertes die Gülleansäuerung diskutiert (Neumann et al., 2018; Neumann et al., 2019; Nyameasem et al., 2022). Jedoch sind bei der Anwendung von Säuren noch praktische Hürden zu überwinden. Grundsätzlich wird es für Milchvieh-/Futterbaubetriebe aufgrund der europäischen Vorgaben im Rahmen der EU-NERC-Richtlinie unerlässlich sein, NH_3 -Emissionen weiter zu mindern (Häußermann et al., 2019; UBA, 2020) und auch den Nährstoffimport über zugekaufte Futtermittel möglichst gering zu halten (Spiekers & Schneider, 2019; Spiekers & Ettle, 2020).

Die Integration von Leguminosen in Futterbausystemen bietet große Potenziale zur Reduktion von THG-Emissionen, da sich der geringere Zukauf von N-Dünger auf betrieblicher Ebene positiv bemerkbar macht (Reinsch et al., 2021). Jedoch fordern REINSCH et al. (2021) weitere Maßnahmen auf Systemebene, um höhere Stickstoffeffizienzen zu erreichen: So würden verschiedene Landnutzungssysteme, die anhand von Ökoeffizienzkriterien verglichen wurden, verdeutlichen, dass ein Futterbausystem mit Vollweide und integriertem Klee-grasanbau, welches zusätzlich in ein Ackerbausystem integriert wird, eine stärkere Reduktion in der produktbezogenen Bewertung (Carbon- und N-Footprint je kg erzeugter Milch) erziele. Ausschlaggebend hierfür sei der positive N-Carry-Over-Effekt, der durch die Integration der Klee-grasflächen in eine Marktfrucht-Fruchtfolge die Ressourcennutzungseffizienz erhöhe.

5.5 Optimierungsansätze und Ausblick

Die vorliegende quantitative Analyse des Grobfutters in Milchvieh-/Futterbaubetrieben hat bestätigt, dass in der Praxis hohe Variabilitäten in Ernteerträgen und Futterverlusten auftreten. Optimierungsmaßnahmen könnten nur mit einzelbetrieblichen, kleinräumig erhobenen Daten erzielt werden. So ist vor allem eine entzugsorientierte Düngepraxis nur auf Basis gemessener, möglichst schlagbezogener Ernteerträge realisierbar. Die Voraussetzungen dafür sind gegeben,

denn zur Erfassung der Nährstoffströme steht der Praxis bereits automatisierte, sensorgestützte Ertragserfassung an Erntemaschinen zur Verfügung, die die Handhabung konsequenter Messungen erheblich erleichtern würde, auch wenn ein gewisser Zeit- und Kostenaufwand einkalkuliert werden müsste. Allerdings müssen für den Datentransfer von der Maschine zu den Farm-Management-Systeme noch praxistaugliche Lösungen gefunden werden (Worek & Thurner, 2022).

Die Fortschritte in der Nahinfrarot(NIR)-Technologie werden die Möglichkeiten zur Kontrolle von Futter- und Nährstoffströmen weiter verbessern, und damit insbesondere zu einer effizienteren organischen Düngung beitragen (Gandorfer et al., 2019). Schon jetzt bieten mehrere Landmaschinenhersteller Online-Analysen von Inhaltsstoffen mittels NIR-Technik an. Derzeit wird im Bereich der Futterpflanzen an der Bestimmung der Inhaltsstoffe XA, XF, XP, ADF, NDF, Zucker und Stärke gearbeitet, wobei es bei einzelnen Parametern noch zu größeren Abweichungen in der Analytik kommt (Worek & Thurner, 2022). Die weitere Entwicklung könnte ermöglichen, dass Daten aus der Echtzeitmessung an Erntemaschinen direkt zur Prozesssteuerung genutzt werden, z. B. beim Siliermitteleinsatz. Darüber hinaus wird geprüft, ob der Einsatz von Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) am Futtermischwagen praktikabel ist, um TM- und Nährstoffgehalte von Silagen während der Futterentnahme zu messen (Mostafa et al., 2020). Dies könnte auch ermöglichen, die im Silo stark schwankenden TM- und Nährstoffgehalte des Grobfutters in der Ration besser anzupassen und die TMR (total mixed ration) stärker auf eine bedarfsgerechte bzw. nährstoffreduzierte Fütterung auszurichten.

Die Ertrags- und Qualitätsermittlung liefert die Basisdaten, um die Effizienz von Futterkonservierungssystemen zu kontrollieren (Gerlach, 2020). Durch die Ermittlung der Verluste unter Praxisbedingungen können Verlustpfade bzw. lokale Schwachstellen im Betrieb aufgedeckt und daraus wirksame Gegenmaßnahmen abgeleitet werden. Zusätzlich können die Prognosemodelle wie FOPROQ und das seit einiger Zeit praxisreife „Grasprog“ (Vogeler et al., 2023) die landwirtschaftliche Praxis dabei unterstützen, ihr Futtermanagement zum Zeitpunkt der Futterernte optimal auszurichten.

Bei der Futterkonservierung sind vor allem die Feld- und Lagerungsverluste im Blick zu behalten. Für optimale Verfahrensabläufe beim Silieren liegen Richtlinien des

Bundesarbeitskreises der Futter- und Substratkonservierung vor (DLG, 2011). Weitere Entscheidungshilfen für ein wirksames Controlling der Silagewirtschaft liefern darüber hinaus Modelle, die z. B. Nacherwärmungsvorgänge anhand von Temperaturdifferenzen ableiten (Borreani & Tabacco, 2010; Pires et al., 2018). Und mit dem „SiloExpert“-Modell kann die zu erwartende Silagequalität zum Zeitpunkt der Ernte prognostiziert werden, sodass die Futterplanung darauf abgestimmt werden kann (Pickert et al., 2019).

Darüber hinaus stellt sich die Frage, mit welchen Ansätzen die Grobfutterpotenziale in der Milchviehfütterung weiter ausgeschöpft werden können. So besteht Forschungsbedarf zum Proteinumbau während der Silierung (Wilkinson & Muck, 2019). Und in der Tierernährung wird diskutiert, wie der UDP-Anteil erhöht werden kann, um die Stickstoffnutzungseffizienz zu verbessern (Gerlach, 2020). In der Praxis sollte die Analytik zur Rohproteinfraktionierung mehr genutzt werden (Spiekers & Ettle, 2020). Darüber hinaus sollten betriebliche Möglichkeiten einer Beweidung bzw. einer Frischgrasfütterung geprüft werden, um in der Milchviehfütterung möglichst viel Grasprodukte effizient einzusetzen (Spiekers & Ettle, 2020). Futterleguminosen bieten sich als hochwertige Eiweißlieferanten an und können in Vielartengemengen zur Ertragsstabilität beitragen. Auf Systemebene ist ihr Beitrag zur Reduzierung von Nährstoffimporten zu nennen. Eine systemvergleichende Studie zeigt, dass sich die Integration von Klee gras in eine Ackerbaufruchtfolge bei einer mittleren Produktionsintensität positiv auf den CO₂- und N-Footprint der Milcherzeugung auswirkt (Reinsch et al., 2021).

Für die Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitsbewertung von Milchvieh-/Futterbausystemen wird das Ziel, ihre Ressourcennutzung effizienter zu gestalten, schon aufgrund der Umweltrelevanz weiter an Bedeutung gewinnen. Dabei schafft die systemübergreifende Begriffsdefinition in der Futterwirtschaft entlang der gesamten Kaskade vom Feld bis zum Trog die Voraussetzung, eine gemeinsame Bewertungsebene zu etablieren.

5.6 Literatur

- ÁLVAREZ, C., NIELSEN, N. I., WEISBJERG, M. R., VOLDEN, H., EKNÆS, M., & PRESTLØKKEN, E. (2022). High-digestible silages allow low concentrate supply without affecting milk production or methane emissions. *J. Dairy Sci.* 105:3633-3647, <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21479>.
- BMJ [BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ] (2017). Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). Ausfertigungsdatum: 26.05.2017. BMJ (Hrsg.). https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/, [Datum: 24.02.2022].
- BORREANI, G., & TABACCO, E. (2010). The relationship of silage temperature with the microbiological status of the face of corn silage bunkers. *J. Dairy Sci.* 93: 2620-2629. doi: 10.3168/jds.2009-2919.
- BORREANI, G., TABACCO, E., SCHMIDT, R. J., HOLMES, B. J., & MUCK, R. E. (2018). Silage review: factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101, 3952–3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>..
- DEMMELE, M., THURNER, S., & FRÖHNER, A. (2010). Mit neuer Technik Futter- und Substratwirtschaft effizient gestalten. In: Knappe Flächen optimal nutzen, Futter und Substratwirtschaft optimieren. LfL-Jahrestagung 2010, Freising, Schriftenreihe, 35-44.
- DESTATIS [BUNDESAMT FÜR STATISTIK] (2021). Landwirtschaftliche Bodennutzung - Anbau auf dem Ackerland - Fachserie 3 Reihe 3.1.2 (erschienen am 18.06.2021), [Abruf: 07.02.2022].
- DIEPOLDER, M., HEINZ, S., KUHN, G., & RASCHBACHER, S. (2016). Ertrags- und Nährstoffmonitoring Grünland Bayern (2009-2014). In: Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, 60. Jahrestagung Luxemburg, Tagungsband, 19–22.
- DIEPOLDER, M., & RASCHBACHER, S. (2016A). Untersuchungen zu Phosphorgehalten von Grünlandaufwüchsen auf bayerischen Praxisflächen. In: Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, 60. Jahrestagung Luxemburg, Tagungsband, 63–66.
- DIEPOLDER, M., & RASCHBACHER, S. (2016B). Untersuchungen zu Rohproteingehalten und zur Schwefelversorgung von Grünlandaufwüchsen auf bayerischen Praxisflächen. In: Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, 60. Jahrestagung Luxemburg, Tagungsband, 59–62.

- DLG [DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT] (2011). Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. DLG Bundesarbeitskreis Futterkonservierung, DLG-Verlag, Frankfurt a. M., 416 Seiten.
- DLG (2016). Mengenmäßige Erfassung des wirtschaftseigenen Futters. DLG-Merkblatt 416. https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_416.pdf, [Abruf: 31.10.2022].
- EDMUNDS, B., SPIEKERS, H., SÜDEKUM, K., NUSSBAUM, H., SCHWARZ, F. J., & BENNETT, R. (2014). Effect of extent and rate of wilting on nitrogen components of grass silages. Grass and Forage Science, 69, 140-152. <https://doi.org/10.1111/gfs.12013>.
- GANDORFER, M., VINZENT, B., & DEMMEL, M. (2019). Abgestufte Intensitäten in der Futtererzeugung – Möglichkeiten der Digitalisierung. In: Nachhaltigere Tierernährung: Erfolgreiche Fütterung, Ökonomie, Biodiversität und Umwelt im Einklang. 57. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung e.V., Tagungsband, Freising, ISBN 978-3-9816116-6-3, 17–21.
- GERLACH, K. (2020). Forage conservation and ration formulation as trails to improve resource use efficiency in ruminant nutrition. Habilitationsschrift, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, VVB Laufersweiler Verlag Gießen.
- GREINER, B., HERTWIG, F., HOCHBERG, H., PRIEBE, R., RIEHL, G., & SCHUPPENIES, R. (2014). Auswirkungen einer unterlassenen Phosphor- und Kaliumdüngung – Ergebnisse aus sechzehnjährigen Grünlanddüngungsversuchen. In: Multifunktionalität des Dauergrünlandes erhalten und nutzen. 58. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau (AGGF), Arnstadt, 107–110. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2014_greiner_et_al.pdf.
- HÄUßERMANN, U., BACH, M., KLEMENT, L., & BREUER, L. (2019). Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, UBA-Texte 131/2019, 167 Seiten.
- HAMACHER, M. (2016). Potentiale sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe in Futterleguminosen und Wiesenkräutern für eine verbesserte N-Verwertung beim Wiederkäuer. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 118 p.
- HAMACHER, M., MALISCH, C., REINSCH, T., TAUBE, F., & LOGES, R. (2021). Evaluation of yield formation and nutritive value of forage legumes and herbs with potential for diverse grasslands due to their concentration in plant specialized metabolites. European Journal of Agronomy, Volume 128. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126307>.

- HERRMANN, A., TECHOW, A., KLUß, C., TAUBE, F., BERENDONK, C., DIEPOLDER, M., ELSÄSSER, M., GREINER, B., & NEFF, R. (2014). Mehr Eiweiß vom Grünland. DLG-Mitteilungen 4/2014, 76–79.
- HERTEL-BÖHNKE, P.; SCHNEIDER, M., ETTLE, T., & SPIEKERS, H. (2018). Langzeitstudie zu den Effekten verschiedener Kraftfutter- : Grobfutterverhältnisse in der Milchkuhfütterung auf Leistung und Futteraufnahme. Züchtungskunde, 90 (6), Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 417–429.
- HOCHBERG, H., ZOPF, D., & SCHMIDT, F. (2013). Beitrag ausgewählter Dauergrünlandtypen zur Eiweißversorgung der Wiederkäuer in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsintensität. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 47–54. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2013_hochberg_et_al.pdf.
- HOEDTKE, S., GABEL, M., & ZEYNER, A. (2010). Der Proteinabbau im Futter während der Silierung und Veränderungen in der Zusammensetzung der Rohproteinfraktion. Übers. Tierernährg. 38:157–179.
- HOFER, D., SUTER, M., HAUGHEY, A., FINN, J. A., HOEKSTRA, N. J., BUCHMANN, N., & LÜSCHER, A. (2016). Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. Journal of Applied Ecology 53,1023–1034. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12694>.
- HOFER, D., SUTER, M., BUCHMANN, N., & LÜSCHER, A. (2017). Nitrogen status of functionally different forage species explains resistance to severe drought and post-drought overcompensation. Agriculture, Ecosystems & Environment 236, 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.022>.
- HONIG, H. (1977). Schätzung der Verluste an Trockenmasse und Energie bei verschiedenen Konservierungsverfahren. KTBL-Arbeitsgemeinschaft „Kalkulationsunterlagen“, Grunddaten der Futterwirtschaft, 1–20.
- ISSELSTEIN, J., BENKE, M., LANGE, G., & KAYSER, M. (2011). Futterbau in Niedersachsen im Spannungsfeld zwischen Produktionsfunktionen und landschaftsökologischen Funktionen. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 12, 55. Jahrestagung der AGGF 2011 Oldenburg, 30–44. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2011_isselstein_et_al.pdf.

- KÖHLER, B., DIEPOLDER, M., THURNER, S., & SPIEKERS, H. (2013). Eiweißbereitstellung vom Grünland auf Betriebsebene. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 62–69. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/aggf_2013_köhler_et_al.pdf.
- KÖHLER, B., THURNER, S., DIEPOLDER, M., & SPIEKERS, H. (2014). Effiziente Futterwirtschaft und Eiweißbereitstellung in Futterbaubetrieben. LfL-Schriftenreihe 05/2014, Freising, 141 Seiten. <http://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/082872/>.
- KOMAINDA, M., KÜCHENMEISTER, F., KÜCHENMEISTER, K., KAYSER, M., WRAGE-MÖNNIG, N. & ISSELSTEIN, J. (2020). Drought tolerance is determined by species identity and functional group diversity rather than by species diversity within multi-species swards. European Journal of Agronomy 119. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126116>.
- LEISEN, E., SPIEKERS, H., & DIEPOLDER, M. (2013). Notwendige Änderungen der Methode zur Berechnung der Flächenleistung (kg Milch/ha) von Grünland- und Ackerfutterflächen mit Schnitt oder Weidenutzung. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 181–184. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2013_leisen_et_al.pdf, [Abruf: 21.07.2022].
- LFL [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT] (2006). Materialsammlung Futterwirtschaft – Daten, Fakten und Berechnungsgrundlagen zu den Kosten der Grundfuttererzeugung und der Futterwirtschaft. LfL-Information, LfL München, 9. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/p_22478.pdf [Abruf: 17.09.2021]
- LFL (2021). Leitfaden zu emissionsarmen Gülleausbringung im Grünland. LfL-Information, Freising, https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/emissionsarme-quelle-gruenland_lfl-information.pdf, [Abruf: 23.02.2022].
- LOGES, R. (2013). Leguminosen im Futterbau: aktuelle und zukünftige Bedeutung sowie Forschungsbedarf In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 9–20.

- LOGES, R., BUNNE, I., REINSCH, T., MALISCH, C., KLUß, C., HERRMANN, A., & TAUBE, F. (2018). Forage production in rotational systems generates similar yields compared to maize monocultures but improves soil carbon stocks. *Eur. J. Agron.* 97, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.010>.
- LORENZ, H., REINSCH, T., HESS, S., & TAUBE, F. (2019). Is low-input dairy farming more climate friendly? A meta-analysis of the carbon footprints of different production systems. *J. Clean. Prod.* 211, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.113>.
- LORENZ, H., REINSCH, T., KLUß, C., TAUBE, F., & LOGES, R. (2020). Does the Admixture of Forage Herbs Affect the Yield Performance, Yield Stability and Forage Quality of a Grass Clover Ley? *Sustainability*, 12(14), 5842. <https://doi.org/10.3390/su12145842>.
- LÜSCHER, A., MUELLER-HARVEY, I., SOUSSANA, J. F., REES, R. M., & PEYRAUD, J. L. (2014). Potential of legume-based grassland–livestock systems in Europe: a review. *Grass and Forage Science*, 69, 206–228. <https://doi.org/10.1111/gfs.12124>.
- MAYNE, C. S. & GORDON, F. J. (1986). Effect of harvesting system on nutrient losses during silage making. 2. In-silo losses. *Grass and Forage Science* 41: 341–351.
- MISSELBROOK, T., DEL PRADO, A., & CHADWICK, D. (2013). Opportunities for reducing environmental emissions from forage-based dairy farms. *Agricultural and Food Science*, 22, 93–107. <https://doi.org/10.23986/afsci.6702>.
- MOSTAFA, E., TWICKLER, P., SCHMITHAUSEN, A., MAACK, C., GHALY, A., & BUESCHER, W. (2020). Optimisation of dry matter and nutrients in feed rations through use of a near-infrared spectroscopy system mounted on a self-propelled feed mixer. *Animal Production Science* 61(5), 514–524, <https://doi.org/10.1071/AN19306>.
- NEUMANN, S., REINSCH, T., KLUß, C., HERRMANN, A., & TAUBE, F. (2018). Potentiale der Ansäuerung von Wirtschaftsdüngern zur Emissionsminderung von Ammoniak: Erste Ergebnisse aus dem EU-Projekt Baltic Slurry Acidification. In: Leistungen von Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland, 62. Jahrestagung der AGGF, Kiel, Tagungsband, 217–222.
- NEUMANN, S., REINSCH, T., KLUß, C., MACKENS, J., & TAUBE, F. (2019). Verbesserung der N-Nutzungseffizienz durch Gülleansäuerung: Analyse von N-Verlustpfaden beim Einsatz von ¹⁵N markierter Rindergülle in einem Grasbestand unter kontrollierten Bedingungen. In: Grünland 2050. 63. Jahrestagung der AGGF, LfL-Schriftenreihe, 06/2019, 181–184.

- NYAMEASEM, J. K., ZUTZ, M., KLUß, C., TEN HUF, M., ESSICH, C., BUCHEN-TSCHISKALE, C., RUSER, R., FLESSA, H., OLFS, H.W., TAUBE, F., & REINSCH, T. (2022). Impact of cattle slurry application methods on ammonia losses and grassland nitrogen use efficiency. *Environmental Pollution*, Volume 315, 120302, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120302>.
- OENEMA, J. (2013). Transitions in nutrient management on commercial pilot farms in the Netherlands. PhD Thesis, Wageningen University. <http://edepot.wur.nl/279713>.
- PICKERT, J., BRÜNING, D., MERSCH, F., HERRMANN, A., & WEISE, G. (2019). Field-related quality management system for grass silage production. *Grass Forage Science*, 74:314–319. <https://doi.org/10.1111/gfs.12428>.
- PIRES, S., JOERGENSEN, J. N., NIELSEN, N. G., BRYAN, K. A., COPANI, G., & WITT, K. L. (2018). First estimation and validation of a new model to predict dry matter loss based on temperature changes – I. A meta-analysis study. In: *Proceedings of the XVIII International Silage Conference*, Gerlach, K., Südekum, K.-H., ed, Bonn, Germany, 30–31.
- RICHTER, W., ZIMMERMANN, N., ABRIEL, M., SCHUSTER, M., KÖLLN-HÖLLRIGL, K., OSTERTAG, J., MEYER, K., BAUER, J., & SPIEKERS, H. (2009). Hygiene bayerischer Silagen: Validierung einer Checkliste zum Controlling am Silo. *LfL-Schriftenreihe* 09/2009, 130 Seiten.
- RANDBY, A.T., WEISBJERG, M. R., NØRGAARD, P., & HERINSTAD, B. (2012). Early lactation feed intake and milk yield responses of dairy cows offered grass silages harvested at early maturity stages. *J. Dairy Sci.* 95:304–317. DOI: [10.3168/jds.2011-4454](https://doi.org/10.3168/jds.2011-4454).
- REINSCH, T., MALISCH, C., LORENZ, H., BÖLDT, M., PETERS, T., POYDA, A., & TAUBE, F. (2018). THG-Emissionen im Futterbau und in der Milchproduktion. In: *Leistungen vom Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland*, 62. Jahrestagung der AGGF, Kiel, Tagungsband, 27–36. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2018_reinsch_et_al.pdf.
- REINSCH, T., LOZA, C., MALISCH, C., VOGELER, I., KLUß, C., LOGES, R., & TAUBE, F. (2021). Toward specialized or integrated systems in northwest Europe: On-farm eco-efficiency of dairy farming in Germany. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:614348. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.614348>.
- ROTZ, C. A. (1994). Forages Losses and quality changes during harvest and storage. In: *Quality Forages for Ruminants*, Conference Paper, Symposium, Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 51–64.

- SCHMITHAUSEN, A. J., DEEKEN, H. F., GERLACH, K., TRIMBORN, M., WEIß, K., BÜSCHER, W., & MAACK, G. C. (2022). Greenhouse gas formation during the ensiling process of grass and lucerne silage. *J. Environ. Manage.* 304, 114142, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114142>.
- SCHUCH, H., TAUBE, F., LAUSEN, P., TECHOW, E., & HERRMANN, A. (2013). Wurzelmasse und C-Sequestrierung von Grünland: Einfluss der Phosphor- und Kaliumversorgung. 57. Jahrestagung der AGGF, Tagungsband, 222–226. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2013_schuch_et_al.pdf.
- SPIEKERS, H. (2012). Milch und Fleisch effizient erzeugen. In: Perspektiven einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Tierernährung, 50. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung (BAT) e. V., Freising, 53–58. http://lte.wzw.tum.de/fileadmin/BAT/50_BATTagung_2012_Tagungsband.pdf
- SPIEKERS, H., & BRANDL, J. (2018). Zielwerte für Grobfutter. In: „Futter und Fütterung sicher gestalten“, Tagungsband der 56. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung e.V., 58–65.
- SPIEKERS, H., & ETTLE, T. (2020). Forage based production of milk and meat - Grobfutter als Basis der Erzeugung von Milch und Rindfleisch; *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* (2020), Workshop: Bedeutung von Wiederkäuern und Ernährung im Kreislaufsystem.
- SPIEKERS, H., ETTLE, T., MOOSMEYER M., & STEINBERGER, S. (2011). Effiziente Nutzung von Weide und Grünfutterkonservaten mit Milchkühen. In: Nachhaltigkeit in der intensive Futterproduktion. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 12, 55. Jahrestagung der AGGF Oldenburg, 53–62.
- SPIEKERS, H., NUSSBAUM, H.J., & POTTHAST, V. (2009). Erfolgreiche Milchviehfütterung. 5. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt a.M., 576 Seiten.
- SPIEKERS, H., & SCHNEIDER, S. (2019). Stickstoffemissionen aus deutschen Rinderbetrieben - haben wir die Nase vorn oder gerümpft?, LBH, 10. Leipziger Tierärztekongress, Tagungsband 3, 99–105, Hrsg.: J.R. Aschenbach, Universität Leipzig, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa2-350004>.
- SPÖRNDLY, R. (2018). Dry matter losses from different silo structures. In: Proceedings of the 9th Nordic Feed Science Conference, Uppsala, Sweden, 171–176.
- STEINWIDDER, A., STARZ, W., ROHRER, H., & PFISTER, R. (2017). Systemvergleich - Einfluss von Vollweide- oder Stallfütterung auf die Milchproduktion im Berggebiet Österreichs. Österreichische Fachtagung für Biologische Landwirtschaft 2017, 15–44.

- SUTER, M., CONNOLLY, J., FINN, J. A., LOGES, R., KIRWAN, L., SEBASTIÁ, M. T., & LÜSCHER, A. (2015). Nitrogen yield advantage from grass-legume mixtures is robust over a wide range of legume proportions and environmental conditions. *Global change biology*. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12880>.
- TAUBE, F., GIERUS, M., HERRMANN, A., LOGES, R., & SCHÖNBACH, P. (2014). Grassland and globalization – challenges for northwest European grass and forage research. *Grass and Forage Science*, 69, 2–16. <https://doi.org/10.1111/gfs.12043>.
- TAUBE, F., & KELM, M. (2006). Vergleichende Analyse der pflanzlichen Produktion auf ökologischen und konventionellen Praxisbetrieben in Schleswig-Holstein. COMPASS-Endbericht – Teilprojekt A. Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. 1–55, <http://www.grassland-organicfarming.uni-kiel.de/de/pdf/COMPASS%20Endbericht.pdf>.
- TECHOW, A. (2018). Kleearten erfolgreich nachsäen. *Landwirtschaft ohne Pflug*, Lumbrico 2, 23–27.
- THOMET, P., & REIDY, B. (2013). Entwicklung von neuen Effizienzparametern zur Charakterisierung von Milchproduktionssystemen. In: Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau Potenziale, Chancen und Risiken. 57. Jahrestagung der AGGF 2013, Triesdorf, LfL-Schriftenreihe 06/2013, Freising, 70–76. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2013_thomet_reidy.pdf, [Abruf am 21.07.2022].
- UBA (2020). Novellierung der Stoffstrombilanzverordnung: Stickstoff- und Phosphor-Überschüsse nachhaltig begrenzen. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, Texte 200/2020, 15 Seiten.
- VAN SCHOOTEN, H. A., & PHILIPSEN, A. P. (2012). Grass silage management affecting greenhouse gas emissions and farm economics. In: Proceedings XVI International Silage Conference, Helsinki, Finland, 2-4 July 2012, 126–127. <https://edepot.wur.nl/265367>.
- VDLUFA (2018). Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt. https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/2018_Standpunkt_P-Duengung.pdf. [Abruf: 18.02.2022].
- VOGELER, I., KLUß, C., PETERS, T., & TAUBE, F. (2023). How much complexity is required for modelling grassland production at regional scales? *Land* 2023, 12(2), 327, <https://doi.org/10.3390/land12020327>, [Abruf: 17.05.2023].
- WEGGLER, K., THUMM, U., & ELSÄßER, M. (2020). Langzeitbeobachtungen von Leguminosen-Nachsaaten im Dauergrünland. *Berichte über Landwirtschaft*. Band 98, Heft 2. <https://doi.org/10.12767/buel.v98i2.291>

- WILKINSON, J. M., & DAVIES, D. R. (2013). The aerobic stability of silage: key findings and recent developments. *Grass and Forage Science*, 68, 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00891.x>.
- WILKINSON, J. M., & MUCK, R. E. (2019). Ensiling in 2050: Some challenges and opportunities. *Grass Forage Science*, 74, 178–187. <https://doi.org/10.1111/gfs.12418>.
- WOREK, F., & THURNER, S. (2022). DigiMilch – Sensorgestützte Ertragsermittlung im Grünland und Feldfutterbau im praktischen Einsatz. In: *Grünland im Spannungsfeld Forschung, Wissenstransfer und öffentliche Wahrnehmung*, 65. Jahrestagung der AGGF, Soest, Tagungsband, 38–41.
- ZIMMER, E. (1980). Efficient silage systems. *Proceedings of the British Grassland Society Occasional Symposium No 11*, Brighton, UK, 186–197.

6 Zusammenfassung

6.1 Zusammenfassung

Die Landwirtschaft steht vor der Herausforderung, eine wirtschaftliche Produktion mit zunehmend ressourcen- und umweltschonenden Standards zu realisieren. Nach wie vor fallen aber in der Landwirtschaft Nährstoffüberschüsse (N und P) vor allem in Regionen mit hohen Viehdichten an. Gerade in Milchvieh-/Futterbausystemen, die durch komplexe Masse- und Nährstoffflüsse gekennzeichnet sind, wurden die Futterströme bisher wenig quantifiziert. Fehlende Ertragsdaten wirken sich jedoch auf die Bewirtschaftung der Futterflächen bis hin zu falschen Systemanalysen aus. Darüber hinaus weisen verschiedene Aussagen zu Verlusten entlang der Futterproduktionskette auf ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Ressourcennutzungseffizienz in der Futterwirtschaft hin. Daher gilt die Quantifizierung der Futterströme auf Betriebsebene als ein grundlegender Ansatz zur einzelbetrieblichen Optimierung des Futtermanagements. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Masse- und Nährstoffströme in Futterbaubetrieben mit einer praxisnahen Erfassung möglichst vollständig abzubilden, um daraus Schlussfolgerungen zur Bewertung von Stoffkreisläufen in Milchvieh-/Futterbausystemen zu treffen.

Für die Untersuchungen wurden an fünf bayerischen Futterbaubetrieben die Masse- und Nährstoffflüsse vom Grobfutter vom Feld bis zum Trog erfasst und analysiert, um Aussagen zur Ertragsleistung vom Grünland und zu Verlusten bei Gras- und Maissilagen zu treffen. Von intensiv geführten bayerischen Grünlandbeständen wurde eine umfassende Ertragsanalyse über einen vierjährigen Zeitraum auf Betriebs- und Schlagebene durchgeführt (Kapitel 2). Die Ernteerträge (65 bis 97 dt TM/ha) wiesen eine hohe Variabilität auf, abhängig von Standort, Bewirtschaftung und Jahr (CV = 5 bis 15 %). Gleichzeitig ließ sich aber auch eine hohe Ertragsstabilität feststellen, wie eine Ertragssimulation über neun Jahre mit dem FOPROQ-Modell zeigte (CV = 15 bis 21 %), dessen Parameter an die bayerischen Standortverhältnisse angepasst werden konnten ($R^2 = 0,91$; RMSE = 2,4).

Insgesamt zeigen sich noch Reserven im Grünlandmanagement, um eine hohe Energie- und Rohproteinversorgung aus einem Intensivgrünlandssystem mit hoher

NUE zu erzielen. Die umfassende Ertrags- und Qualitätsanalyse des Grünland verdeutlicht, dass ein effizientes Nährstoffmanagement unter Berücksichtigung einzelbetrieblicher Optimierung und umweltrelevanter Kriterien nur mit einem konsequenten Messen von Mengen und Qualität zu erreichen ist. Jedoch sind für die Erhebung schlaggenauer Ertragsinformationen in der Praxis noch ausgereifte technische Lösungen zur Messung an Erntemaschinen erforderlich.

Im nächsten Schritt wurden die Einlagerungs- und Auslagerungsmengen in Fahrsilos unter praxisüblichen Bedingungen erfasst, um TM-Verluste bei Silagen – von der Befüllung bis zur vollständigen Entleerung – zu ermitteln (Kapitel 3). Mit der Total-in-Total-out-Methode wurden an 48 Fahrsilos die TM-Verluste im Mittel von 9 % bei Grassilagen ($n = 26$), 10 % bei Maissilagen ($n = 18$) und 12 % bei Luzernesilagen ($n = 4$) festgestellt. Bei den Maissilagen waren die TM-Verluste mit der Dichte ($r = -0,625$) und dem Vorschub ($r = -0,555$) negativ korreliert ($0,05 > p > 0,01$), bei Grassilagen mit dem Vorschub ($r = -0,570$). Aus den Ergebnissen wird für die Praxis als Orientierungswert für ein optimales Silagemanagement ein TM-Verlust von maximal 8 % bei Gras- und Maissilagen vorgeschlagen. Für eine praxistaugliche und exaktere Messung der Ein- und Auslagerungsmengen werden automatisierte Messtechniken an Erntemaschinen und am Futtermischwagen empfohlen.

In der abschließenden Auswertung der Futterströme von 64 Fahrsilos wurden mit einer erweiterten Datenbasis zur Ermittlung der TM-Verluste auch die Veränderungen der Nährstoffgehalte vor und nach der Silierung von Gras und Mais untersucht (Kapitel 4). Die relativen Veränderungen in den Nährstoffgehalten (TM, XA, XP, XF, XL, ADFom, aNDFom, N, P) und den Energiedichten (GE, NEL) von Gras und Mais wurden mit der Varianzanalyse (ANOVA) über Mittelwertvergleiche mit multiplen Kontrasttests ($p < 0,05$) ausgewertet. Bei einer insgesamt guten Silierpraxis der Betriebe traten durch die Silierung bei den Grassilagen tendenziell etwas höhere TM-Verluste (9 %) auf als bei den Maissilagen (7 %). Da die N- und P-Gehalte der Silagen durch den Silierprozess weitgehend unverändert blieben, lässt sich annehmen, dass insgesamt die N- und P-Verluste in Silagen auch gering bleiben (< 10 %). Dagegen bewirkte die Silierung einen deutlichen Abbau in den aNDFom-Gehalten (Gras -11 %, Mais -15 %), während die ADFom-Gehalte weitgehend unverändert blieben. Aus dem Umbauprozess in der Faserfraktion resultierten stabile bzw. leicht verbesserte

Energiewerte in den Silagen. Somit bestätigen die Ergebnisse, dass bei Einhaltung einer guten Silierpraxis hohe Futterqualitäten erhalten und Verluste in die Umwelt gering gehalten werden können. Um Futterverluste in der Praxis weiter zu reduzieren, müssen die Voraussetzungen geschaffen werden, auf einzelbetrieblicher Ebene ein praxisgängiges Ertrags- und Nährstofffassungssystem entlang der Futterkaskade vom Feld bis zum Trog zu etablieren.

6.2 Summary

Agriculture faces the challenge of implementing economic production with increasingly resource and environmentally friendly standards. At the same time, the problem of nutrient surpluses (N and P) in agriculture persists, especially in regions with high livestock density. Especially in dairy farming systems, which are characterised by complex mass and nutrient flows, the feed flows have so far been little quantified. However, lack of yield data affects management to the point of incorrect system analyses. In addition, various statements on losses along the feed production chain point to considerable potential for improving NUE in feed management. Therefore, the quantification of mass and nutrient flows at farm level is considered a fundamental approach for optimising feed management on individual farms. The aim of the present study is to map the mass and nutrient flows in dairy farms as completely as possible with a practical recording in order to draw conclusions for the evaluation of material cycles in dairy farming systems.

For this purpose, the mass and nutrient flows of fodder from the field to the trough were recorded and analysed at five Bavarian dairy farms in order to make statements on the yield performance of grassland and losses in grass and maize silages. A comprehensive yield analysis over a four-year period was carried out of intensively managed Bavarian grassland stands at farm and field level. The crop yields (65 to 97 dt DM/ha) showed a high variability, depending on location, management and year (CV = 5 to 15 %). At the same time, however, a high yield stability could be observed, as a yield simulation with the FOPROQ model, whose parameters could be well adapted to the Bavarian site conditions ($R^2 = 0.91$; RMSE = 2.4), showed over nine years (CV = 15 to 21 %).

Overall, there are still reserves in grassland management to achieve a high energy and crude protein supply from an intensive grassland system with high NUE. The comprehensive yield and quality analysis of grassland makes it clear that efficient nutrient management, taking into account individual farm optimisation and environmentally relevant criteria, can only be achieved by consistently measuring quantity and quality. However, mature technical solutions for measurement on harvesting machines are still required for the collection of accurate yield information in practice.

In the next step, the input and output quantities in bunker silos were recorded under conditions in practice in order to determine DM losses in silages - from filling to complete emptying (chapter 3). Using the total-in versus total-out method, DM losses averaging 9 % for grass silage ($n = 26$), 10 % for maize silage ($n = 18$) and 12 % for lucerne silage ($n = 4$) were determined at 48 bunker silos. For maize silages, DM losses were negatively correlated ($0.05 > p > 0.01$) with density ($r = -0.625$) and feed out rate ($r = -0.555$), for grass silages with feed out rate ($r = -0.570$). Based on the results, a maximum DM loss of 8 % for grass and maize silages is suggested as a recommended value for optimal silage management in practice. For a practical and more exact measurement of the input and output quantities, automated measuring techniques on harvesters and on the feed mixer are recommended.

In the final evaluation of the mass and nutrient flows of 64 bunker silos, the changes in the nutrient contents before and after ensiling of grass and maize were also investigated using an expanded database to determine the DM losses (chapter 4). The relative changes in the nutrient contents (DM, XA, XP, XF, XL, ADFom, aNDFom, N, P) and the energy densities (GE, NEL) of grass and maize were evaluated with the analysis of variance (ANOVA) via comparisons of means with multiple contrast tests ($p < 0.05$). With generally good ensiling practices on the farms, slightly higher DM losses (9 %) tended to occur in the grass silages than in the maize silages (7 %). Since the N and P contents of the silages remained largely unchanged by the ensiling process, it can be assumed that overall the N and P losses in silages also remain low (< 10 %). In contrast, ensiling caused a significant reduction in the aNDFom content (grass -11 %, maize -15 %), while the ADFom content remained largely unchanged. The ensiling process in the fibre fraction resulted in stable or slightly improved energy

values in the silages. Thus, the results confirm that if good ensiling practices are followed, high forage qualities can be maintained and losses to the environment can be kept low. In order to further reduce feed losses in practice, the conditions must be created to establish a practical yield and nutrient recording system along the feed cascade "from field to trough" at the individual farm level.

Ich danke

- ❖ ... Herrn Prof. Dr. Friedhelm Taube für das interessante Forschungsthema und die beste Betreuung und Begleitung der Promotionsarbeit.
- ❖ ... Herrn Prof. Dr. Hubert Spiekers für die Anregung, das Thema als Promotionsvorhaben zu bearbeiten, und die immerwährende Unterstützung auf diesem Weg.
- ❖ ... Herrn Christof Kluß für die stets schnelle Beantwortung aller möglichen Fragen. Vor allem aber für die Hilfe bei den statistischen Auswertungen meiner Erhebungen.
- ❖ ... meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bayerischen Staatsgüter für die Zusammenarbeit, durch die die umfangreichen Datenerhebungen auf den Betrieben erst möglich wurden.
- ❖ ... besonders meinem Lebensgefährten, meiner Familie und meinen Freunden für ihr Verständnis, ihr Interesse und ihre Unterstützung während dieser ganzen Zeit.

In der Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts- Universität zu Kiel sind bisher erschienen:

Heft	Autor	Jahr	Titel
1	Heller, R.	1997	Die genetische Analyse nematodenresistenter Zuckerrüben mit molekularen Markern
2	Schröder, Heidi	1997	Untersuchungen zur Ertragsbildung und Stickstoffverwertung von Wintergerstenbeständen in verschiedenen Produktionssystemen
3	Kornher, Alois Wulfes, Rainer Wachendorf, Michael Taube, Friedhelm	1998	Untersuchungen zur Dynamik der Ertragsbildung und der Qualitätsentwicklung von Extensivgrünland
4	Richter, K.	1998	Die Lokalisation von Genen für die Resistenz gegen die Netzfleckenkrankheit (<i>Drechslera teres</i>) in der Gerste
5	Kifle, Sirak	1998	Das <i>hairy roots</i> -Transformationssystem zur Expression des Nematodenresistenzgens <i>HS1</i> in Zuckerrüben und <i>Arabidopsis thaliana</i>
6	Puzio, Stefanie	1998	Untersuchungen zur Überwinterung und zum jahreszeitlichen Verlauf der Ertragsbildung von Weißklee in Abhängigkeit von der Witterung und der Sorteneigenschaft
7	Christen, Olaf	1998	Untersuchungen zur Anbautechnik von Winterweizen nach unterschiedlichen Vorfruchtkombinationen
8	Schacht, Johannes	1998	Beiträge zur Nutzung von Wildformen zur Verbesserung quantitativ vererbter Merkmale am Beispiel Gerste
9	Loges, Ralf	1998	Ertrag, Futterqualität, N ₂ -Fixierungsleistung und Vorfruchtwert von Rotklee- und Rotklee grasbeständen
10	Teebken, Tammo	1998	N-Dynamik unter der Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen-Wintergerste bei mehrjähriger Rotationsdauer und unterschiedlichen Produktionsintensitäten sowie einfache Ansätze zur N-Bilanzierung
11	Winkelmann, Christoph	1999	Ertragsbildung von Winterweizen in Abhängigkeit von Fruchtfolgestellung, Anbautechnik und Bodenunterschieden
12	Setiawan, Asep	1999	Mapping quantitative trait loci (QTL) for resistance to leaf spot disease (<i>Cercospora beticola</i> Sacc.) in sugar beet (<i>Beta vulgaris</i> L.)
13	Ruhe, Iris	2000	Winterweizenanbau in stickstofflimitierten Produktionssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Ertragsbildung, der organischen Düngung und der mechanischen Beikrautregulierung

- 14 Oberschmidt, Olaf 2000 Anwendung der *differential display*-Technik zur Isolierung und Analyse von differenziell expremierten Genen in nematodenresistenten Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.)
- 15 Hühn, Manfred 2000 Universität und Bildungsauftrag. Wirklichkeit oder Farce?
- 16 Sieling, Klaus 2000 Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Produktionssysteme auf einige Parameter des N-Haushaltes von Boden und Pflanze
- 17 Kaske, Axel 2000 Leistungen unterschiedlich bewirtschafteter Futterleguminosenbestände und deren Auswirkungen auf Ertrag und ausgewählte Kenngrößen des Stickstoffhaushaltes der Folgefrucht Winterweizen
- 18 El-Mezawy, Aliaa 2001 Fine mapping of the bolting gene from sugar beet (*Beta vulgaris* L.) with molecular markers
- 19 Gao, Dongjie 2001 Molecular and cytological characterization of a full set of monosomic addition lines from *Beta corolliflora* in *Beta vulgaris* and chromosomal localization of resistance genes to leaf spot (*Cercospora beticola*) and rhizomania disease from wild beets
- 20 Jacobs, Gunnar 2001 Physikalische Kartierung der Region des Schossgens der Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L.)
- 21 Ingwersen, Bernhard 2001 Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Leistungsfähigkeit von leguminosenbasiertem Dauergrünland unter besonderer Berücksichtigung der Nährstoffbilanzierung
- 22 Teebken, Tammo
Hanus, Herbert 2001 Landwirtschaftliche Produktion und Umweltaspekte – eine Literaturrecherche unter besonderer Berücksichtigung der Produktionsintensität
- 23 Große-Herrenthey, Ute 2002 Molekulare Analyse der genetischen Variabilität von *Cercospora beticola* Sacc., dem Erreger der Cercospora-Blattfleckenkrankheit bei Zuckerrüben, und Untersuchungen zur Resistenz von *Beta vulgaris* spp. *maritima* gegen *C. beticola* unter Anwendung unterschiedlicher Resistenztestsysteme
- 24 Tahir, Muhammand
Shafique 2002 Reaction of different wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in response to salt stress and genetic mapping of OTL for salt tolerance using AFLP markers
- 25 Thureau, Tim, 2002 Der Einfluss stromaufwärts gelegener regulatorischer Sequenzen auf die Transkriptionsintensität des *Hs1^{pro-1}*-Gens für Nematodenresistenz aus der Zuckerrübe
- 26 Wegelin, Tanja 2002 Bestimmung von Funktion und Wirkungsweise des *Hs1^{pro-1}* Nematodenresistenzgens aus *Beta procumbens*
- 27 Samuelian, Suren 2002 Identification of genes differentially expressed upon nematode infection by cDNA-AFLP analysis
- 28 Trott, Hagen Theo 2003 Mittelfristige Auswirkungen einer variierten Bewirtschaftungsform und N-Intensität auf Leistungsparameter und die Stickstoffbilanz von Dauergrünland

- | | | | |
|----|----------------------|------|--|
| 29 | Treue, Peter | 2003 | Potenziale und Grenzen teilflächenspezifischer N-Düngung in Schleswig-Holstein/Precision Agriculture |
| 30 | Büchter, Manfred | 2003 | Nitratauswaschungen unter Grünland und Silomais in Monokultur auf sandigen Böden Norddeutschlands |
| 31 | Tian, Yanyan | 2003 | PCR-based cloning of the second nematode resistance gene <i>Hs1-1^{pro-1}</i> and resistance gene analogues from sugar beet (<i>Beta vulgaris</i> L.) |
| 32 | Brase, Thorsten | 2003 | Einfluss der N-Dynamik in unterschiedlichen Produktionssystemen auf die Ertragsbildung von Raps, Weizen und Gerste sowie die N-Auswaschung |
| 33 | Jamsari, Ir. | 2003 | Construction of high-density genetic and physical maps around the sex gene <i>M</i> of <i>Asparagus officinalis</i> L. |
| 34 | Kelm, Michael | 2004 | Strategies for sustainable agriculture with particular regard to productivity and fossil energy use in forage production and organic arable farming |
| 35 | Wichmann, Stefan | 2004 | Ertragsleistung, Futterqualitätsentwicklung, N ₂ -Fixierungsleistung und Vorfruchtwirkung von verschiedenen Körnerleguminosenarten in Reinsaat und Gemenge mit Getreide |
| 36 | Gaafar, Reda Mohamed | 2005 | Fine mapping of the bolting gene of sugar beet (<i>Beta vulgaris</i> L) using BAC-derived sequences |
| 37 | Lampe, Carola | 2005 | Effect of nitrogen fertiliser and animal excrements on N ₂ O emissions from permanent grassland using ¹⁵ N-labelling |
| 38 | Beims, Sandra | 2005 | Untersuchungen zur N-Effizienz und zum N-Mineralisationspotenzial in langjährig unterschiedlichen Düngungssystemen mit Hilfe von ¹⁵ N markiertem Mineraldünger |
| 39 | Baade, Julia | 2005 | Untersuchungen zur Futteraufnahme, Futterqualität und –selektion auf Umtriebsweiden mittels einer pflanzenbaulichen Methode |
| 40 | Volkers, Karen | 2005 | Auswirkungen einer variierten Stickstoffintensität auf Leistung und Stickstoffbilanz von Silomais in Monokultur sowie einer Ackerfutterbau-Fruchtfolge auf sandigen Böden Norddeutschlands |
| 41 | Dreymann, Sonja | 2005 | N-Haushalt unterschiedlich bewirtschafteter Rotklee-Bestände und deren Bedeutung für die Folgefrucht Weizen im Ökologischen Landbau |
| 42 | Bobe, Janina | 2005 | Nitratbelastung von Sickerwasser und Grundwasser in Futterbausystemen auf sandigen Böden Norddeutschlands |
| 43 | Neumann, Helge | 2005 | Optimierungsstrategien für den Getreideanbau im ökologischen Landbau: System "weite Reihe" und Direktsaat in ausdauernden Weißklee ("Bi-cropping") |
| 44 | Hamwieh, Aladdin | 2005 | Development of simple sequence repeat (SSR) and AFLP markers for linkage mapping in lentil (<i>Lens culinaris</i> Medik) |

-
- | | | | |
|----|---------------------------------|------|--|
| 45 | Kruse, Sandra | 2006 | Charakterisierung und Modellierung des Abreifeverhaltens von Silomaisgenotypen mittels futterwertbestimmender Parameter |
| 46 | Schulte, Daniela | 2006 | Physische Kartierung und Sequenzierung einer Translokation aus der Wildart <i>Beta procumbens</i> am Zuckerrüben-Chromosom 9 |
| 47 | Werner, Susanne | 2007 | Genetische Kartierung von Kohlhernie (<i>Plasmodiophora brassicae</i>) - Resistenzgenen in Raps |
| 48 | Telgmann-Rauber, Alexa | 2007 | Untersuchungen zur Struktur des Spargel-Chromosoms L5 mit dem geschlechtsdeterminierten Locus M |
| 49 | Treyse, Katharina | 2007 | Indikatoren für eine nachhaltige intensive Grünlandbewirtschaftung |
| 50 | Jung, Christian | 2007 | Ausgewählte Themen der Pflanzenzüchtung |
| 51 | Schiborra, Anne | 2007 | Short-term effects of defoliation on herbage productivity and herbage quality in a semi-arid grassland ecosystem of Inner Mongolia, P.R. China |
| 52 | Endrigkeit, Jessica | 2007 | Identifikation und Charakterisierung von Genen der Tocopherol-Biosynthese aus Raps (<i>Brassica napus</i> L.) |
| 53 | Nannen, David | 2008 | N fluxes in forage production systems as studied by ¹⁵ N and difference method |
| 54 | Henke, Johannes | 2008 | Entwicklung und Bewertung von Strategien zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Winterrapsanbau |
| 55 | Lange, Tina | 2008 | Genetische Kartierung und molekulare Identifizierung von Genen für Speicherwurzelbildung in <i>Brassica napus</i> L. |
| 56 | Mauschering, Inken | 2008 | Interseeding catch crops in organic wheat and rape seed production systems |
| 57 | Kleen, Jana | 2008 | Ertragsleistung und Futterqualität verschiedener Leguminosen in binären Gemengen mit Deutschem Weidelgras (<i>Lolium perenne</i> L.) |
| 58 | Westphal, Derk | 2008 | Leistung und Vorfruchtwert von Leguminosen-Gras-Beständen im ökologischen Landbau unter Berücksichtigung der Winterbeweidung |
| 59 | Eickler, Birgit | 2008 | Nutritive value of forage legumes with special reference to polyphenol oxidase activity in red clover |
| 60 | Keil, Tobias | 2008 | Selektion von Gerstenherkünften mit Resistenz gegen frei lebende Nematoden der Gattung <i>Pratylenchus</i> |
| 61 | Müller, Karla | 2009 | Remote sensing and simulation modelling as tools for improving nitrogen efficiency for winter oilseed rape (<i>Brassica napus</i> L.) |
| 62 | Fittje, Susanne | 2009 | Wirkungen des Grünrodens auf Ertrag, Knollenbeschaffenheit und Virusbefall zur Erzeugung von Kartoffelpflanzgut im ökologischen Landbau |
| 63 | Kage, Henning & Hollmann, Franz | 2009 | Norddeutsches Weizen-Forum 2009 – Kurzfassungen der Vorträge |
| 64 | Schönbach, Philipp | 2009 | Grazing effects on productivity and herbage quality of an Inner Mongolian steppe ecosystem – Results of a four-year grazing experiment |
-

- | | | | |
|----|---------------------------------|------|--|
| 65 | Gericke, Dirk | 2009 | Measurement and modelling of ammonia emissions after field application of biogas slurries |
| 66 | Taube, Friedhelm | 2009 | Modelling forage production systems
Dedicated to Prof. em. Alois Kornher's 75. birthday |
| 67 | Salama, Heba | 2010 | Process-oriented evaluation of yield performance and nutritive value of perennial rye-grass (<i>Lolium perenne</i> L.) genotypes |
| 68 | Gong, Xiaoying | 2010 | Water and nitrogen co-limitation of plant primary production in a semiarid grassland of Inner Mongolia |
| 69 | Capistrano, Gina | 2010 | A candidate sequence for the nematode resistance gene <i>HS1-2</i> in sugar beet |
| 70 | Lösche, Marc | 2010 | Nutritive value of perennial ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.) with special reference to genotype- and ploidy-related effects |
| 71 | Kage, Henning & Hollmann, Franz | 2011 | Norddeutsches Marktfruchtforum 2011 – Kurzfassungen der Vorträge |
| 72 | Abou-Elwafa, Salah | 2011 | Novel genetic factors affecting bolting and floral transition control in <i>beta vulgaris</i> |
| 73 | Büttner, Bianca | 2011 | Genetic mapping of flowering time genes and functional characterisation of an <i>FVE</i> homologue from sugar beet. |
| 74 | Bangemann, Lars | 2011 | Pathogen-nutrient interactions in potato: the case of nitrogen and late blight in organic farming. |
| 75 | Krawutschke, Manuel | 2011 | Qualitätsveränderungen im Zuwachsverlauf und bei der Gärfutterbereitung von Rotklee (<i>Trifolium pratense</i> L.) unter besonderer Berücksichtigung der Rohproteinfraktionen |
| 76 | Svoboda, Nikolai | 2011 | Auswirkungen der Gärrestapplikation auf das Stickstoffauswaschungspotential von Anbausystemen zur Substratproduktion |
| 77 | Wienforth, Babette | 2011 | Cropping systems for biomethane production: a simulation based analysis of yield, yield potential and resource use efficiency |
| 78 | Wan, Hongwei | 2011 | Impacts of grazing intensity, grazing system, mowing, and nitrogen fertilization on species dominance and coexistence in typical steppe of Inner Mongolia |
| 79 | Weiher, Nina | 2011 | Variation in the nutritive value of red clover (<i>Trifolium pratense</i> L.) with special reference to polyphenol oxidase activity |
| 80 | Schmeer, Maria Susanne | 2012 | Der Einfluss von Bodenverdichtung sowie Grünlanderneuerung auf Stickstoffemissionen und Ertragsleistungen von Futterbausystemen |
| 81 | Fritsche, Steffi | 2012 | Cloning and functional characterization of genes from the tocopherol biosynthesis pathway in rapeseed (<i>Brassica napus</i> L.) and candidate gene based association studies of tocopherol content and composition |

- | | | | |
|----|--|------|---|
| 82 | Ren, Haiyan | 2013 | Impacts of grazing intensity, precipitation and temperature on productivity, forage quality, species composition and diversity in typical steppe of Inner Mongolia |
| 83 | Ratjen, Arne Markus | 2013 | Refined N fertilization of winter wheat: a model supported approach combining statistical and mechanistic components |
| 84 | Kage, Henning
Sieling, Klaus
Hollmann, Franz | 2013 | Norddeutsches Marktfruchtforum 2013 – Kurzfassungen der Vorträge |
| 85 | Pahlmann, Ingo | 2013 | Entwicklung eines teilflächenspezifischen Düngealgorithmus als Beitrag zur Steigerung der Stickstoffeffizienz und Optimierung der Treibhausgasbilanz im Winterrapsanbau |
| 86 | Kardel, Marika | 2013 | Charakterisierung von Tanninen aus Pflanzenextrakten und deren Einfluss auf pansenphysiologische Parameter |
| 87 | Techow, Anna | 2013 | Leistung und ökologische Effekte von Anbausystemen zur Biogas-/Futtererzeugung |
| 88 | Lana, Marcos | 2013 | Regionalization of climate change impacts and adaptation strategies for maize in Santa Catarina State, Brazil |
| 89 | Chen, Shimeng | 2014 | Sward age and nitrogen determine the quantity and quality of root growth in grass-clover swards |
| 90 | Biegemann, Torsten | 2014 | Grünlandumbruch und Neuansaat: Kurz- und langfristige Effekte auf Treibhausgasemissionen und Ertragsleistungen von Grünlandbeständen |
| 91 | Stephan, Helge | 2014 | Examining the yield potential of winter sugar beet with a process-orientated dynamic simulation model |
| 92 | Quakernack, Robert | 2014 | Biogas cropping systems at a calcareous coastal marsh: productivity, ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and soil nitrogen dynamics after fertilization with anaerobic digestates |
| 93 | Galal, Ahmed
Abdelrahman | 2014 | Mapping root-lesion nematode resistance QTL in barley (<i>Hordeum vulgare</i> L.) |
| 94 | Poyda, Arne | 2015 | Klimarelevanz futterbaulich genutzter Niedermoorböden in Schleswig-Holstein |
| 95 | Rath, Jürgen | 2015 | Maisgenotypen zur Biogasnutzung: Übersicht, Entwicklung und Validierung eines Modells zur Potenzialabschätzung der Biogasausbeute |
| 96 | Weymann, Wiebke | 2015 | Model-based analysis of weather, soil and management effects on yield formation of winter oilseed rape |
| 97 | Ullmann, Ines | 2016 | The critical phase of stem elongation in perennial ryegrass: a new plant functional trait for understanding yield and forage quality performance |
| 98 | Neukam, Dorothee | 2016 | Modelling wheat canopy temperature: A key to identify plant traits for drought tolerance and to quantify heat stress |

- | | | | |
|------------|---------------------------------|------|--|
| 99 | Biernat, Lars | 2016 | Ökoeffizienz im ökologischen und konventionellen Marktfruchtbau Schleswig-Holsteins – ein konzeptioneller Ansatz zur Bewertung von Landnutzungssystemen |
| 100 | Hamacher, Maike | 2016 | Potentiale sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe in Futterleguminosen und Wiesenkräutern für eine verbesserte N-Verwertung beim Wiederkäuer |
| 101 | Komainda, Martin | 2017 | Catch cropping in silage maize (<i>Zea mays</i> L.) – potential with respect to yield and environmental performance under the climatic conditions of northern Germany |
| 102 | Schoo, Burkhard
Clemens | 2017 | Comparative eco-physiological analyses in cup plant, maize and lucerne-grass |
| 103 | Struck, Inga | 2018 | No-tillage silage maize (<i>Zea mays</i> L.) in ley-arable systems - Crop performance and environmental effects under maritime climates |
| 104 | Räbiger, Thomas | 2020 | Direct and indirect nitrous oxide emissions in oilseed rape production systems: Measurement and simulation |
| 105 | Graß, Rikard | 2020 | High-throughput phenotyping of drought stress resistance in mapping populations of rye: Canopy temperature, radiation interception and stay-green |
| 106 | Loza, Cecilia | 2021 | Examining the impact of different grass-legume mixtures on milk quality and methane emission in pasture-based milk production systems |
| 107 | Nyameasem, John
Kormla | 2021 | Diverse forage production systems and their potential for greenhouse gas mitigation |
| 108 | Smit, Hendrik Petrus
Jordaan | 2021 | Mitigation strategies to reduce greenhouse gas emissions and nitrogen losses from pasture-based dairy systems |
| 109 | Lorenz, Heike | 2021 | Towards eco-efficiency in dairy farming: the role of pasturing and grass-clover leys |
| 110 | Rose, Till | 2022 | The contribution of functional traits to breeding progress o central European winter wheat |
| 111 | Bukowiecki, Josephine | 2022 | Site-specific yield formation of winter wheat: combining remotely sensed crop data with simulation modeling |
| 112 | Verma | 2022 | Examining the inter- and intraspecies variability in the polyphenolic profile and in vitro antimethanogenic potential of forage species |
| 113 | Kemmann, Björn | 2022 | Assessment of field-derived greenhouse gas mitigation potential in biomass production by replacing maize with cup plant (<i>Silphium perfoliatum</i>) in low mountain ranges |
| 114 | Peters, Tammo | 2023 | Plant functional trait analysis and dynamic growth modelling of perennial ryegrass dominated pastures in north-west Europe |
| 115 | Rothardt, Steffen | 2023 | Mitigating N losses and improving N transfer in cropping systems by residue management |
| 116 | De Los Rios Mera, Josue | 2023 | Effects of land use and land use change in agricultural systems on soil carbon sequestration in north-west Europe |

