

Institut für Tierwissenschaften
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Auswirkungen eines Ferulasäure-Esterase
produzierenden Milchsäurebakterienstammes auf
den Gärverlauf von Grassilage sowie die
Nährstoffverdaulichkeiten, Futteraufnahme und
Leistung von Milchkühen**

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)
der
Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt im Januar 2012
von
Dipl.-Ing. agr. Markus Haagen
aus Bedburg-Hau

Gedruckt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1. Berichterstatter: | Prof. Dr. K.-H. Südekum |
| 2. Berichterstatter: | Prof. Dr. W. Büscher |
| Erscheinungsjahr: | 2012 |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 27.01.2012 |

Auswirkungen eines Ferulasäure-Esterase produzierenden Milchsäurebakterienstammes auf den Gärverlauf von Grassilage sowie die Nährstoffverdaulichkeiten, Futteraufnahme und Leistung von Milchkühen

Trotz optimierter Fütterung ist es in der Praxis häufig schwierig, den Energiebedarf von Milchkühen vor allem in der Hochleistungsphase zu decken. Die daraus resultierenden Folgen sind Gesundheitsprobleme der Kühe und wirtschaftliche Verluste. Da der Energiezufuhr aus Konzentratfutter physiologische Grenzen gesetzt sind, muss die Energieausbeute aus dem Grobfutter erhöht werden. Das im vorliegenden Versuch für den Einsatz in Grassilage getestete Siliermittel 11 GFT (Pioneer Hi-Bred Northern Europe, Buxtehude, Deutschland) enthält faserspaltende Enzyme (Ferulat-Esterasen) produzierende Mikroorganismen, die während des Silierprozesses die Zellwandverbindungen aufspalten und die Zellinhaltsstoffe besser verfügbar machen sollen.

Einer Gruppe mit 25 Kühen in frühem Laktationsstadium (Beobachtungsbeginn 37. Laktationstag) wurde für 100 Versuchstage eine Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration, TMR) mit siliermittelbehandelter Grassilage vorgelegt und einer entsprechenden Kontrollgruppe TMR mit unbehandelter. Es wurde eine grasdominierte Ration (Grassilageanteil 33 % der Trockenmasse) gefüttert. Neben einem Verdauungsversuch an Milchkühen mit TMR wurden Verdauungsversuche an Hammeln mit Grassilage und TMR durchgeführt und der ruminale Nährstoffabbau *in situ* an pansenfistulierten Ochsen ermittelt.

Die behandelte Grassilage wies einen leicht erhöhten Essigsäuregehalt auf, der zwar nicht zu einer erhöhten Lagerstabilität führte, aber auch die Futteraufnahmen nicht reduzierte. Im Fütterungsversuch zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Fütterungsgruppen bezüglich Trockenmasseaufnahme, Milchmengenleistung, Milchinhaltsstoffe und Körperkondition. Die Energiebilanz beider Gruppen war über den Versuchszeitraum negativ. Der Verdauungsversuch zeigte keine Unterschiede in den Nährstoffverdaulichkeiten der Silagen. Die negative Energiebilanz war bei den mit behandelter Silage gefütterten Kühen stärker ausgeprägt. Im *in situ*-Versuch zeigten sich keine Unterschiede im Nährstoffabbau zwischen den Silagen. Die Werte wiesen teilweise hohe lag-Phasen vor Beginn des Abbaus auf, die aus den Versuchsdaten heraus nicht erklärt werden konnten. Im Verdauungsversuch mit Hammeln führte die Fütterung der behandelten Grassilage zu einer höheren Verdaulichkeit der Neutral-Detergenzienfaser (nach Veraschung, NDFom) und der Säure-Detergenzienfaser (nach Veraschung, ADFom). Bei Fütterung der TMR zeigte sich eine höhere Verdaulichkeit der organischen Masse und der NDFom. In beiden Fällen war dadurch die Energiekonzentration des behandelten Futters erhöht.

Effects of exogenous ferulate esterase producing lactic acid bacterial strains on the fermentation of grass silage, nutrient digestion, feed intake and performance of dairy cows

Even in optimized feeding conditions it is often difficult to reach the energy requirement of dairy cows in high performance lactation phase. Problems that commonly arise are economic losses for farms as well as health problems of dairy cows. Because energy input by concentrate feed is physiologically limited, the energy yield from roughages has to be increased. The silage additive 11 GFT (Pioneer Hi-Bred Northern Europe, Buxtehude, Germany) was tested in the present study for grass silage. It contains microorganisms producing fibrolytic enzymes (ferulate esterase), that are supposed to split the cell wall-connections during the process of ensiling in order to increase the amount of usable cell content for the cows.

A group of 25 early lactating cows (observation start at 37 th day in milk) got total mixed ration (TMR) prepared with the silage additive treated grass silage for 100 days of observation and an appropriate control group got the same TMR without specially treated grass silage. The ration fed to them was dominated by grass silage with an amount of 33 % of dry matter. In addition to this nutrient digestion was examined at dairy cows fed TMR and also applied to muttuns fed grass silage or TMR. Ruminal nutrient degradation was determined *in situ* by ruminally fistulated steers.

Storage stability did not increase for the grassilage treated with microorganisms which featured slightly higher acetic acid content. Feed intake was not reduced. The feeding test offered no differences for dry matter intake, milk yield, milk content and body condition between the feeding groups. The energy-balance showed negative results for both groups. No differences between the nutrient digestions of the silages could be seen in the digestion test. In this part of the study, the negative energy balance was even stronger for the cows fed with additive-treated silage. As a result no differences in nutrient degradation were noticeable between the test groups during the *in situ* examination for grass silage. The remarkably high lag-phases at the beginning of the degradation could not be explained from the data. In contrast the digestibility test performed on muttuns showed higher results for treated grass silage for ash-free neutral detergent fiber (NDFom) and ash-free acid detergent fiber (ADFom). For the tested group fed with TMR including treated grass silage, higher results were shown in the digestion of organic matter and NDFom. For both experiments the energy concentration of the treated feed was incremented.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----|
| Inhaltsverzeichnis..... | I |
| Verzeichnis der Abbildungen..... | III |
| Verzeichnis der Tabellen (inkl. Anhang) | IV |
| | |
| 1 Problemstellung und Zielsetzung | 1 |
| | |
| 2 Literaturübersicht | 3 |
| 2.1 Notwendigkeit der optimalen Energieversorgung der hochleistenden Milchkuh | 3 |
| 2.2 Abbau der pflanzlichen Zellwand | 5 |
| 2.2.1 Bestandteile der pflanzlichen Zellwand | 5 |
| 2.2.2 Aufbau der Zellwand und Interaktionen der Zellwandkomponenten | 11 |
| 2.2.3 Hemmung des Abbaus durch den Aufbau der Zellwand | 14 |
| 2.3 Einsatz faserspaltender Enzyme in der Fütterung von Wiederkäuern | 14 |
| 2.4 Aktuelle Forschungsergebnisse zum Einsatz faserspaltender Enzyme | 20 |
| | |
| 3 Material und Methoden | 26 |
| 3.1 Anbau und Ernte | 26 |
| 3.2 Fütterungsversuch mit Milchkühen..... | 28 |
| 3.2.1 Versuchsanlage, Versuchstiere und Haltung | 28 |
| 3.2.2 Fütterung der Tiere | 30 |
| 3.2.3 Durchführung des Versuchs und Datenerfassung | 32 |
| 3.2.4 Statistische Auswertung | 33 |
| 3.3 Verdauungsversuch mit Milchkühen..... | 35 |
| 3.3.1 Versuchsanlage, Versuchstiere, Haltung und Fütterung | 35 |
| 3.3.2 Durchführung des Versuchs und Datenerfassung | 37 |
| 3.4 Verdauungsversuch mit Hammeln | 38 |
| 3.4.1 Versuchsanlage, Versuchstiere, Haltung und Fütterung | 38 |
| 3.4.2 Durchführung des Versuchs und Datenerfassung | 39 |
| 3.5 <i>In situ</i> -Versuch | 40 |
| 3.5.1 Versuchsanlage, Versuchstiere, Haltung und Fütterung | 40 |
| 3.5.2 Durchführung des <i>in situ</i> -Versuchs..... | 41 |
| 3.5.3 Bestimmung von TM, NDFom und ADFomin den <i>in situ</i> -Proben | 42 |
| 3.5.4 Erfassung der Verluste an kleinen Partikeln | 43 |
| 3.5.5 Kalkulationen und statistische Auswertung | 44 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4 | Ergebnisse | 46 |
| 4.1 | Futteranalysen | 46 |
| 4.4.1 | Inhaltsstoffe der Grassilagen | 46 |
| 4.4.2 | Zusammensetzung der anderen Rationskomponenten | 48 |
| 4.2 | Fütterungsversuch mit Milchkühen | 51 |
| 4.2.1 | Futtermengenleistungen | 51 |
| 4.2.2 | Milchmengenleistungen und Milchhaltsstoffe | 52 |
| 4.2.3 | Körperkondition | 58 |
| 4.2.4 | Energiebilanz | 59 |
| 4.3 | Verdauungsversuch mit Milchkühen | 62 |
| 4.3.1 | Futteranalysen und Futtermengenleistungen | 62 |
| 4.3.2 | Verdaulichkeiten | 64 |
| 4.3.3 | Energiebilanz | 65 |
| 4.4 | Verdauungsversuch mit Hammeln | 66 |
| 4.4.1 | Futteranalysen | 66 |
| 4.4.2 | Verdaulichkeiten | 68 |
| 4.5 | <i>In situ</i> -Versuch | 70 |
| 5 | Diskussion | 74 |
| 5.1 | Grassilagen | 74 |
| 5.2 | Leistungs- und Körperkonditionskenngrößen im Fütterungsversuch | 76 |
| 5.2.1 | Futtermengenleistungen | 76 |
| 5.2.2 | Milchmengenleistungen und Milchhaltsstoffe | 76 |
| 5.2.3 | Körperkondition | 78 |
| 5.3 | Nährstoffabbau | 79 |
| 5.3.1 | Verdauungsversuch mit Milchkühen | 79 |
| 5.3.2 | Verdauungsversuch mit Hammeln | 80 |
| 5.3.3 | Nährstoffabbau <i>in situ</i> | 81 |
| 6 | Schlussfolgerungen | 84 |
| | Anhang | 87 |
| | Literaturverzeichnis | 94 |
| | Eidesstattliche Erklärung | 105 |

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung des Schichtenbaus der pflanzlichen Zellwand und der Hauptbestandteile der Schichten | 12 |
| Abbildung 2: Richtung des Dickenwachstums und des Ligninkonzentrationsgradienten..... | 13 |

VERZEICHNIS DER TABELLEN (INKL. ANHANG)

| | |
|--|-------|
| Tabelle 1: Auswahl aktueller Forschungsergebnisse von Fütterungsversuchen mit faserspaltenden Enzymen | 21/22 |
| Tabelle 2: Kalkulierter Zusammenhang der TMR des Versuchs mit Milchkühen mit unbehandelter und behandelter Grassilage auf Trockenmassebasis in Prozent..... | 31 |
| Tabelle 3: Statistisch untersuchte Merkmale, ihre Einheit und Erfassungshäufigkeit..... | 34 |
| Tabelle 4: Kalkulierte Zusammensetzung der TMR des Verdauungsversuchs mit unbehandelter und behandelter Aufbau der Arbeit Grassilage auf Trockenmassebasis in Prozent | 36 |
| Tabelle 5: Chemikalien und ihre angewandten Mengenzur Herstellung von fünf Litern NDF- bzw. ADF-Lösung in Gramm soweit nicht anders angegeben | 42 |
| Tabelle 6: Analysierte Nährstoffgehalteder behandelten und der unbehandelten Grassilagen (n=3)sowie kalkulierte Nährstoffgehalte der TMR in g/kg TM sowie g/kg (TM), je kg TM (Strukturwert) und MJ NEL/kg TM (NEL)..... | 46 |
| Tabelle 7: Analyseergebnisse der unbehandelten und der behandelten Grassilage (n=3) hinsichtlich der Gärsäuren, pH-Werte, Ammoniak-N am Gesamt-N sowie Ethanolgehalt in g/kg TM falls nicht anders angegeben..... | 48 |
| Tabelle 8: Analysierte Nährstoffgehaltedes Weizens sowie mittlere gewichtete Nährstoffgehalte der Maissilagen (n=2) und der Mischfutterchargen (n=14; NDFom/ADFom: n=7) in g/kg TM soweit nicht anders angegeben..... | 50 |
| Tabelle 9: Mittlere Futteraufnahmen (kg), Standardabweichungen (kg) und Signifikanzen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen..... | 52 |
| Tabelle 10: Mittlere Milchmengenleistungen, Standardabweichungen und Signifikanzen der Versuchsgruppen im Milchviehversuch | 53 |
| Tabelle 11: Mittelwerte, Standardabweichungen und Signifikanzen der Milchhaltsstoffe beider Versuchsgruppen im Milchviehversuch..... | 57 |
| Tabelle 12: Mittelwerte der Körperkonditionskenngrößen, Standardabweichungen und Signifikanzen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen..... | 59 |
| Tabelle 13: Mittelwerte (MJ), Standardabweichungen (MJ) und Signifikanzen der Energiekenngrößen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen..... | 61 |
| Tabelle 14: Kalkulierte Analyseergebnisse der während des Verdauungsversuchs gefütterten TMR in g/kg TM soweit nicht anders angegeben..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 15: Mittlere Trockenmasse-, Rohprotein-, Rohfett-, Rohfaser-, NDFom- und ADFom- Aufnahme sowie Standardabweichungen bei den Kühen mit TMR mit unbehandelter Grassilage (n = 3) und mit TMR mit behandelter Grassilage (n = 4) im Verdauungsversuch in kg TM pro Tag..... | 63 |
| Tabelle 16: Verdaulichkeiten, Standardabweichungen und Signifikanzniveau der TMR mit unbehandelter Grassilage (n = 3) und der TMR mit behandelter Grassilage (n = 4) in Prozent oder MJ/kg TM | 64 |
| Tabelle 17: Energiebilanz der Versuchsgruppen im Verdauungsversuch mit Milchkühen in MJ pro Kuh und Tag | 65 |
| Tabelle 18: Analysierte Nährstoffgehalte der unbehandelten und der behandelten Grassilagen und ihre Gärsäuren sowie die Nährstoffgehalte der TMR in g/kg TM und MJ NEL/kg TM (NEL) im Verdauungsversuch mit Hammeln..... | 67 |
| Tabelle 19: Verdaulichkeiten, Standardabweichungen und Signifikanzen im Verdauungsversuch mit Hammeln für die unbehandelte und die behandelte Grassilage sowie für die TMR mit unbehandelter und behandelter Grassilage in Prozent soweit nicht anders angegeben..... | 69 |
| Tabelle 20: Mittelwerte und Standardabweichungen der <i>in situ</i> - Abbaukenngrößen für Trockenmasse, NDFom und ADFom (jeweils unbehandelt/ behandelt) in Prozent falls nicht anders angegeben..... | 70 |
| Tabelle 21: Irrtumswahrscheinlichkeiten der <i>in situ</i> -Abbaugrößen zwischen den Versuchsgruppen für Trockenmasse, NDFom und ADFom ($p < 0,05$)..... | 71 |
| Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Signifikanzniveaus der Verzögerungszeit bis zum Abbaubeginn in Stunden für Trockenmasse, NDFom und ADFom (jeweils unbehandelt/ behandelt)..... | 72 |
| Tabelle 23: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent (jeweils unbehandelt/ behandelt) sowie Signifikanzen des effektiven Nährstoffabbaus im <i>in situ</i> - Versuch für Trockenmasse, NDFom und ADFom bei angenommenen Passageraten von 2 Prozent (PR 2), 4 Prozent (PR 4) und 6 Prozent (PR 6) pro Stunde..... | 78 |

Tabelle im Anhang:

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen.....87

1 Problemstellung und Zielsetzung

Für viele Tierarten stellen Pflanzenmaterialien eine wichtige oder die alleinige Nahrungsquelle dar (VAN SOEST 1994). Zwischen den Verdaulichkeiten einzelner Pflanzenmaterialien durch Wiederkäuer existieren große Unterschiede. So sind Wiederkäuer trotz der Unterstützung durch ruminale Mikroorganismen nicht in der Lage, die in den Zellwandpolysacchariden (vor allem Zellulose, Hemizellulosen, Pektine) gespeicherte Energie vollständig zu nutzen (BUXTON und REDFEARN 1997). Ihr Abbau wird durch die unterschiedlichen Komponenten in der Zellwand und deren komplexen Verknüpfungen gehemmt (VAN SOEST 1994). Dies gilt es bei der Fütterung von Nutztieren zu berücksichtigen.

In den letzten Jahren ist mit den Leistungen der Tiere auch ihr Energiebedarf stark angestiegen. Da nach der Kalbung die Milchproduktion in kürzester Zeit stark zunimmt (STAPLES et al. 1990), kann der Energiebedarf in vielen Fällen trotz optimaler Fütterung vor allem während der Hochleistungsphase nicht gedeckt werden (BAUMAN und CURRIE 1980). Die Gründe hierfür sind neben dem hohen Energiebedarf die begrenzte Trockenmasseaufnahme, die nach der Kalbung langsamer ansteigt als der Energiebedarf zur Milchbildung (KERTZ et al. 1991), wodurch es in vielen Fällen zu einem Energiedefizit kommt. Futtermittel mit einer hohen Konzentration an Zellwandbestandteilen können grundsätzlich nicht in einer zur Deckung des Energiebedarfs ausreichenden Menge aufgenommen werden (JUNG und ALLEN 1995). Auch kann die Energie der Zellwandpolysaccharide von den Tieren nur unvollständig genutzt werden, da diese Nährstoffe auf Grund des komplexen Aufbaus der Zellwände selbst für Wiederkäuer nur schwer zugänglich sind. Zudem kommt es während der Verdauungsprozesse zu Energieverlusten (Fermentationswärme, Methan; HOFFMANN 1996).

Kann der Energiebedarf eines Tieres nicht gedeckt werden, kommt es zur negativen Energiebilanz (BANOS et al. 2005). Die daraus resultierenden Folgen sind vielfältig und reichen von wirtschaftlichen Verlusten durch Fruchtbarkeitsstörungen und einem Abfall der Milchmengenleistung bis hin zu Stoffwechselstörungen bei der Milchkuh. Dies kann zu Folgeerkrankungen wie Ketose, Klauenkrankheiten und einer verminderten Infektionsabwehr führen (DE BOEVER et al. 1993, GASTEINER 2000).

Um die Gefahr eines Energiedefizits zu verringern, wird in vielen Betrieben ein hoher Konzentratfutteranteil in der Ration eingesetzt (STEINWIDDER und ZEILER 2003). Allerdings ist das Aufrechterhalten eines notwendigen Mindeststrukturgehaltes der Ration aus physiologischen Gründen dringend erforderlich, was den maximalen Einsatz energiereichen Konzentratfutters begrenzt. In einer Vielzahl von Rationen für Hochleistungskühe kann daher auf Grund der Acidosegefahr der Konzentratfutteranteil nicht weiter gesteigert werden. Folglich müssen Alternativen gefunden werden, um die Energieversorgung der Tiere ohne weiteren Einsatz von Konzentratfutter zu verbessern. Eine Möglichkeit liegt in einer Erhöhung des Nutzungsgrades der im Grobfutter vorhandenen Energie. Dabei besteht ein Potenzial zur Verbesserung der Energieversorgung von Hochleistungskühen in einer Erhöhung der Verfügbarkeit der in den Zellwandpolysacchariden gespeicherten Energie.

Auch hohe Konzentratfutterpreise verstärken den Anreiz, den Anteil der aus dem Grobfutter gewonnenen Energie zu maximieren und so den Konzentratfuttereinsatz zu reduzieren, da die Futterkosten einen bedeutenden Anteil an den Produktionskosten der Milchkuhhaltung ausmachen (COLLARD et al. 2000). Daher ist es auch ökonomisch interessant, einen möglichst großen Anteil des Energiebedarfs der Milchkühe aus betriebseigenem Grobfutter zu decken (SPIEKERS 2007).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine mögliche Vorgehensweise zur Verbesserung der Verfügbarkeit der Zellwandpolysaccharide in konservierten Grünlandaufwüchsen aufzuzeigen und die vorhandene Datengrundlage zu erweitern. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass der Einsatz spezieller faserspaltender Enzyme dazu beitragen kann, die Zellwandstrukturen in höherem Maße aufzuschließen. Diese Enzyme werden durch Mikroorganismen (hier vor allem *Lactobacillus buchneri*) produziert, die im vorliegenden Versuch während des Erntevorganges dem Siliergut zugesetzt wurden. Generelles Ziel des Einsatzes eines solchen Siliermittels ist es, durch einen erhöhten Aufschluss der Zellwandverknüpfungen die Verfügbarkeit der Zellinhaltsstoffe zu verbessern, um so die Nährstoffverfügbarkeit und die Effizienz der Nährstoffnutzung aus dem Grobfutter zu erhöhen. Dies soll zu einer gesteigerten Energieversorgung und dadurch zu einer höheren Milchmengenleistung und einer verbesserten Tiergesundheit führen. Durch eine verstärkte Essigsäurebildung während des Silierprozesses soll zudem die aerobe Stabilität der Silage verbessert werden.

2 Literaturübersicht

2.1 Notwendigkeit einer optimalen Energieversorgung der hochleistenden Milchkuh

Da alle im lebenden Organismus stattfindenden biochemischen Reaktionen energieverbrauchende Prozesse sind (PFEFFER 1987), ist dieser ständig auf die Verfügbarkeit von Energie angewiesen (REEDS und MERSMANN 1991), um den uneingeschränkten Ablauf lebensnotwendiger biochemischer Reaktionen gewährleisten zu können. Der Körper ist zwar in der Lage, Energie aus dem oxidativen Abbau von Nährstoffen zu gewinnen, aber er kann diese nur in chemisch gebundener Form nutzen (PETRY 2005). Diese chemisch gebundene Energie wird entweder mit dem Futter aufgenommen oder stammt bei nicht ausreichender Nährstoffaufnahme mittelfristig aus dem Abbau von Körperreserven (COPPOCK 1985). Die wichtigsten Energieträger im Futter von Herbivoren sind Kohlenhydrate. Fette dienen primär der Energiespeicherung und Proteine dem Aufbau von Körperbaustoffen. Der Körper kann die in den Proteinen enthaltene chemische Energie nur teilweise nutzen (PETRY 2005).

Bei den zur Verdauung der Nährstoffe ablaufenden biochemischen Reaktionen kommt es zu Energieverlusten. Die nicht resorbierten Nährstoffe und Stoffwechselendprodukte werden über Fermentationswärme, Kot und Methan ausgeschieden (HOFFMANN 1996). Die in den nicht resorbierten Nährstoffen enthaltene chemische Energie kann vom Tier nicht genutzt werden (PFEFFER 1987) und stellt somit einen energetischen Verlust dar. Der Energieverlust bei einer Kuh beträgt von der Bruttoenergie bis hin zur Umsetzbaren Energie im Mittel 47 % (33 % Kot, 8 % Gärgase, 6 % Harn) (PETRY 2005). Zusätzlich treten Wärmeverluste auf, da bei allen Umsetzungen im Tierkörper Wärme frei und vom Körper abgegeben wird. Auch die darin enthaltene Energie kann vom Tier nicht genutzt werden.

Aufgrund gestiegener Milchmengenleistungen ist der Energiebedarf zur Milchbildung in den letzten Dekaden stark angestiegen und wird auch in Zukunft weiter zunehmen. Physiologisch bräuchte eine Kuh zur Versorgung eines Kalbes lediglich eine Milchmengenleistung von 1.500 kg Milch (BOSTEDT 2006). Die mittlere Milchmengenleistung lag 2009 bei 6.977 kg pro Kuh und Jahr (STATISTISCHES BUNDESAMT 2010). Hierbei handelt es sich allerdings um einen Mittelwert für das gesamte Bundesgebiet, der einer sehr großen regionalen und einzelbetrieblichen Streuung unterliegt. In vielen Praxisbetrieben liegen die Milchleistungen bei 7.500 bis deutlich über 10.000 kg mit steigender Tendenz (BOSTEDT 2006). Der

Organismus der Tiere muss den hohen Energiebedarf zur Milchproduktion decken (BAUMAN und CURRIE 1980). Daher steigt die Stoffwechselbelastung der Kuh beim Einsetzen der Laktation an (GRUMMER 1995).

Gegen Ende der Trächtigkeit ist der Nährstoffbedarf einer tragenden Kuh ca. 75 % höher als der einer gleich schweren, nicht tragenden Kuh (BAUMAN und CURRIE 1980). Zur Deckung des Energiebedarfs sind daher eine hohe Futteraufnahme und eine hohe Verdaulichkeit des Futters notwendig (WILSON 1993). Jedoch geht während der letzten drei Wochen vor der Geburt der Futterverzehr um ca. 30 - 35 % zurück (GRUMMER 1995), was die Deckung des erhöhten Energiebedarfs bei einsetzender Milchbildung deutlich erschwert. Die Kuh versucht, diesen Energiemangel durch die Bereitstellung zusätzlicher Energie aus dem Abbau von Körperreserven auszugleichen, jedoch reicht der daraus resultierende Energiegewinn zumeist nicht aus, um den gestiegenen Energiebedarf zur Milchbildung und den Erhaltungsbedarf zu decken (DE VRIES und VEERKAMP 2000).

Die Beziehung zwischen Energieaufnahme und Energiebedarf ist als Energiebilanz definiert (BUTLER und SMITH 1989). Sie liefert eine Aussage über den Energiestatus einer Milchkuh (COFFEY et al. 2002) und ist vor allem in den ersten Wochen post partum meist negativ (HARRISON et al. 1990). Ausmaß und Dauer einer negativen Energiebilanz zu Laktationsbeginn sind je nach Einzeltier sehr unterschiedlich ausgeprägt (BUTLER et al. 1981, DE VRIES und VEERKAMP 2000).

Die verringerte Nährstoffaufnahme führt zu einer reduzierten Glukoneogenese und zu einer verstärkten Ketonkörperbildung in der Leber (Ketogenese) (DIRKSEN 1973). Diese werden in der Herz- und Skelettmuskulatur sowie in der Niere effektiv metabolisiert. Wird dabei die Kapazität der Ketonkörpernutzung überschritten, werden die überschüssigen Ketonkörper über Milch, Harn und Atemluft ausgeschieden. Wird auch diese Kapazität überschritten, lagern sie sich im Körper an und können zu schweren Stoffwechselstörungen führen (SALLMANN und FUHRMANN 2005). Diese unphysiologische Anhäufung von Ketonkörpern im Blut sowie ihre vermehrte Ausscheidung wird als Ketose bezeichnet (GASTEINER 2000) und tritt vor allem in der Früh-laktation auf (BAIRD 1982).

Durch die teilweise stark ausgeprägte Mobilisation von Körperreserven zum Ausgleich des Energiedefizits kommt es bei Milchkühen zu einem Verlust an Körpersubstanz und Körperreserven (BUTLER und SMITH 1989). Der Energiemangel kann zu einer reduzierten Milchmengenleistung führen (BAIRD 1982) und das Auftreten von Klauenproblemen und Lahmheiten wird begünstigt (COLLARD et al. 2000). Zudem tritt eine Schwächung des Immunsystems ein, was zu einer verringerten Infektionsabwehr führen kann (BOSTEDT 2006). Vor allem die Gefahr des Auftretens von Mastitis wird durch die Immunsuppression deutlich gefördert (DRACKLEY 1999). Auch die Fruchtbarkeitsleistung der Tiere kann durch eine zu geringe Energieversorgung negativ beeinflusst werden (DE VRIES et al. 1999). Da Glukose die bedeutendste Energiequelle für die Eierstocktätigkeit ist, hemmt Glukosemangel die ovarielle Aktivität (STAPLES et al. 1990). Eine zu geringe Energieversorgung zu Laktationsbeginn kann zu Stillbrunst, Brunstlosigkeit, Ovulationsstörungen und unregelmäßigen Brunstzyklen führen (BUTLER 2003). Vor allem durch die vermehrte Bildung von Follikelzysten kann das zyklische Ovargeschehen langfristig blockiert werden (OBRITZHAUSER 2004). Durch Behandlungskosten, Tierverlusten und erhöhter Leerzeit kommt es zu wirtschaftlichen Verlusten (PLATEN 2003).

2.2 Abbau der pflanzlichen Zellwand

2.2.1 Bestandteile der pflanzlichen Zellwand

Die einzelnen Bestandteile der pflanzlichen Zellwand und ihre Verknüpfungen beeinflussen in hohem Maße deren Abbaubarkeit. Kohlenhydrate, Proteine und ein in Konzentration und Zusammensetzung variierender Ligninanteil sind die Hauptbestandteile der pflanzlichen Zellwand (PÉREZ et al. 2002). Von den mehr als einhundert in der Natur bekannten Monosacchariden werden nur zehn für den Aufbau von Zellwänden höherer Pflanzen genutzt. Dies sind Arabinose, Fruktose, Galaktose, Galakturonsäure, Glukose, Glukuronsäure, Mannose, Methylglukuronsäure, Rhamnose und Xylose (ÅMAN 1993). Die in den Pansen gelangenen pflanzlichen Polysaccharide lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Eine davon sind die Speicherpolysaccharide, wie Fructane, Saccharose und Stärke (VAN SOEST 1994). Sie dienen als Nährstoffreserve und müssen den Pflanzen rasch als Energiequelle zur Verfügung stehen. Daher weisen sie eine gute Zugänglichkeit für hydrolytische Enzyme auf und sind relativ leicht abbaubar. Die zweite Gruppe bilden die Strukturpolysaccharide. In den Zellwänden machen sie den größeren Anteil aus (CHESSON

und FORSBERG 1988). Sie sorgen für die Stabilität und Festigkeit der Gewebe höherer Pflanzen. Die Art und Weise ihrer Anordnung und Verknüpfung in der Zellwand bestimmt sowohl Ausmaß als auch Geschwindigkeit ihres Abbaus (CORNU et al. 1994). Generell verringert ihre vergleichsweise geringe Abbaubarkeit die Verfügbarkeit der von den Zellwänden eingeschlossenen Nährstoffe. Die Bestandteile der Zellwände sind vor allem Hemizellulosen, Lignin, Pektine und Zellulose. Diese sind von den besser verfügbaren Zellinhaltsstoffen (Kohlenhydrate, Nukleinsäuren, Lipide, Lipide, Mineralstoffe, Proteine und Vitamine) abzugrenzen (BREVES und LEONHARD-MAREK 2005).

Zellulose

Zellulose ist anteilmäßig und für den strukturellen Aufbau einer Pflanze die bedeutendste Komponente der Zellwand (NULTSCH 1974). Ihr Anteil an der Trockenmasse der Gesamtpflanze kann bei höheren Pflanzen bis zu 40 % betragen (VAN SOEST 1994). Damit ist Zellulose das häufigste in der Natur vorkommende Polysaccharid. Jedoch produzieren Säugetiere keine zum Abbau der Zellulose fähigen Enzyme (RUSSELL und WILSON 1996).

Zellulose lässt sich darstellen als eine Aneinanderreihung von Glukosemonomeren zu einer unverzweigten Molekülkette. Die hohe Kristallinität der Zellulose entsteht durch die parallele Anordnung der Zelluloseketten in den Zellwänden und ihre Verknüpfung untereinander durch Wasserstoffbrücken. Aus diesen Verknüpfungen entstehen die Elementarfibrillen. Sie bestehen aus ca. 36 Zelluloseketten mit einer Kettenlänge von bis zu 14.000 Glukoseeinheiten je Molekül (NULTSCH 1974). Diese unverzweigten „Fadenmoleküle“ liegen zu einem großen Teil in Form von Kristalliten (Micellen) mit einem Durchmesser von 3 - 4 nm vor. In die verbleibenden Freiräume zwischen den Micellen, deren Größe ca. 1 nm beträgt, lagern sich kleine organische Moleküle (z. B. Glukose oder Ionen) an (KULL 2000). Die Elementarfibrillen verbinden sich häufig zu größeren Einheiten. Durch die Bündelung von 3 - 20 Elementarfibrillen entstehen die Zellulosemikrofibrillen. Die Resistenz dieser verknüpften Zellulosemikrofibrillen gegenüber chemischem oder enzymatischem Abbau ist um ein vielfaches höher als die der ursprünglichen einzelnen Zelluloseketten (CHESSON und FORSBERG 1988). Da diese in der Regel mit Hemizellulosen, vor allem Xylanen, Mannanen, Galaktanen oder deren Kombinationen, durch Wasserstoffbrücken verbunden sind (BIDLACK et al. 1992), liegen diese so genannten Xyloglukane um die Mikrofibrillen (SCHOPFER und BRENNICKE 1999). Zwischen den Mikrofibrillen befinden sich

interfibrilläre Räume mit einer Größe von 5 - 40 nm (KULL 2000). Die zu Makrofibrillen verbundenen Mikrofibrillen sind in den Primärwänden regellos und in den Sekundärwänden parallel angeordnet (BRAUNE et al. 2007).

Die Abbaubarkeit der Zellulosefasern wird entscheidend durch die Intensität der Bindungen mit Hemizellulosen und Lignin, teilweise auch mit Cutin und Mineralstoffen, in der pflanzlichen Zellwand bestimmt (VAN SOEST 1994). Zellulose liegt in einer linearen Molekülkette mit β -1,4-glykosidischen Verknüpfungen vor. Stärke bildet dagegen Helices und α -1,4-glykosidische Bindungen aus. Verglichen mit den α -1,4-glykosidischen Bindungen der Stärke lassen sich die β -1,4-glykosidischen Bindungen der Strukturkohlenhydrate nicht durch tiereigene Enzyme oder Mikroorganismen aufbrechen. Die Zellulose im Grobfutter ist nicht nur mit den Hemizellulosen, dem Cutin und den Mineralstoffen verknüpft, sondern vielfach auch mit Lignin, was einen weiteren hemmenden Einfluss auf ihre Abbaubarkeit ausübt (VAN SOEST 1994). Da Säugetiere keine geeigneten tiereigenen Enzyme besitzen um β -1,4-glykosidische Bindungen zu lösen, sind sie dazu auf die Hilfe bakterieller Enzyme angewiesen.

Hemizellulosen

Im Allgemeinen werden Hemizellulosen als die Substanzgruppe bezeichnet, die sich mit alkalischer Lösung aus der Zellwand herauslösen lässt (CHESSON und FORSBERG 1988). Ihre Konzentration ist in der Grundsubstanz (Matrix) der Zellwände am höchsten (NULTSCH 1974). Die Zusammensetzung der Hemizellulosen in einer Zellwand ist zwischen den einzelnen Pflanzengattungen sehr verschieden. Ihre unterschiedlichen Monosaccharide bilden in der Regel ein heterogenes Polysaccharidgemisch (SCHOPFER und BRENNICKE 1999), vor allem aus Arabinoxylanen und β -Glukanen. Pektine treten dabei nur selten und in geringen Mengen auf. Dadurch und durch die verschiedenen Bindungstypen zwischen den Polysacchariden und anderen Zellwandbestandteilen ist die Verdaulichkeit der Hemizellulosen in den einzelnen Futtermitteln recht unterschiedlich (VAN SOEST 1994).

Da Hemizellulosen aus bis zu 250 verschiedenen Polysacchariden bestehen können, ist ihre Zusammensetzung in den jeweiligen Pflanzen verschieden. Verwendet werden sowohl Glukoseeinheiten mit geringem Polymerisierungsgrad, als auch Kohlenhydrate aus Hexosen

und Pentosen. Zu den Hexosen zählen D-Galaktose, D-Glukose und D-Mannose und zu den Pentosen Arabinose und D-Xylose. Sie können bei den einzelnen Pflanzenarten zu unterschiedlich ausgebildeten Ketten verknüpft sein. Je nach vorherrschendem Monosaccharid werden die Hemizellulosen daher in Pentosane oder Hexosane eingeteilt, wobei Pentosane vornehmlich aus Xylose und Arabinose und Hexosane aus Glukose und Mannose bestehen (NULTSCH 1974).

Xylane kommen zumeist in Monokotyledonen vor, sind nahezu unverzweigt und liegen in einer β -1,4-glykosidischen Verknüpfung vor (KULL 2000). Wichtige Zuckermonomere der Seitenketten sind α -1,3-glykosidisch gebundene L-Arabinofuranose und α -1,2-glykosidisch gebundene Glukuronsäure. Grasxylane sind oft über Esterbindungen miteinander verknüpft (HESPELL und WHITEHEAD 1990). β -Glukane kommen vornehmlich in unreifen Gräsern vor. Sie basieren auf Glukose und setzen sich aus β -1,4-glykosidisch verknüpften Glukopyranoseeinheiten zusammen. β -Glukane treten vornehmlich in den primären Zellwänden der Dikotyledonen auf. Der am häufigsten vorkommende Zucker der Mannane ist Mannose. Galaktoglukomannane und Glukomannane sind lineare Moleküle aus β -1,4-glykosidisch verknüpften Glukopyranosen und Mannopyranoseresten (HATFIELD 1989).

In den Zellwänden sind die Hemizellulosen mit Zellulose vergesellschaftet (KULL 2000). Dabei bildet die Zellulose den Rahmen der Pflanzenzelle, wohingegen die Hemizellulosen die Nicht-Zellulose-Polymere mit den Zellulosepolymeren verbinden (BIDLACK et al. 1992). Die Hemizellulosen unterscheiden sich von der Zellulose durch die monomeren Zuckerbausteine, die Kettenlänge und den Aufbau der Polymerkette. Zellulose besteht ausschließlich aus Glukoseeinheiten, Hemizellulosen dagegen aus unterschiedlichen Zuckerbausteinen. Die Polymerketten der Hemizellulosen sind im Vergleich zur Zellulose verzweigt, was für zusätzliche Stabilität der Zellwände sorgt (NULTSCH 1974). Durch die Bindungstypen und deren Anordnungen sind Hemizellulosen chemisch instabiler als Zellulose und im Allgemeinen weniger stark miteinander verbunden, wodurch sie eine geringere Resistenz gegenüber enzymatischer Hydrolyse aufweisen (HUNGATE 1988). Der Abbau der Hemizellulosen ist ein chemisch sehr komplexer Vorgang und durch die Beteiligung vieler verschiedener Enzyme gekennzeichnet (HESPELL und WHITEHEAD 1990).

Pektinstoffe

Unter dem Begriff „Pektine“ werden die Polymere zusammengefasst, die in heißer, neutraler Lösung (z. B. Ammoniumsulfat $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$) oder durch bestimmte Enzyme (Pektinasen) aus der Zellwand herauslösbar sind (SCHOPFER und BRENNICKE (1999), VAN SOEST (1994)). Pektine gehen verschiedene Arten von Querverbindungen ein und tragen damit zur Struktur der Pflanzenzelle bei (BIDLACK et al. 1992).

Pektine bilden einen Polysaccharidkomplex, der eine kettenförmige Struktur mit über 2.000 α -1,4-glykosidisch verknüpften Monomeren aufweist (CHESSON und FORSBERG 1988, KULL 2000). Es können sich Rhamnose-Seitenketten ausbilden, in denen oft auch andere Polysaccharide wie D-Galaktose, L-Arabinose oder Fruktose gebunden sind. Diese Ketten sind durch divalente Kationen (vor allem Ca^{2+} , Mg^{2+}) verknüpft (CHESSON und FORSBERG 1988, KULL 2000). Diese Brücken sind jedoch löslich und bilden sich nach dem Herauslösen an anderen Stellen neu, wodurch das Gewebe elastisch bleibt und in der Lage ist, sich dem Wachstum und der zunehmenden Reife der Pflanzen anzupassen (NULTSCH 1974).

Lignin

Neben Zellulose ist Lignin die mengenmäßig bedeutendste organische Verbindung in der Natur (HOFRICHTER 2000). Lignin bezeichnet ein komplexes Polymergemisch, das einen hohen Anteil Kohlenstoff enthält (POORTER 1992). Lignin wird nicht zu den Kohlenhydraten gezählt, sondern ist ein komplexes, aromatisches Heteropolymer (WENG et al. 2008). Lignin befindet sich hauptsächlich in der Mittellamelle der Zellen und den Zwischenräumen der Fibrillen (NULTSCH 1974). Durch Verknüpfungen mit anderen Zellwandbestandteilen verleiht es den Geweben Starrheit und Festigkeit und schützt sie vor enzymatischem Abbau. Eine wichtige Rolle spielen dabei auch die Verbindungen des Lignins mit monomeren phenolischen Säuren (OESTMANN et al. 1995). Neben ihrer Bedeutung für die Standfestigkeit höherer Pflanzen schützen die Ligninkomponenten den Pflanzenkörper durch ihre Verknüpfungen mit anderen Zellwandkomponenten vor Krankheitserregern, Schädlingen, Kälte und anderen Stressoren (BUXTON und REDFEARN 1997).

Im Allgemeinen wird unterschieden zwischen Kern-Lignin und Nicht-Kern-Lignin. Die Zusammensetzung des Kern-Lignins beeinflusst die Verdaulichkeit der Pflanze mehr als die mit zunehmender Reife der Pflanzen ansteigende Kern-Lignin-Konzentration (JUNG 1989). Das Nicht-Kern-Lignin wird von phenolischen Monomeren (u. a. Ferulasäure, *p*-Cumarsäure) gebildet und weist ein relativ geringes Molekulargewicht auf. Ferulasäure und *p*-Cumarsäure können sowohl Ester- als auch Etherbindungen über ihre funktionellen Gruppen (Hydroxylgruppe, Carboxylgruppe) eingehen. In vielen Fällen ist Lignin mit Phenolsäuren verknüpft (JUNG und ALLEN 1995). Phenolische Komponenten können auf die faserabbauenden Mikroorganismen toxisch wirken (OESTMANN et al. 1995), jedoch ist ihre Konzentration im Pansen für eine direkte verdauungshemmende Wirkung zu gering (BUXTON und REDFEARN 1997). Die Ferulasäure geht mit Lignin Ether- und mit den Polysacchariden Esterbindungen ein. Dagegen ist die *p*-Cumarsäure zwar mit Lignin verestert, aber nicht durch Etherbindungen mit den Polysacchariden verknüpft. Dadurch weist sie ähnliche Eigenschaften auf wie eine Lignineinheit (CORNU et al. 1994). Jedoch ist eine direkte Bedeutung der Phenolsäuren bei der Hemmung des Zellwandabbaus unwahrscheinlich, da ihre Konzentration bei praxisüblichen Fütterungsbedingungen in aller Regel zu gering ist, um die Enzymaktivität effektiv vermindern zu können (CHESSON und FORSBERG 1988). Bei Gräsern steigt mit zunehmender Reife der *p*-Cumarsäureanteil an (OESTMANN et al. 1995), da der *p*-Cumarsäuregehalt mit der zunehmenden Lignineinlagerung in Verbindung steht (JUNG und VOGEL 1986).

Lignin wird durch Dehydrierung und Polymerisation von Cumarylalkohol, Coniferylalkohol und Sinapylalkohol gebildet und während der Entwicklung der Pflanze zur Stabilisierung in die Zellwände eingelagert. Die Anteile dieser drei Substanzen in der Zellwand sind abhängig von Spezies und Alter der Pflanze. Im Gegensatz zu Polysacchariden, bei denen glykosidische Bindungen eine Rolle spielen, lassen sich bei Lignin zwanzig verschiedene Bindungsarten identifizieren (CHESSON und FORSBERG 1988). Dadurch können die verknüpften Grundbausteine des Lignins durch tiereigene Enzyme nicht gespalten werden (JUNG und ALLEN 1995). Die Stärke dieser Bindungen ist verantwortlich für die Resistenz der Pflanze gegenüber chemischem oder mikrobiellem Abbau (CHESSON und FORSBERG 1988). Im Allgemeinen gilt Lignin als die Verbindung mit dem stärksten negativen Einfluss auf die Verdaulichkeit der Zellwand (SÜDEKUM und HASSELMANN 1989). Die Ligninkonzentration steigt exponentiell mit der physiologischen Reife der Pflanzen an (JUNG 1989). Die Zellwand enthält bis zu 30 nm große Hohlräume, in die mit zunehmender Reife mehr und mehr Lignin eingelagert wird (KULL 2000). Die fortschreitende Einlagerung von Lignin und seine

Quervernetzung festigt die Zelle und leitet so das Ende des Zellwachstums ein (SCHOPFER und BRENNICKE 1999). Zudem umhüllt Lignin die Nährstoffe im Zellinneren, um sie vor enzymatischem Abbau zu schützen (VAN SOEST 1994). JUNG und ALLEN (1995) sehen daher den Hauptgrund für die Hemmung der Zellwandverdauung durch Lignin in der Ausbildung verschiedener Arten von Verknüpfungen zwischen Lignin und den Zellwandpolysacchariden. Diese Verknüpfungen und der chemische Aufbau des Lignins beeinflussen die Verdaulichkeit mindestens genauso stark wie die Gesamtmenge an Lignin im Gewebe (CORNU et al. 1994).

Wachse, Suberin und Cutin

Die Cuticula besteht aus zwei Schichten mit Wachssubstanzen und Cutin sowie einem Polymer aus Fettsäuren und Hydroxyfettsäuren (KULL 2000). Um an die Nährstoffe im Inneren der Zellen zu gelangen, müssen sich Mikroorganismen auch im Pansen unterhalb der Cuticula ansiedeln (AKIN et al. 1974). Durch defekte Ränder der Futterpartikel, Beschädigungen der Cuticula oder natürliche Blattöffnungen wie Stomata oder Lentizellen können sie in die Zellwand eindringen (CHESSON und FORSBERG 1988) und erst dann die Zellen von innen nach außen abbauen (BUXTON und REDFEARN 1997).

Glykoproteine

Die Glykoproteine der Primärwand setzen sich aus Glukoprotein und sauren Arabino-Galaktan-Proteinen zusammen. Diese bestehen aus Polypeptidketten, die glykosidisch mit Aminosäureresten verknüpft sind. Ihr Gehalt an Galaktose, Arabinose und anderen Zuckern führt zu einem Kohlenhydratanteil des Moleküls von ca. 50 %. Ein Teil der Moleküle ist an Querverbindungen in den Zellwänden beteiligt, die einen hemmenden Einfluss auf die Verdaulichkeit haben können (SCHOPFER und BRENNICKE 1999).

2.2.2 Aufbau der Zellwand und Interaktionen der Zellwandkomponenten

Die Protoplasten höherer Pflanzen sind von einer stabilen Zellwand umgeben (BRAUNE et al. 2007). Verantwortlich für die stabilisierenden und festigenden Eigenschaften der Zellwand sind Interaktionen zwischen den Polysacchariden und den anderen Zellwandkomponenten (HATFIELD 1989). Während der Entwicklung der Pflanze werden zunächst die Mittellamelle, dann die Primärwände und dann die Sekundärwände angelegt (Abbildung 1). Je nach Pflanzenart setzen sie sich zusammen aus Verknüpfungen von D-Glukose, D-Galaktose,

D-Galakturonsäure, L-Rhamnose, L-Fruktose, D-Xylose, D-Arabinose und Polypeptiden (SCHOPFER und BRENNICKE 1999).

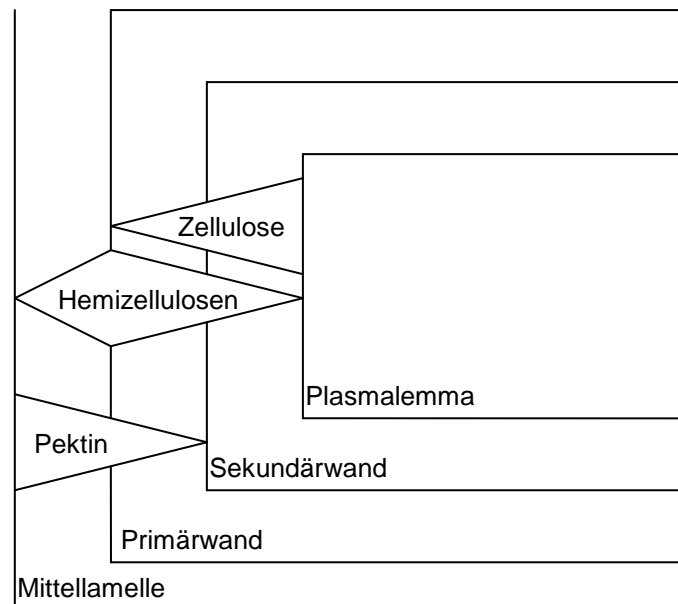


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Schichtenbaus der pflanzlichen Zellwand und der Hauptbestandteile der Schichten

Quelle: Nach FRANZ (1991)

Nach WEIMER (1996) gehen Veränderungen in der Verdaulichkeit von Futtermitteln mit der fortschreitenden Entwicklung der Struktur der pflanzlichen Zellwand einher, da sich mit zunehmender Reife die Bindungen zwischen den Wandpolymeren verändern und das Eindringen hydrolytisch wirkender Mikroorganismen oder deren Enzyme in das Zelllumen erschwert wird.

Bei der Zellteilung verschmelzen die Inhalte zusammenfließender Golgi-Vesikel (vor allem Pectinstoffe (KULL 2000)) zu einer Zellplatte, aus der sich die Mittellamelle bildet (SCHOPFER und BRENNICKE 1999). Dabei wirkt Pektin als Kittsubstanz, die die beiden benachbarten Zellwände miteinander verbindet (SCHOPFER und BRENNICKE 1999). Die Bildung der Mittellamelle verläuft vom Inneren der Zelle nach außen, bis die Zelle geteilt ist. Durch weitere Anlagerungen von Pektinen, Proteinen, Hemizellulosen und zunächst nur wenig Zellulose kommt es zur Ausbildung der Primärwand. Sie besteht aus Polysacchariden, Proteinen und Phenolsäuren. Zellulose, Hemizellulosen und Pektine werden während des

Primärwandwachstums eingelagert (JUNG und ALLEN 1995). Die Mikrofibrillen der Primärwand liegen in einer Matrix aus Pektinstoffen und Hemizellulosen (KULL 2000) und sind durch Wasserstoffbrücken verknüpft. Die Primärwände sind elastisch und dehnbar, da keine Querverbindungen existieren und die Mikrofibrillen unregelmäßig verteilt sind (JUNG 1997). An die Fibrillen lagern sich Xyloglukane an (SCHOPFER und BRENNICKE 1999). Die zunehmende Einlagerung von Gerüstsubstanzen in die Zellwand beendet schließlich das Wachstum der Zelle (BRAUNE et al. 2007). Auch die Synthese des abbauhemmenden Lignins von der Mittellamelle aus beginnt während der Primärwandbildung.

Bei der Ausbildung der Sekundärwand nach dem Ende des Zellwachstums werden von innen weitere, zellulosereiche Wandschichten an die Primärwand angelagert (Abbildung 2) (SCHOPFER und BRENNICKE 1999) und die Zellwand wird dicker. Ein Teil der Fibrillen ist in Lignin eingebettet (BIDLACK et al. 1992), woraus eine hohe Festigkeit des Pflanzengewebes resultiert. Durch Bindungen bilden Hemizellulosen und Lignin das „krustierende Material“ der Sekundärwand (VAN SOEST 1994). Damit ist Lignin in den Sekundärwänden der wichtigste Faktor bei der Hemmung des Abbaus der Strukturkohlenhydrate (SÜDEKUM et al. 1995).

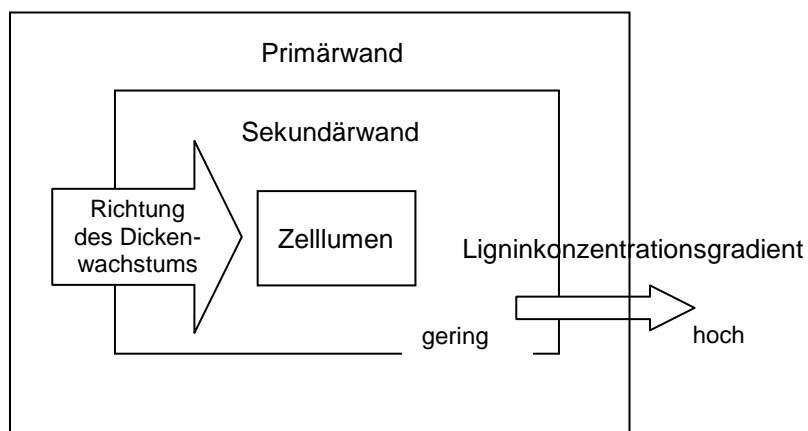


Abbildung 2: Richtung des Dickenwachstums und des Ligninkonzentrationsgradienten

Quelle: Nach JUNG und ALLEN (1995)

2.2.3 Hemmung des Abbaus durch den Aufbau der Zellwand

Die verschiedenen Gewebearten der Pflanzen können von den Tieren nicht in gleichem Maße verdaut werden (JUNG 1997). So sind die Verdauungsenzyme der Tiere beim Abbau von Strukturpolysacchariden auf die Unterstützung durch ruminale, colonale oder caecale Mikroorganismen angewiesen (VAN SOEST 1994).

Die Verfügbarkeit lässt sich nach VAN SOEST (1994) in drei Klassen einteilen:

1. Vollständige Verfügbarkeit

Vollständig verfügbare Substanzen sind sowohl durch Säugetierenzyme als auch durch Mikroorganismen abbaubar. Zu dieser Gruppe gehören zelluläre Substrate wie Zucker, Stärke, organische Säuren, Proteine, Lipide und auch leicht abbaubare Pektine. Diese werden üblicherweise den Zellwandkomponenten zugerechnet, weil sie nicht durch tiereigene Enzyme abgebaut werden können, aber eine hohe Nährstoffverfügbarkeit aufweisen.

2. Unvollständige Verfügbarkeit

Zu den unvollständig verfügbaren Substanzen zählen die Strukturkohlenhydrate der Zellwand (Zellulose, Hemizellulosen), die je nach Ausbildung ihrer Verknüpfungen durch die Mikroorganismen in unterschiedlichem Maße abbaubar sind.

3. Vollständige Nichtverfügbarkeit

Die Substanzen dieser Gruppe sind weder durch Säugetierenzyme, noch durch Mikroorganismen abbaubar. Dazu gehören Lignin, Cutin, Silikate, Tannine, Polyphenole und Wachse.

Die Anteile der Substratklassen in einer Pflanze variieren mit ihrem Alter, der Art, dem Gewebetyp und dem Reifegrad. Vor allem die Interaktionen innerhalb der Zellwandmatrix bestimmen die Geschwindigkeit und das Ausmaß des Abbaus (HATFIELD 1989).

Die Verdaulichkeit der Zellwand wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

1. Pflanzenphysiologische Faktoren

Um Assimilation betreiben zu können, ist zu Beginn der Vegetation der Blattanteil an der Gesamtpflanze relativ hoch. Die Pflanze enthält mehr verfügbare Kohlenhydrate und ist leichter abbaubar. Mit zunehmender Größe und Reife nimmt der Anteil an Strukturpolysacchariden zur Stützung der Pflanze zu. Durch die Verschiebung der Anteilsverhältnisse Fasern zu löslichen Zellkomponenten nehmen Verdaulichkeit (STEINWIDDER 2002) und Energielieferungsvermögen (BUXTON und REDFEARN 1997) ab. Nach JUNG und ALLEN (1995) sind die Verknüpfungen der Zellwandbestandteile unmittelbar verantwortlich für die Verdaulichkeit, da Zellwandbestandteile im Vergleich zu den löslichen Komponenten langsamer und nur unvollständig verdaulich sind. Auch Lignin ist ein wichtiger Faktor bei der Hemmung der Verdaulichkeit. AKIN und RIGSBY (1987) stellen heraus, dass es deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung des lignifizierten Gewebes gibt, wodurch die Verdaulichkeit unterschiedlich stark beeinflusst wird. JUNG und VOGEL (1986) beschreiben eine lineare Beziehung zwischen der Verdaulichkeit der Futtermittel und ihrer Ligninkonzentration auf Trockenmassebasis. Das Ausmaß der Zellwandlignifizierung hängt vom Reifestadium, dem Gewebetyp und der Pflanzenart ab. Sowohl die Konzentration des Kern- als auch des Nicht-Kern-Lignins wird mit einer sinkenden Abbaubarkeit des Futters in Verbindung gebracht. Ihr Einfluss auf die Hemmung der Verdaulichkeit hängt jedoch in hohem Maße von ihrer chemischen Zusammensetzung ab (JUNG 1989). Nach GRABBER (2005) kann eine züchterische Reduzierung der Ligninkonzentration die enzymatische Hydrolyse und dadurch den Nutzungsgrad der Strukturpolysaccharide verbessern.

Zudem bestimmt die Ausbildung von Verknüpfungen des Lignins mit den Hemizellulosen (Lignin-Hemizellulosen-Komplex) die Verdaulichkeit, da die Querverbindungen des Lignins mit den Polysacchariden eine physikalische und strukturelle Barriere gegenüber dem Abbau der Strukturpolysaccharide darstellen (BUXTON und REDFEARN 1997). Dabei hängt die Wirkung des Komplexes auf die Hemmung der Verdaulichkeit mit dem gebildeten Bindungstyp (Esterbindung, Etherbindung, glykolytische Bindung) zusammen. Substanzen, die die mikrobielle Anheftung hemmen (z. B. Tannine, Methylzellulose) können die Zelluloseverdauung sogar vollständig aufheben (MCALLISTER et al. 1994). Auch ein hoher Cutin- und Wachsgehalt auf der pflanzlichen Oberfläche verhindert die zum Abbau notwendige Anhaftung der Mikroorganismen (VAN SOEST 1994).

2. Erntezeitpunkt

Wie bereits erwähnt, verändert sich mit fortschreitender Reife der Pflanzen ihre stoffliche Zusammensetzung, da Phenolsäuren und Lignin in fortschreitender Konzentration sowie in einer spezifischen Anordnung und Reihenfolge in die Zelle eingelagert werden (JUNG und ALLEN 1995), wodurch der Anteil strukturwirksamer Pflanzenbestandteile stetig zunimmt (BUXTON und REDFEARN 1997). Durch diese Veränderungen steigt mit zunehmendem Trockenmassegehalt die Strukturwirksamkeit der Rohfaserkomponente an (STEINWIDDER 2002). So sank in einem Experiment von VERBIČ (2002) die Verdaulichkeit von Gras von 82 % bei einem Erntezeitpunkt in der letzten Aprilwoche auf 60 % bei Ernte in der ersten Juniwoche. Dadurch ist auch der Zeitbedarf zum Wiederkauen reifer Pflanzenteile höher als für unreife und für Gräser höher als für Leguminosen (BUXTON und REDFEARN 1997).

3. Futterkonservierung

Im Zusammenhang mit der Futterkonservierung ist zunächst die mechanische Behandlung des Futters während der Ernte von Bedeutung. Hier ist der Einfluss der Partikellänge auf die Strukturwirksamkeit des Grobfutters zu nennen, der durch Einstellungen an den Erntemaschinen angepasst werden kann. Die Partikellänge hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kau- und Wiederkauaktivität, jedoch kaum Auswirkungen auf die Strukturwirksamkeit (YANG und BEAUCHEMIN 2006). Eine erhöhte Kauaktivität durch größere Partikellängen fördert den Speichelfluss, der im Pansen als Puffer gegen die Pansensäuren wirkt und dort ein für den Abbau der Kohlenhydrate optimales Niveau aufrecht erhält (STEINWIDDER 2002). Des Weiteren beeinflusst der Zerkleinerungsgrad des Futters die Passagerate aus oder durch die Vormägen (YANG und BEAUCHEMIN 2006). Zudem müssen die ruminalen Bakterien die unverdauliche Kutikula aufspalten (AKIN et al. 1974). Dazu muss die Epidermis zumindest stellenweise zerstört sein, weshalb die Zerkleinerung des Futters durch die Kauaktivität der Tiere wichtig für den Verdauungsprozess ist (VAN SOEST 1994). Durch eine schlechte Futterkonservierung können sich Mykotoxine im Futter bilden, die möglicherweise eine toxische Wirkung haben. Dies kann bei Tieren zu einem reduzierten Blutfluss, einer Intoleranz gegenüber hohen Temperaturen und reduzierter Futteraufnahme führen, was die Effektivität der Ingestaverdauung negativ beeinflusst (GALYEAN und GOETSCH 1993). Zudem wirken einzelne Mykotoxine (z. B. Aflatoxine) direkt reduzierend auf die Verdaulichkeit von Zellulose (DIEKMAN und GREEN 1992).

4. Futterration und Futteraufnahme

Der Anteil an Zellwandpolysacchariden in einer Ration und ihre Verdaulichkeit begrenzt das Futteraufnahmepotenzial der Tiere (JUNG und ALLEN 1995). Ihre Verdaulichkeit wird vor allem von der Rationszusammensetzung, dem Fütterungsniveau und der physikalischen Struktur des Futters beeinflusst (SÜDEKUM und HASSELMANN 1989). Der stärkste limitierende Faktor für die Grobfutteraufnahme ist nach VERBIČ (2002) die ruminale Abbaurrate. Diese steht in negativer Beziehung zum Gehalt an Strukturpolysacchariden in der Zellwand der Futtermittel (JUNG und ALLEN 1995). Bei der Rationszusammensetzung gilt, je struktureicher das von den Tieren aufgenommene Futter ist, umso schneller wird der Pansen gefüllt und umso rascher tritt ein Sättigungsgefühl bei den Tieren ein. Die Pansenfüllung wird determiniert durch die Abbaurrate, die Passagerate der Ingesta und dem Anteil an Zellwandpolysacchariden im Futter (JUNG und ALLEN 1995).

Ein indirekter Einfluss entsteht über den Speichelfluss, der im Zusammenhang mit der Futteraufnahme steht. Durch eine höhere Futteraufnahme steigt die Kau- und Wiederkauaktivität der Tiere, wodurch es zu einer erhöhten Speichelbildung kommt. Durch die höhere Bikarbonatbildung wird der puffernde Effekt des Speichels im Pansen verstärkt (HUNGATE 1988). Dies verhindert ein Absinken des pH-Wertes im Pansen durch flüchtige organische Säuren, was einerseits die Aktivität der Pansenmikroorganismen zur Proteinsynthese und andererseits auch die Verdaulichkeit der Faserkomponenten der Pflanzen verringern würde. Folglich steigt mit einer Erhöhung des pH-Wertes im Pansen auch die zellulolytische Aktivität im Pansensaft an (VERBIČ 2002).

2.3 Einsatz faserspaltender Enzyme in der Fütterung von Wiederkäuern

Die ersten Enzymzusätze für Wiederkäuerrationen wurden in den 1960er Jahren eingesetzt. Damals war jedoch die allgemeine Kenntnis der notwendigen Bedingungen für einen Einsatz von Futterenzymen gering und die Kosten zur Herstellung und Aufbereitung der Futterenzyme deutlich höher als heute (BEAUCHEMIN et al. 2003). Auch waren Forscher der Ansicht, dass sich die hydrolytische Kapazität des Pansens der Wiederkäuer durch den Zusatz von Enzymen nicht weiter steigern ließe (ADESOGAN 2005). Da die Ergebnisse der einzelnen Studien weit uneinheitlicher ausfielen als heute, hat sich die Forschung auf andere Bereiche (z.B. Züchtung, technischer Fortschritt) konzentriert (YANG et al. 1999). In den

letzten Jahren ist das Interesse an einer Nutzung von Futterenzymen bei Wiederkäuern wieder angestiegen. BEAUCHEMIN et al. (2000) erklären das zunehmende Interesse mit der Notwendigkeit, die Futtereffizienz auf Grund gestiegener Produktionskosten in der Wiederkäuerfütterung zu erhöhen und dadurch Kosten einzusparen.

Der Abbau der Zellwandpolysaccharide geschieht bei Wiederkäuern durch die Aktivität ruminaler Mikroorganismen. Diese können die Kohlenhydrate durch den komplexen Aufbau der Pflanzenzellwände in der Regel nicht vollständig herauslösen und nutzen (KRUEGER et al. 2007). Daher werden faserspaltende Enzyme eingesetzt, um die Abbaubarkeit der Zellwandpolysaccharide zu verbessern (DEAN et al. 2005). Der Einsatz dieser Enzyme führt zu einem beschleunigten und vollständigeren Abbau der Strukturkohlenhydrate durch eine Steigerung der enzymatischen Aktivität im Pansen (COLOMBATTO et al. 2003a). Eine gesteigerte Zerlegung der Zellwandstrukturen in ihre Grundbausteine kann den nutzbaren Anteil der im Futter vorhandenen Nährstoffe erhöhen (PINOS-RODRÍGUEZ et al. 2002). Die durch den höheren Ausnutzungsgrad zusätzlich freigesetzte Energie kann Tiergesundheit und Milchmengenleistung positiv beeinflussen (EUN et al. 2007). Das Hauptziel ist demnach eine Erhöhung der Produktionseffizienz durch eine Verbesserung der Verdaulichkeit und des Nutzungsgrades der Zellwandpolysaccharide (COLOMBATTO und BEAUCHEMIN 2003).

Enzymzusätze für Wiederkäuer enthalten vornehmlich Zellulose- und Hemizellulosenabbauende Xylanasen und Zellulasen (EUN und BEAUCHEMIN 2007), da Zellulose und Hemizellulosen die bedeutendsten Zellwandpolysaccharide sind (VAN SOEST 1994). Zwischen den Produkten variieren die Aktivitäten der Polysaccharidasen sehr stark, was einen großen Einfluss auf ihre Wirkung hat. Bei Wiederkäuern wird der Einsatz faserspaltender Enzyme durch die komplexe Verdauungsphysiologie erschwert und begrenzt. Da es sich bei den zugeführten Enzymen um Proteine handelt, waren die Forscher zunächst der Ansicht, sie würden im Gastrointestinaltrakt den proteolytischen Umsetzungen unterliegen und somit ihre spezifische Wirkung nicht ausführen können (GUIDON 1990). Aktuelle Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass faserspaltende Enzyme zu einem hohen Grad resistent sind gegen den proteolytischen Abbau durch ruminale Mikroorganismen (HRISTOV et al. 2000, MORGAVI et al. 2000a). COLOMBATTO et al. (2007) erklären dies mit der Fähigkeit der Enzyme, rasch an die Substrate binden zu können. Nach MCALLISTER et al. (2001) hängt dies mit der Bildung von Enzym-Substrat-Komplexen, die die Enzyme vor dem Abbau durch Proteasen schützen, zusammen.

Die Gesamtwirkung faserspaltender Enzyme setzt sich aus Effekten vor und nach der Futteraufnahme zusammen (COLOMBATTO et al. 2003b, McALLISTER et al. 2001). In den meisten Fällen (v. a. bei feuchten Rationen) werden die Mikroorganismen oder die Enzyme der Ration vor der Futteraufnahme zugesetzt, um die vorverdauliche Wirkung zu nutzen (BOWMAN et al. 2003). Die Hauptwirkung der Enzyme lässt sich als indirekter Einfluss auf die Verdaulichkeit durch Lösung der strukturellen Verknüpfungen in den Zellwänden und Verbesserung des Zugangs der Mikroorganismen zu den abbaubaren Faserkomponenten darstellen (COLOMBATTO et al. 2003a). Durch Hydrolyse der Bindungen zwischen den Arabinoseresten und den Ferulasäuren wird das an die Hemizellulosen gebundene Lignin gelöst und so ein vollständigerer Abbau der Pflanzenzellwände ermöglicht (BLUM et al. 2000). In diesem Fall sind die Enzyme zur Hydrolyse der Zellwandkohlenhydrate bereits vor der Futteraufnahme wirksam (MORGAVI et al. 2000a), da vor der Aufnahme des Futters Teile der strukturellen Bindungen gelöst werden und die Zugänglichkeit für mikrobielle Enzyme verbessert wird (EUN et al. 2007). WANG et al. (2002) beschreiben eine verbesserte Fermentationsleistung, wenn die Enzyme dem Futter noch vor der Fütterung beigemischt wurden. Die Autoren führten dies auf eine erhöhte Interaktion zwischen den Enzymen und dem Futter zurück. Bereits vor dem Fressen kommt es zur Hydrolyse, wodurch die Hemmung des Abbaus schon vor der Aufnahme des Futters reduziert wird (BOWMAN et al. 2003).

Nicht nur der Zeitpunkt, sondern auch die Art der Applikation beeinflusst die Wirksamkeit der Enzyme (YANG et al. 2000). So bezeichnen BEAUCHEMIN et al. (2003) das Sprühen auf das Futter in flüssiger Form vor der Fütterung als die effektivste Variante. Laut KUNG et al. (2000) liegen die Vorteile dieser Methode in einer hohen Managementflexibilität bei der Fütterung und in einer direkten Nutzung der durch die Enzymwirkung gelösten Substrate durch ruminale Mikroorganismen (ADESOGAN 2005). Grundsätzlich können die Enzyme sowohl dem Grobfutter als auch dem Konzentratfutter zugesetzt werden (BEAUCHEMIN et al. 2003). BOWMAN et al. (2002) führen die geringen Effekte bei Versuchen, in denen die Enzyme dem pelletierten Konzentratfutter beigemischt wurden, auf die hohen Temperaturen (bis zu 94 °C) während des Herstellungsprozesses der Pellets zurück. Da Enzyme Proteine sind, denaturieren sie bei großer Hitze und ihre Aktivität wird deutlich gehemmt. Bei DEAN et al. (2005) ließ sich durch das Einmischen der Enzympräparate im Siliergut eine gleichmäßige Verteilung des mikrobiellen Zusatzes im Erntegut sicherstellen und ein großer Teil der Zellwandkohlenhydrate wird bereits während des Silierprozesses aufgeschlossen (ADESOGAN 2005). WANG et al. (2002) berichten von einer erhöhten Kolonisationsrate der ruminalen Bakterien bei trockener Silage und einer Reduktion bei frischer Silage.

Einflussfaktoren auf die Enzymwirkung

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Enzymwirkung ist die Anpassung des mikrobiellen Zusatzes, denn dieser muss speziell auf das jeweilige Futtermittel abgestimmt sein. Die Reaktion der Enzyme ist von der Art und Menge der jeweiligen Futtermittel abhängig (BEAUCHEMIN et al. 2003). Daher ist es wichtig, dass das Enzymprodukt auf das jeweilige Futtermittel abgestimmt ist, da andernfalls aufgrund der Substratspezifität der Enzyme diese nicht mit dem Futter reagieren würden. Die Substratspezifität kennzeichnet das Merkmal von Enzymen, nur mit einem bestimmten Substrat zu reagieren und dieses umzusetzen. Ein bestimmtes Enzym katalysiert demnach nicht jede beliebige Reaktion, sondern setzt bestimmte Substrate zu bestimmten Produkten um (STANGASSINGER 2005). Das bedeutet, dass die Ration und das Enzymprodukt aufeinander abgestimmt sein müssen, um eine optimale Wirkung zu erzielen. Da Rationen für Hochleistungstiere sich meist aus einer Vielzahl verschiedener Einzelfuttermittel zusammensetzen (EUN et al. 2007), kann die Wirkung bei verschiedenen Rationen sehr unterschiedlich ausfallen.

Eine Erhöhung der Enzymmenge führte zwar in zahlreichen Versuchen zu einer erhöhten Besiedlung des Futters durch faserabbauende Mikroorganismen (BEAUCHEMIN et al. 2000), jedoch ist durch die gestiegenen Kosten die höchstmögliche Enzymwirkung nicht unbedingt die ökonomisch sinnvollste. Die Enzymzusammensetzung und die effektivste Dosierung müssen bekannt sein, um das jeweilige Futterenzym erfolgreich einsetzen zu können (EUN und BEAUCHEMIN 2007, KRUEGER und ADESOGAN 2007).

2.4 Aktuelle Forschungsergebnisse zum Einsatz faserspaltender Enzyme

In den letzten Jahren wurden verschiedene Studien zum Einsatz faserspaltender Enzyme durchgeführt. Diese kamen allerdings nicht zu einheitlichen Ergebnissen, da die Resultate je nach verwendetem Enzymprodukt und den jeweiligen Einsatzbedingungen unterschiedlich ausfielen (BEAUCHEMIN et al. 2003).

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten beschäftigten sich mit der Erhöhung der Verdaulichkeit pflanzlicher Nährstoffe durch den Zusatz exogener Enzyme. Dazu wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen Enzymtypen und Applikationsmethoden durchgeführt. Eine Übersicht über eine Auswahl dieser Versuche liefert Tabelle 1.

Tabelle 1: Auswahl aktueller Forschungsergebnisse von Fütterungsversuchen mit faserspaltenden Enzymen

| | Aufnahme (kg/Tag) | | | | Verdaulichkeiten (%) | | | | Leistung der Tiere | | | Quelle |
|--|-------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------------|------|------|------|--------------------------|----------|-------------|-------------------------|
| | TM ¹ | OM ² | NDF ³ | ADF ⁴ | TM | OM | NDF | ADF | Milchproduktion (kg/Tag) | Fett (%) | Protein (%) | |
| Kontrollgruppe | 22,1 | | 7,8 | 5,1 | 68,5 | | 52,1 | 48,6 | 31,9 | 3,60 | 2,79 | ARRIOLA et al. 2011, A1 |
| Enzyme auf TMR⁵ gesprüht | 20,8 | | 7,3 | 4,7 | 71,2 | | 55,2 | 52,9 | 32,5 | 3,80 | 2,85 | |
| Kontrollgruppe | 24,4 | | | | | | | | 39,6 | 3,99 | 2,95 | LEWIS et al. 1999, A17 |
| Geringe Enzymkonzentration | 26,2 | | | | | | | | 40,8 | 3,83 | 2,87 | |
| Mittlere Enzymkonzentration | 26,2 | | | | | | | | 45,9 | 4,00 | 2,88 | |
| Hohe Enzymkonzentration | 26,6 | | | | | | | | 41,2 | 3,75 | 2,85 | |
| Kontrollgruppe | 18,7 | 17,4 | 6,5 | 3,3 | 61,7 | 63,9 | 42,5 | 31,7 | 35,9 | 3,87 | 3,24 | RODE et al. 1999, A22 |
| Enzyme im Konzentrat in TMR⁵ | 19,0 | 17,7 | 6,3 | 3,2 | 69,1 | 70,6 | 51,0 | 41,9 | 39,5 | 3,37 | 3,03 | |
| Kontrollgruppe | 19,4 | 17,3 | 6,11 | 3,42 | 63,9 | 64,7 | 42,6 | 31,8 | 35,3 | 3,34 | 3,18 | YANG et al. 2000, A26 |
| Enzyme im Konzentrat | 19,8 | 18,3 | 6,14 | 3,41 | 66,6 | 68,4 | 44,3 | 33,7 | 37,4 | 3,19 | 3,13 | |
| Enzyme in TMR⁵ | 20,4 | 19,0 | 6,39 | 3,54 | 65,7 | 67, | 45,9 | 35,5 | 35,2 | 3,14 | 3,13 | |

Tabelle 1 (Fortsetzung): Auswahl aktueller Forschungsergebnisse von Fütterungsversuchen mit faserspaltenden Enzymen

| | Aufnahme (kg/Tag) | | | | Verdaulichkeiten (%) | | | | Leistung der Tiere | | | Quelle |
|--|-------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------------|------|------|------|--------------------------|----------|-------------|---------------------------|
| | TM ¹ | OM ² | NDF ³ | ADF ⁴ | TM | OM | NDF | ADF | Milchproduktion (kg/Tag) | Fett (%) | Protein (%) | |
| Kontrollgruppe | 15,1 | 14,1 | 5,5 | 2,8 | 71,9 | 74,1 | 64,7 | 57,9 | 27,6 | 4,59 | 2,87 | PETERS et al. 2010, A19 |
| Enzyme zu TMR⁵ | 15,0 | 14,0 | 5,4 | 2,8 | 72,6 | 74,6 | 65,3 | 57,7 | 26,3 | 4,20 | 2,93 | |
| Kontrollgruppe | 20,7 | 19,5 | 5,7 | 3,2 | | | | | 34,0 | | | SUTTON et al. 2003, A23 |
| Enzyme auf TMR⁵ gesprüht | 21,1 | 19,9 | 5,9 | 3,4 | | | | | 35,5 | | | |
| Enzyme auf Konzentrat gesprüht | 20,9 | 19,7 | 5,9 | 3,3 | | | | | 34,5 | | | |
| Kontrollgruppe | 25,5 | | 6,11 | | 64,0 | | 44,9 | | 41,1 | 3,11 | 3,00 | KNOWLTON et al. 2002, A12 |
| Enzyme in TMR⁵ (ca. 30 Tage in Milch) | 26,7 | | 6,54 | | 63,9 | | 44,8 | | 42,9 | 3,14 | 3,07 | |
| Kontrollgruppe | 24,3 | | 7,13 | | 58,2 | | 37,8 | | 32,6 | 3,74 | 3,29 | |
| Enzyme in TMR⁵ (ca. 194 Tage in Milch) | 24,3 | | 7,28 | | 61,1 | | 40,5 | | 31,4 | 3,83 | 3,28 | |

¹ TM: Trockenmasse; ² OM: Organische Masse; ³ NDF: Neutral-Detergenzienfaser; ⁴ ADF: Säure-Detergenzienfaser; ⁵ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration); ^{A1} - ^{A7} siehe Anhang

Die Ursachen für die teilweise widersprüchlichen Befunde liegen vor allem in den unterschiedlichen biochemischen Eigenschaften der jeweils verwendeten Enzymprodukte (COLOMBATTO und BEAUCHEMIN 2003) und in den nicht einheitlichen Versuchsbedingungen der einzelnen Studien. Durch die Verwendung verschiedener Enzymtypen, Aufbereitungsverfahren und Verabreichungsmethoden werden die Versuchsergebnisse beeinflusst. Dies führt dazu, dass bei der Verdauung komplexer Substrate nicht alle Enzyme und Enzymmischungen gleich effektiv sind (MCALLISTER et al. 2001). Auch tierartbedingte und tierindividuelle Unterschiede sowie die Zusammensetzung des Futters, dem die Enzyme beigemischt werden, spielen dabei eine Rolle (BOWMAN et al. 2002).

Weitere Einflüsse ergeben sich durch den pH-Wert und die Temperatur des Milieus sowie die Anwesenheit von Enzymaktivatoren und -inhibitoren (DEAN et al. 2005). Im Allgemeinen lässt sich demnach zwar feststellen, dass exogene Enzyme zwar das Potenzial haben, die ruminale Abbaubarkeit der Zellwandfraktion zu erhöhen (COLOMBATTO et al. 2007, RODE et al. 1999). Allerdings weicht die Effektivität der einzelnen Produkte auf Grund der zuvor aufgeführten Gründe stark voneinander ab. Daher ist die Akzeptanz von Enzymzusätzen in Wiederkäuerrationen in der Praxis noch relativ gering (BOWMAN et al. 2002).

Vor allem der Zusammensetzung des verwendeten Enzymprodukts kommt eine große Bedeutung zu, da die Enzymzusätze im Allgemeinen kein einzelnes Enzym beinhalten (MCALLISTER et al. 2001), sondern Mischungen verschiedener Polysaccharidasen, Glucosaccharidasen und Proteasen sind, die jeweils sehr unterschiedliche Aktivitäten aufweisen (COLOMBATTO und BEAUCHEMIN 2003). Da einzelne Enzyme unterschiedliche Substrate abbauen, sind die Zusätze durch die Mischung verschiedener Enzyme in der Lage, eine relativ große Bandbreite an Futtersubstraten abzubauen (MCALLISTER et al. 2001). Problematisch ist jedoch, dass bei einer Vielzahl unterschiedlicher Enzyme die Anforderungen an das Milieu und die Reaktionsbedingungen nicht einheitlich sind. Durch die unterschiedlichen Enzymmischungen unterscheiden sich die einzelnen Produkte in ihrer Wirkung und Effizienz teilweise sehr stark voneinander (COLOMBATTO et al. 2003c, DEAN et al. 2005). Da, wie bereits erwähnt, die Aktivität der Enzyme von exogenen Faktoren, wie beispielsweise dem pH-Wert und der Temperatur des umgebenden Milieus, beeinflusst wird, spielt die Untersuchungsmethode eine entscheidende Rolle. In vielen Laborversuchen werden optimale Bedingungen für die Enzyme geschaffen, um die maximal mögliche Effektivität zu erzielen. Diese weichen jedoch häufig von den ruminalen Bedingungen ab, so dass die Effekte beim Tier geringer ausfallen und die tatsächliche Wirkung der Enzyme

überschätzt wird (ADESOGAN 2005). Zudem werden viele Studien nicht unter standardisierten Bedingungen durchgeführt und sind daher nicht oder nur schwer vergleichbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass unterschiedliche Enzymmischungen und Untersuchungsbedingungen zu abweichenden Ergebnissen bei den einzelnen Studien führen. Details zu den im Folgenden hinzugezogenen Publikationen zeigt Tabelle A1 im Anhang. In den Studien von BOWMAN et al. (2003, A4), KUNG et al. (2002, A15), LEWIS et al. (1999, A17) und YANG et al. (2000, A26) ließ sich keine Steigerung der Trockenmasseaufnahme beobachten. In den Versuchen von BEAUCHEMIN et al. (2000, A2) zeigte sich eine erhöhte Futteraufnahme, obwohl sich die Fresszeit wenig von der Kontrollgruppe unterschied. Die Autoren führten dies auf eine Verbesserung der Schmackhaftigkeit und auf eine erhöhte Passagerate des behandelten Futters zurück. In diesen Arbeiten wird auch eine verbesserte Verdaulichkeit der organischen Masse und der Trockenmasse beschrieben, wohingegen RODE et al. (1999, A22) eine erhöhte Verdaulichkeit der Trockenmasse, der NDF- (Neutral-Detergenzienfaser) und der ADF-Fraktion (Säure-Detergenzienfaser) beobachteten. YANG et al. (1999, A25) führten die verbesserte Faserverdaulichkeit auf eine verstärkte Enzymaktivität im Pansen sowie eine zunehmende Konkurrenz um die Bindungsstellen der Futtersubstrate zurück. In den Untersuchungen von BOWMAN et al. (2002, A3) und YANG et al. (1999, A25) ließ sich ein direkter Einfluss des mikrobiellen Zusatzes auf die Passagerate nicht belegen.

Bezüglich der Milchmengenleistungen wiesen die Studien unterschiedliche Ergebnisse auf. So haben YANG et al. (2000, A26) keinen Zusammenhang zwischen dem Einsatz eines mikrobiellen Zusatzes und der Milchmengenleistung feststellen können. Auch in den Versuchen von BOWMAN et al. (2002, A3) sowie PETERS et al. (2010, A19) blieb diese konstant. Andere Studien (LEWIS et al. (1999, A17), YANG et al. (1999, A25)) beschrieben eine Zunahme der Milchmengenleistung bei den Kühen, die mit behandelter Silage gefüttert wurden. Der Einfluss auf die Milchmengenleistungen war demnach nicht einheitlich. Wurde die Milchmengenleistung gesteigert, so ließ sich dies nach BOWMAN et al. (2002, A3) und YANG et al. (1999, A25) auf einen verstärkten Abbau der im Futter vorhandenen Nährstoffe zurückführen, die dann für zusätzliche Milchbildung zur Verfügung standen.

Ebenso zeigte sich die Entwicklung der Milchinhaltstoffe unter dem Einfluss faserspaltender Enzyme nicht einheitlich. Nach BOWMAN et al. (2002, A3) wurde in den Versuchen ein Teil

der durch den Einsatz von Enzymen zusätzlich freigesetzten Energie zur Bildung von Milchfett, Milchprotein oder Körperreserven verwendet. Bei KNOWLTON et al. (2002, A12) blieben die Konzentrationen an Milchinhaltsstoffen zwischen der Versuchs- und der Kontrollgruppe unverändert, während bei BEAUCHEMIN et al. (2000, A2) der prozentuale Anteil an Milchprotein anstieg. Im Versuch von KUNG et al. (2000, A14) senkte ein hohes Enzymniveau die Milchprotein- und Milchfettsynthese im Vergleich zur Kontrollgruppe. Im zweiten Versuchsjahr wiesen diese Tiere jedoch eine höhere Milchmengenleistung auf. Bei RODE et al. (1999, A22) war die Milchfettsynthese der Versuchsgruppe in den ersten drei Wochen höher und danach geringer als die der Kontrollgruppe.

3 Material und Methoden

3.1 Anbau und Ernte

Der Fütterungsversuch und die Verdauungsversuche wurden im Landwirtschaftszentrum „Haus Riswick“ der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen in Kleve durchgeführt. Dazu wurde das Erntegut von zwei Flächen verwendet. Die erste Erntefläche wurde im August 2007 mit der Deutschen Weidelgrassorte Arabella neu eingesät. Die Fläche wurde im Februar 2008 durch Ausbringung von 52 kg Stickstoff je Hektar in Form von Ammoniumsulfat (ASS) gedüngt. Da das Graswachstum zum Erntezeitpunkt im April 2008 bereits weit fortgeschritten war, wurden keine weiteren Pflegemaßnahmen durchgeführt und keine Gülle auf der Fläche ausgebracht. Auf der zweiten Fläche wurde im März 2008 23 m³ Rindergülle und zwei Liter Ammoniumdünger je Hektar, also insgesamt etwa 46 kg N, ausgebracht. Im April 2008 wurde die Grasnarbe gestriegelt, mit 20 kg Standard G5 Nachsaat je Hektar nachgesät und gewalzt. Im April 2008 wurden 200 kg ASS ausgebracht, die nochmals etwa 26 kg N/ha lieferten. Die Fläche wird mittig von einem Deich durchzogen.

Beide Flächen waren zum Erntezeitpunkt trocken und eben. Das Wetter war an beiden Erntetagen und an den Tagen zuvor trocken und warm. Es wehte ein leichter Wind. Somit lagen ideale Erntebedingungen vor.

Mit dem Mähen des Ernteguts wurde am Mittwoch, dem 07. Mai 2008 gegen 10.30 Uhr begonnen. Das Siliergut wurde gegen Mittag einmalig gewendet und noch am gleichen Abend geschwadet. Am darauf folgenden Tag wurde ab 10.00 Uhr gehäckselt. Das für den Versuch verwendete Siliergut wurde von zwei Silierketten gleichzeitig geerntet, die unabhängig voneinander arbeiteten. Bei einer Häckselkette war der selbstfahrende Exaktfeldhäcksler mit einem Applikationsdosierer für das in Wasser gelöste Siliermittel ausgestattet. Mit dieser Kette wurde das Gras geerntet, das mit Siliermittel behandelt wurde.

Mit dem Siliermittel 11 GFT (Pioneer Hi-Bred Northern Europe, Buxtehude, Deutschland) wurden die für den Versuch relevanten faserabbauenden Enzyme in Form der sie produzierenden Mikroorganismen dem Erntegut zugesetzt. Die Mikroorganismen lagen in einer Konzentration von 87 Milliarden ($8,7 \times 10^{10}$) koloniebildenden Einheiten pro Gramm (CFU/ g) Siliermittel vor. Es wurden lebende Stämme von *Lactobacillus buchneri* (min-

destens $6,67 \times 10^{10}$ CFU/g), *Lactobacillus plantarum* (mindestens $1,33 \times 10^{10}$ CFU/g) und *Lactobacillus casei* (mindestens $6,67 \times 10^9$ CFU/g) in getrockneter Form eingesetzt. Weitere Bestandteile des Siliermittels sind Maltodextrine (Carrier), Natriumaluminiumsilikat (E 554, 64 g/kg) und Natriumthiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, 6,4 g/kg). Als Begleitenzyme bei der Hydrolyse pflanzlicher Zellwandpolysaccharide soll die Ferulat-Esterase sowohl die Effektivität der enzymatischen Hydrolyse der Pflanzenfasern als auch die aerobe Stabilität der Silage verbessern (DONAGHY et al. 2000).

Mit der zweiten Häckselkette wurde das Gras für die Kontrollgruppe geerntet, das nicht mit Siliermittel behandelt wurde. Zu beiden Häckselketten gehörten jeweils zwei fest zugeordnete Transportfahrzeuge. Durch eine eindeutige Kennzeichnung der Silierketten wurde sichergestellt, dass sie völlig getrennt voneinander arbeiteten. Dadurch ließ sich eine Vermischung des behandelten mit dem unbehandelten Siliergut weitgehend ausschließen. Um Qualität und Quantität des Silierguts beider Gruppen möglichst homogen zu halten, wurde von einer Kette immer nur jeder zweite Schwad gehäckselt. Somit ernteten die Silierketten das Siliergut annähernd parallel zueinander. Die eingestellte theoretische Schnittlänge lag bei 41 Millimetern. Die Transportfahrzeuge wurden vor dem Abladen gewogen. Das Siliergut beider Gruppen wurde von den Transportfahrzeugen vor den Fahrsilos abgekippt, von den Radladern aufgeschoben und durch Überfahren verdichtet. Die beiden Radlader agierten ausschließlich in einem der beiden Fahrsilos, um eine Verschleppung des behandelten Silierguts über die Reifen zu verhindern. Die Silos wurden nach fünfmonatiger Lagerzeit geöffnet. Während des Silierzeitraums wurde am 12.08.2008 eine Bohrstockprobe sowie während des Versuchszeitraums Proben von der Anschnittsfläche gezogen und von der LUFA (Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt) in Münster, Deutschland, analysiert.

3.2 Fütterungsversuch mit Milchkühen

3.2.1 Versuchsanlage, Versuchstiere und Haltung

Der Fütterungsversuch wurde im Versuchsstall des Landwirtschaftszentrums „Haus Riswick“ in Kleve mit Kühen der Rasse Deutsche Holstein durchgeführt. Die Kühe wurden entweder der Versuchsgruppe, deren Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration, TMR) mit dem Siliermittel behandelte Grassilage enthielt, oder der Kontrollgruppe zugeteilt, deren Grassilage in der TMR unbehandelt war. Die Zuteilung erfolgte anhand der Variablen Laktationsnummer, Laktationstag, Lebendmasse und Milchmengenleistung (aus den Daten der ersten Milchkontrolle post partum) sowie dem Gesundheitsstatus der Tiere. Es wurde auf eine homogene Verteilung der Tiere in die Fütterungsgruppen geachtet. Grundsätzlich gelangten die Tiere erst dann in den Versuch, wenn ein stabiler Stoffwechsel gewährleistet werden konnte. Die Versuchsgruppen waren bei Versuchsbeginn noch nicht vollständig besetzt und wurden nach und nach gleichmäßig mit frisch abgekalbten Tieren aufgefüllt. Das Wechseln von Tieren in die andere Versuchsgruppe wurde ausgeschlossen. Der Färsenanteil lag bei 44 Prozent in der Versuchs- und 48 Prozent in der Kontrollgruppe.

Da die Tiere nach den Daten der ersten Milchleistungsprüfung post partum den Versuchsgruppen zugeteilt wurden, erfolgte die Versuchsauswertung auf Basis der Laktations- und nicht der Versuchstage. Um die Gruppeneinteilung innerhalb des vorgesehenen Zeitraums abzuschließen, mussten bereits laktierende Tiere mit eingeteilt werden. Dies wurde in der statistischen Auswertung berücksichtigt, da bei allen Kühen nur ein festgelegter Laktationsbereich betrachtet wurde (37. - 137. Laktationstag mit mindestens sechzig Beobachtungen). Dadurch ließ sich eine Vergleichbarkeit der Daten sicherstellen. Tiere mit mehr als siebzig Laktationstagen zu Versuchsbeginn wurden nicht mehr zum Versuch zugelassen.

Im Verlauf des Versuchs traten bei einzelnen Tieren in beiden Gruppen Mastitis und Diarrhoe auf, wofür letztlich keine eindeutige Ursache gefunden wurde. Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen und zur Minderung des Ansteckrisikos wurden diese Einzeltiere kurzzeitig aus der Versuchsgruppe herausgenommen und im Strohbereich separiert. Dort wurden sie weiterhin mit dem Versuchsfutter der jeweiligen Gruppe gefüttert, um sie anschließend ohne Futterumstellung wieder in die Versuchsgruppen integrieren zu können. Die dadurch

fehlenden Daten - vornehmlich die Futteraufnahmen - wurden aus den Werten unmittelbar um diesen Zeitraum herum interpoliert und mit einbezogen.

Zur Haltung der Tiere im Fütterungsversuch wurde eine Hälfte des Versuchsstalls auf „Haus Riswick“ mit einem Tierbereich von 344 m² (ohne Futtertisch) genutzt. Die Seitenwände der 37 m langen Vollholzkonstruktion sind im ersten Drittel vollständig und in den letzten zwei Dritteln bis auf eine Höhe von 1,54 m durch Holzbohlen verschlossen. Entlang des geöffneten Bereiches schützt ein fest montiertes, grobmaschiges Windschutznetz die Tiere vor starker Zugluft. Der Stallbereich wurde mittig quer geteilt. Dadurch standen die vorderen zwölf Fressplätze den Tieren zur Verfügung, deren TMR die behandelte Grassilage enthielt. Die hinteren zwölf Fressplätze wurden der Kontrollgruppe zugewiesen.

Durch Wiegetröge lässt sich im Versuchsstall die Gesamtfutteraufnahme auf Einzeltierbasis erfassen. Die Kühe werden mittels eines Responders erkannt. Die Wiegetröge sind so konstruiert, dass nicht mehrere Kühe gleichzeitig Futter aufnehmen können oder eine fressende Kuh abgedrängt werden kann. Ein Netzkasten verhindert, dass die Kühe Futter aus den Trögen werfen können. Da die Tiere bereits an die Futteraufnahme aus den Wiegetrögen gewöhnt waren, wurden diese von den Tieren problemlos angenommen.

An den hinter den Wiegetrögen mit Betonspalten ausgelegten Fressgang schließt sich die Kopfseite einer Liegeboxenreihe an, die nicht vom Fressgang aus betreten werden kann. Die Kühe der behandelten Gruppe gelangen durch zwei planbefestigte Quergänge in den Liegebereich. Im vorderen Quergang befindet sich eine wandständige Tränke. Der zweite Übergang in der Mitte des Stalls ist mittig geteilt und steht jeder Gruppe zur Hälfte zur Verfügung. Eine mittig des Laufgangs angebrachte Kipptränke kann von beiden Versuchsgruppen genutzt werden.

Der Liegebereich besteht aus zwei gegenständigen Liegeboxenreihen. Der dazwischen liegende Laufgang aus Betonspalten wird von einem fest installierten Schieber gereinigt. Der behandelten Gruppe standen 23 Liegeboxen sowie eine nachträglich in eine Liegebox eingebaute Kraffutterstation zur Verfügung. Es handelt sich um mit Sägemehl eingestreute Hochboxen mit Gummiauflage.

Der Stallbereich für die Tiere der Kontrollgruppe ist nahezu identisch aufgebaut. Da die Wiegetröge und die Spaltenböden durchlaufen, stellen sie sich wie oben beschrieben dar. Die Kipptränke des von beiden Gruppen genutzten Quergangs sowie eine Stöpseltränke im

kopfseitigen Quergang standen den Tieren zur Wasseraufnahme zur Verfügung. Der Liegebereich weist 26 Liegeboxen auf, die wie die zuvor für die behandelte Gruppe beschriebenen aufgebaut sind. Zwei weitere Liegeboxen sind zu Kraffutterstationen umgerüstet worden.

Die Tiere wurden zweimal täglich in einem Melkkarussell (MK 14 von Westfalia Surge, Bönen, Deutschland) mit 14 Melkplätzen und METATRON-Melkmanagement gemolken. Neben dem unmittelbaren Austausch tierindividueller Daten mit der Managementsoftware verfügt das Karussell über eine tierindividuelle Kraffutterfütterung am Melkplatz, einer Abnahmeautomatik und Milchmengenmessung. Beim Austrieb aus dem Melkstand wurde das Gewicht der Tiere mit einer Durchlaufwaage ermittelt.

3.2.2 Fütterung der Tiere

Während des Versuchszeitraums wurden die Kontroll- und die Versuchsgruppe mit einer identischen TMR gefüttert. Lediglich die Grassilage der Kontrollgruppe war nicht mit dem zu untersuchenden Siliermittel versehen. Dadurch lassen sich mögliche Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen durch die Fütterung in hohem Maße auf das zu untersuchende Siliermittel zurückführen. Den Kühen wurde eine grasbetonte Ration mit einem Grassilage-Maissilage-Verhältnis von siebenzig zu dreißig auf Trockenmassebasis vorgelegt, die für eine Milchmengenleistung von 37 kg ECM je Tag ausgelegt war. Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der Ration.

Tabelle 2: Kalkulierte Zusammensetzung der TMR¹ des Versuchs mit Milchkühen mit unbehandelter und behandelter Grassilage auf Trockenmassebasis in Prozent

| Rationskomponente | Gewichtete Anteile an der Ration in % TM² mit unbehandelter Grassilage | Gewichtete Anteile an der Ration in % TM² mit behandelter Grassilage |
|--------------------------------|--|--|
| Maissilage (n = 2) | 13,8 | 15,7 |
| Grassilage (n = 3) | 35,4 | 33,0 |
| Stroh | 2,7 | 2,8 |
| Weizen | 10,6 | 10,4 |
| Mischfutter³ | 35,8 | 36,3 |
| Glycerin | 1,0 | 1,0 |
| Mineralfutter | 0,7 | 0,8 |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² TM: Trockenmasse

³ Zusammensetzung des Mischfutters siehe Kapitel 4.1.2

Durch den unterschiedlichen Trockenmassegehalt der beiden Grassilagen in Höhe von 287 g/kg bei der unbehandelten Silage und 258 g/kg bei der behandelten Silage unterscheiden sich die Rationen in ihrer Zusammensetzung auf Trockenmassebasis. Die in Tabelle 2 dargestellten Trockenmasseanteile der Rationskomponenten beziehen sich bei der Grassilage auf die Analysedaten der Bohrstockprobe, der mittleren Ergebnisse der Sammelproben der Anschnittsfläche während des Fütterungsversuchs und des Verdauungsversuchs mit Hammeln sowie bei der Maissilage auf Daten der Bohrstockprobe und den Mittelwerten der entsprechenden Sammelproben beider Anschnittsflächen. Während des Versuchszeitraums wurde die Ration zwei Mal angepasst. Die erste Anpassung der Ration erfolgte, nachdem bei der Milchkontrolle vom 10.12.2008 die Harnstoffgehalte der Milch bei nur 170 mg/kg bei der behandelten und 190 mg/kg bei der unbehandelten Gruppe lagen. Als Reaktion darauf wurde ein Teil des XP-ärmeren Weizens zugunsten des XP-reicheren Mischfutters ausgetauscht. Daher wurde am 19.12.2008 der Mischfutteranteil um 0,5 kg pro Kuh und Tag erhöht und der Weizenanteil um 0,5 kg gesenkt. Zweitens wurde am 06.01.2009 ein neues Silo mit Maissilage geöffnet, die einen leicht geringeren Trockenmasse- und Energiegehalt aufwies. Die gewichteten Mittelwerte der einzelnen Rationen ergeben sich aus der Anzahl Tagen, die die jeweilige Ration während des Versuchszeitraums eingesetzt wurde.

Zweimal täglich wurde den Tieren während des Melkens 0,5 kg Milchleistungsfutter pro Tag als Lockfutter zugeteilt. Die Zusammensetzung des Lockfutters ist in Kapitel 4.1.2 dargestellt. Beide Versuchsgruppen hatten uneingeschränkten Zugang zu Wasser und Viehsalzlecksteinen.

3.2.3 Durchführung des Versuchs und Datenerfassung

Ab dem 06. Oktober 2008 wurden die Kühe zur Vorbereitung auf den Versuch mit einer TMR gefüttert, deren Grasanteil jeweils zur Hälfte aus der behandelten und der unbehandelten Grassilage bestand. Am 23. Oktober 2008 begann die Datensammelphase mit jeweils 15 Tieren pro Gruppe. Diese wurden anhand der Daten der Milchleistungsprüfung vom 14. Oktober 2008 eingeteilt. Da die Gruppen zu Versuchsbeginn noch nicht aus der angestrebten Tierzahl bestanden, wurden sie nach und nach mit weiteren abgekalbten Tieren aufgefüllt. Tiere, die nicht durch Krankheit vorzeitig aus dem Versuch ausschieden, blieben für mindestens 100 Laktationstage im Versuch.

Den Tieren wurde jeden Morgen die TMR frisch vorgelegt, wobei die Ration der behandelten Gruppe die mit dem Siliermittel behandelte Grassilage enthielt und die der Kontrollgruppe die unbehandelte. Täglich wurden die Reste vom Vortag aus den Wiegetrögen entfernt. Die Fütterung erfolgte vom Futtermischwagen aus direkt in die Wiegetröge. Um eine Verwechslung der Grassilagen und der Versuchsgruppen beim Füttern auszuschließen, wurden sowohl die Silos als auch die Gruppen im Stall eindeutig gekennzeichnet.

Zum Melken wurden die Versuchsgruppen zwei Mal täglich getrennt in den Wartebereich und dann in den Melkstand getrieben. Nach dem Verlassen des Melkstandes wurden die Gruppen direkt in ihren jeweiligen Stallbereich zurückgetrieben. Im 14-tägigen Intervall wurden während des Melkvorgangs Milchproben gezogen, die vom Landeskontrollverband NRW untersucht wurden.

Mit der Erfassung der für den Versuch relevanten Daten wurde am 23. Oktober 2008 begonnen. Dabei wurde über die Wiegetröge im Versuchsstall die Gesamtfuttermittelaufnahme auf Einzeltierbasis bei jedem Kuhbesuch erfasst. Durch die Durchtriebswaage am Melkbereich wurden zwei Mal täglich die Lebendmassen der Kühe beim Verlassen des Melkstandes

gemessen. Während jeder Melkung wurde die Milchmenge der Tiere mittels der Milchmengenmessung im Melkstand erfasst. Die Milchinhaltsstoffe wurden alle zwei Wochen durch eine Milchleistungsprüfung bestimmt. Auch wurden alle vier Wochen die RFD- und BCS-Werte der Kühe durch eine Mitarbeiterin des Landwirtschaftszentrums Haus Riswick (Claudia Verhülsdonk) erfasst.

3.2.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Versuchsdaten aus dem Fütterungsversuch mit Milchkühen erfolgte mit dem Statistikprogramm SAS 9.1 mit dem unten aufgeführten Mixed Model. Berücksichtigt wurden dabei die Effekte der Futtergruppe (unbehandelte/ behandelte Silage), der Laktationsnummer, des Laktationstages sowie die zufälligen Tier- und Resteffekte. In die statistische Betrachtung wurden nur diejenigen Tiere einbezogen, die ausgehend vom 37. Laktationstag mindestens sechzig weitere Versuchstage aufwiesen. Dies waren 15 Tiere aus der unbehandelten Gruppe (Färsenanteil 42 %) und 16 Tiere aus der behandelten Gruppe (Färsenanteil 50 %). Eine Übersicht über die statistisch untersuchten Merkmale zeigt Tabelle 3. Als Signifikanzniveau wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($p < 0,05$) gewählt. So wurde zur Auswertung des Versuchs folgendes statistische Modell verwendet:

$$Y = \mu + G_i + L_j + VM_k + \sum_{m=1}^4 \beta_{jm} \times X_m + Kuh_i + e_{ijklm}$$

Mit Y = Beobachtungswert, μ = allgemeines Mittel, G_i = Gruppe (fester Effekt der i -ten Gruppe), L_j = Laktationsnummer (fester Effekt der j -ten Laktation), VM_k = Versuchsmonat (fester Effekt des k -ten Versuchsmonats), β_{jm} = Regressionskoeffizienten innerhalb der j -ten Laktation, X_m = Kovariablen (x_1 = Laktationstag/305; x_2 = x_1^2 ; x_3 = $\ln(305/\text{Laktationstag})$; x_4 = x_2^3), Kuh_i = zufälliger Effekt des i -ten Tieres, e_{ijklm} = zufälliger Resteffekt

In einer weiteren Stufe wurden für die Auswertung der Daten aus der Milchleistungsprüfung ausschließlich die Daten der Kontrolltage verwendet. Eine Interpolation der Daten fand nicht statt. Das statistische Modell wurde dazu nicht verändert, aber die Dateneingabemaske entsprechend angepasst.

Tabelle 3: Statistisch untersuchte Merkmale, ihre Einheit und Erfassungshäufigkeit

| Merkmal | Einheit | Erfassungshäufigkeit |
|--|--------------------------|-----------------------------|
| Lebendmasse | kg | 2 x täglich |
| Natürliche Milchmenge | kg | 2 x täglich |
| Natürliche Milchmenge bei MLP ¹ | kg | 14 – tägig |
| Energiekorrigierte Milchmenge | kg | Täglich |
| Energiekorrigierte Milchmenge bei MLP ¹ | kg | 14 – tägig |
| Milchfettgehalt | % | 14 – tägig |
| Milchfettmenge | kg | Täglich |
| Milchfettmenge bei MLP ¹ | kg | 14 – tägig |
| Milchproteingehalt | % | 14 – tägig |
| Milchproteinmenge | kg | Täglich |
| Milchproteinmenge bei MLP ¹ | kg | 14 – tägig |
| Fett – Protein – Quotient | | 14 – tägig |
| Zellzahlgehalt | Tausend | 14 – tägig |
| Harnstoffgehalt | mg/kg | 14 – tägig |
| Laktosegehalt | % | 14 – tägig |
| Gesamtfrischmasseaufnahme | kg | Täglich |
| Trockenmassegehalt | % | Täglich |
| Gesamttrockenmasseaufnahme | kg | Täglich |
| Energiebedarf zur Erhaltung | MJ ² /Tag | Täglich |
| Energiebedarf zur Milchbildung | MJ ² /Tag | Täglich |
| Gesamtenergiebedarf | MJ ² /Tag | Täglich |
| Energiezufuhr | MJ ² /Tag | Täglich |
| Energiebilanz | MJ ² /Tag | Täglich |
| Body-Condition-Score | BCS ³ -Punkte | Monatlich |
| Rückenfettdicke | mm | Monatlich |

¹ MLP: Milchleistungsprüfung; ² MJ: Megajoule; ³ BCS: Body Condition Score

3.3 Verdauungsversuch mit Milchkühen

3.3.1 Versuchsanlage, Versuchstiere, Haltung und Fütterung

Zur Durchführung des Verdauungsversuchs wurden aus den beiden Versuchsgruppen jeweils vier Tiere herausgenommen. Während des Verdauungsversuchs wurden die Kühe mit der bereits vorgelegten TMR (behandelte/ unbehandelte Grassilage) weiter gefüttert. Daher waren die Tiere zu Beginn des Verdauungsversuchs an die entsprechende Ration gewöhnt. Bei der Auswahl der Tiere wurde darauf geachtet, dass sich ihre Leistungsmerkmale in möglichst vielen Punkten, vor allem Milchmengenleistung, Lebendmasse und Laktationszeitpunkt, nur in geringem Maße unterschieden und sie sich in einem guten Gesundheitszustand befanden.

Die für den Verdauungsversuch ausgewählten Tiere wurden am Freitag, dem 31.10.2008, vor Versuchsbeginn in die entsprechende Einzelbucht eingestallt. Das Wochenende bis zum Versuchsbeginn diente den Tieren als Adaptationszeit an die für sie ungewohnte Einzelhaltung, um negative Einflüsse auf den Versuchsverlauf durch eine plötzliche Umwelt- und Haltungsumstellung so gering wie möglich zu halten. Mit der Verdaulichkeitsbestimmung wurde am Montag, dem 03.11.2008, begonnen, nachdem die Tiere nach dem Melken in die Einzelbuchten einsortiert worden waren. Bei der Ablage des Futters wurden TMR-Proben gewonnen, die anschließend einer Rohrnährstoffanalyse unterzogen wurden. Der Versuch endete planmäßig nach fünf Tagen und Nächten am Samstagmorgen. Anschließend wurden die Kühe wieder den ursprünglichen Versuchsgruppen im Fütterungsversuch zugeteilt und im Rahmen des laufenden Fütterungsversuchs weiter beobachtet.

Der Verdauungsversuch wurde in einem Teil des Jungviehstalls durchgeführt. Dieser Stallbereich weist gute Bedingungen für einen Verdauungsversuch auf, da er nur aus Fressgitter, Laufgang und einer einreihigen Liegeboxenreihe besteht. Der Laufgang zwischen Fressgitter und Liegeboxen ist planbefestigt und mit einer Gummimatte versehen. Auf perforiertem Spaltenboden wäre ein Verdauungsversuch nicht durchführbar, da der Kot durch die Schlitze fallen würde und unweigerlich verloren wäre. Durch die Gummioberfläche konnte der Kot nahezu rückstandslos aufgesammelt werden. Dadurch waren Kotverluste, die das Versuchsergebnis hätten beeinflussen können, vernachlässigbar gering. Beim Stalltyp

handelte es sich um einen Außenklimastall in Holzbauweise. Die mit Gummimatten ausgelegten Liegeboxen wurden mit Sägemehl eingestreut. Zur Trennung der acht Tiere wurden zwischen Liegeboxenreihe und Fressgitter doppelreihige Ketten gespannt, wodurch jedes Tier seine eigene Bucht bekam. Da jedes Versuchstier immer in dieselbe Bucht gesperrt wurde, ließ sich abgesetzter Kot exakt dem jeweiligen Tier zuordnen.

Während des Verdauungsversuchs wurden die Tiere mit derselben Mischung gefüttert, die auch an die Versuchsgruppen verteilt wurde. Die Tiere bekamen wie zuvor im Versuch entweder TMR mit behandelter oder mit unbehandelter Grassilage, um eine Beeinflussung der Ergebnisse des Verdauungsversuchs durch eine Futterumstellung zu verhindern. Während des Versuchs wurde den Tieren das Kraftfutter, das sie im Fütterungsversuch zusätzlich zur TMR über die Kraftfutterstation bekommen hätten, manuell zugeteilt. Während des Melkens wurde den Tieren weiterhin 0,5 kg Milchleistungsfutter pro Tag als Lockfutter zugeteilt. Die während des Verdauungsversuchs gefütterte Ration ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Kalkulierte Zusammensetzung der TMR¹ des Verdauungsversuchs mit unbehandelter und behandelter Grassilage auf Trockenmassebasis in Prozent

| Rationskomponente | Gewichtete Anteile an der Ration in % TM ² mit unbehandelter Grassilage | Gewichtete Anteile an der Ration in % TM ² mit behandelter Grassilage |
|--------------------------------|--|--|
| Maissilage (n = 2) | 14,6 | 15,1 |
| Grassilage (n = 3) | 35,3 | 32,9 |
| Stroh | 2,7 | 2,8 |
| Weizen | 11,3 | 11,7 |
| Mischfutter³ | 34,3 | 35,6 |
| Glycerin | 1,0 | 1,0 |
| Mineralfutter | 0,8 | 0,9 |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² TM: Trockenmasse

Da die Tiere während des Verdauungsversuchs in abgetrennten Stallbereichen gehalten wurden, musste sichergestellt werden, dass jedes Tier Zugang zu Wasser hatte. Die beiden bereits im Stall vorhandenen Tränken wurden dabei integriert und die anderen sechs Kühe wurden mit Plastikwannen getränkt. Morgens wurden die Wannens, während die Tiere

gemolken wurden, ausgeschüttet, gereinigt und mit frischem Wasser gefüllt. Zudem wurden die Wannen auch während des abendlichen Melkens oder bei Bedarf aufgefüllt.

3.3.2 Durchführung des Versuchs und Datenerfassung

Von beiden Mischungen (mit behandelter bzw. unbehandelter Grassilage) wurden jeweils 300 kg vor dem Stall abgelegt. Mit einer Waage wurde jeder Kuh 65 kg Futter der entsprechenden Ration zugeteilt. Die Einzeltierportionen wurden mittig vor die Fressgitter der jeweiligen Einzelbucht abgelegt, so dass sich weder die Haufen vermengen konnten noch eine Kuh an das Futter der Kuh im Nachbarabteil gelangen konnte. Die Fressgitter wurden erst nach Beendigung der Futtervorlage geöffnet, damit die Kühe zum gleichen Zeitpunkt anfangen zu fressen. Jeder Kuh wurde eine Kotwanne mit der entsprechenden Tieridentifikationsnummer zugeteilt, nachdem ihr Leergewicht zuvor bestimmt und notiert worden war. Die Wannen wurden mit einer Plane zugedeckt, um die Verdunstung von Feuchtigkeit zu verringern, was sonst das gemessene Kotgewicht beeinflusst hätte. Von diesem Zeitpunkt an wurde durchgehend abgesetzter Kot in die Kotwannen verfrachtet. Zur Verbesserung der Versuchsgenauigkeit wurden die Aufsichtspersonen angehalten, den Boden stets trocken zu halten, den Kot möglichst unmittelbar nach dem Abkoten vollständig in die Kotwannen zu befördern und die Planen wieder aufzulegen.

Auch während des Verdauungsversuchs wurden beim Melken Milchmengenleistung und Tiergewicht erfasst sowie die Milchleistungsprüfung durchgeführt. Für den Verdauungsversuch wurde auch während des Melkens der auf den planbefestigten Treibgängen und im Karussell abgesetzte Kot gesammelt und anschließend in die Kotwannen gefüllt.

Morgens wurden während der Melkzeiten die Futterreste jeder Kuh zusammengefasst und gewogen. Durch Abzug der Futterreste von der am Vortag vorgelegten Menge ergab sich die Futteraufnahme des Tieres, die in einer Tabelle notiert wurde. Anschließend wurde für jedes Tier wieder 65 kg Futter von der jeweiligen Ration abgewogen und bei geschlossenem Fressgitter vorgelegt. Die Wasserwannen wurden geleert, gereinigt und neu aufgefüllt. Die Kotwannen wurden einzeln aufbereitet, um eine repräsentative Kotprobe der letzten 24 Stunden zu bekommen. Durch Abzug des am Montag bestimmten Leergewichts der Wanne

vom aktuellen Gewicht der gefüllten Wanne wurden die Kotmengen jedes einzelnen Tages bestimmt und notiert. Anschließend wurde der Kot jeder Wanne homogenisiert. Fünf Prozent des Kots wurden für eine Probe in einen Gefrierbeutel gepackt und eingefroren. Die Kotwannen wurden gereinigt, vor die entsprechenden Buchten gestellt und mit den Planen abgedeckt. Am Ende des Versuchs wurden die tiefgefrorenen Kotproben aus dem Versuchszeitraum aufgetaut, homogenisiert und je Tier eine Sammelkotprobe zur Untersuchung entnommen.

3.4 Verdauungsversuch mit Hammeln

3.4.1 Versuchsanlage, Versuchstiere, Haltung und Fütterung

Die Verdaulichkeit der beiden Silagen und der TMR wurde zusätzlich zum Verdauungsversuch an den Milchkühen auch an Hammeln geprüft. Die Messungen wurden an jeweils vier Hammeln der Rasse „Deutsches Schwarzköpfiges Fleischschaf“ durchgeführt. Es handelte sich um männliche und kastrierte Tiere mit einer durchschnittlichen Lebendmasse von 80 kg. Es wurden ausschließlich gesunde Tiere zum Versuch zugelassen, die frei von erkennbaren Krankheiten und Parasiten waren, damit die Messung der Verdaulichkeit nicht durch innere Faktoren beeinflusst wird. Dazu werden auf „Haus Riswick“ in regelmäßigen Abständen Kotproben auf Parasiten untersucht. Tiere, die während des Vorversuchs gesundheitliche Auffälligkeiten zeigten, wurden nicht zum Hauptversuch zugelassen.

Bevor mit der Messung der tierindividuellen Daten zur Bestimmung der Verdaulichkeit begonnen wurde, bekamen die Tiere zwei Wochen lang zur Adaptation ausschließlich das zu untersuchende Futter zu fressen. Anschließend wurden die Tiere in Stoffwechselkäfige eingestallt. Nach weiteren zwei Tagen zur Adaptation wurde mit der Datensammelphase begonnen. Während der folgenden sieben Tage wurde von jedem Tier der Kot gesammelt.

Der Stallbereich bestand aus einem Vorversuchs- und einem Hauptversuchsstall. Im Vorversuchsstall waren die Hammel zwei Wochen vor Versuchsbeginn untergebracht und wurden zur Adaptation mit dem Versuchsfutter gefüttert. Die Käfige dort hatten Holzspalten und einen geschlossenen Trog. Wasser stand den Tieren ad libitum zur Verfügung. Zur

Datensammelphase wurden die Tiere in den Hauptversuchsstall umgestallt. Dort befinden sich dreißig Stoffwechselkäfige mit einer Trennvorrichtung für Kot und Harn. Die Futtertröge sind geschlossen und somit ausschließlich von einem Tier nutzbar. Im vorderen Drittel des Käfigs befand sich eine ausziehbare Schublade. Von den Tieren aus dem Trog gezerrtes Futter fiel in die Schublade und konnte in den Trog zurückgelegt werden. Im hinteren Drittel der Käfige befand sich unter dem Metallspaltenboden ein Trichter, der abgesetzten Kot und Harn auffing. Die untere Trichterwand wies Schlitze auf, durch die der Harn auf eine tiefer liegende „Rutsche“ fiel und in den Jauchekanal geleitet wurde. Der Kot lief weiter in ein Sammelgefäß. Auf diese Weise wurden Kot und Harn zur Verdaulichkeitsbestimmung getrennt.

Für den Verdauungsversuch wurden 16 Hammel in vier Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe bekam die auch an die Kühe gefütterte TMR mit der behandelten Grassilage, die zweite Gruppe bekam ausschließlich die behandelte Grassilage zu fressen, die mit Mineralfutter aufgewertet wurde. Der dritten Gruppe wurde die unbehandelte Grassilage mit Mineralfutter und der vierten die TMR mit unbehandelter Grassilage vorgelegt. Die Hammel bekamen so täglich etwa 900 - 1000 Gramm Trockenmasse. Diese Menge lag über dem Erhaltungsbedarf der Tiere, um Einflüsse auf die Verdauung durch eine unzureichende Energiezufuhr auszuschließen.

Die TMR für den Verdauungsversuch mit Hammeln wurde während des Verdauungsversuchs aus der TMR des Fütterungsversuchs der Milchkühe entnommen und portionsweise eingefroren. Daher ist die an die Hammel gefütterte Ration identisch mit der im Verdauungsversuch der Milchkühe. Auch die Grassilagen für die anderen Gruppen wurden gemischt, bevor sie portionsweise tiefgefroren wurde. Die Fütterung der Hammel erfolgte zwei Mal täglich nach rechtzeitigem Auftauen der tiefgefrorenen Futterportionen um 7.30 Uhr und um 15.00 Uhr.

3.4.2 Durchführung des Versuchs und Datenerfassung

Die Datensammelphase wurde mit 16 Hammeln, also mit jeweils vier Hammeln pro Gruppe, durchgeführt. Das Futter für die Hammel, die TMR bekamen, wurde dem Verdauungsversuch, die Grassilage der Anschnittsfläche entnommen. Vor der Zuteilung des

Futters an die Tiere durch Abwiegen wurden die Futterproben gründlich gemischt, damit die verfütterten Proben auch repräsentativ für das zu untersuchende Futter waren, und anschließend tiefgefroren. 24 Stunden vor der Fütterung wurden die Futterportionen aus der Tiefkühltruhe entnommen und bei Raumtemperatur aufgetaut. Futterproben wurden nicht gezogen, da von der identischen Versuchsmischung Proben vorlagen.

Jeden Morgen wurde anhand der Futterreste die Futteraufnahme bestimmt. Durch die Trennvorrichtung für Kot und Harn konnte der in den Sammelbehältern hinter den Hammeln aufgefangene Kot verlustfrei und ohne Harnkontamination entnommen und bis zur Aufbereitung tiefgefroren werden. Bei der Aufbereitung wurde der Kot jedes einzelnen Tieres gewogen, gemischt und für eine Kotsammelprobe von jedem Versuchstier gesondert abgepackt und tiefgefroren. Daraus ergab sich für jeden Hammel eine Sammelprobe, die zur weiteren Untersuchung ins Labor geschickt wurde. Die Verdaulichkeiten wurden anhand der Labordaten berechnet und mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse bewertet.

3.5 *In situ*-Versuch

Die Durchführung der *in situ*-Methode zur Bestimmung des ruminalen Nährstoffabbaus wurde in den letzten Jahre verbessert und zu einem großen Teil standardisiert, um eine gesteigerte Genauigkeit der Ergebnisse zu erzielen. Die *in situ*-Methodik ist in vielen Ländern zu einem Standardverfahren der Futterwertschätzung bei Wiederkäuern geworden (SÜDEKUM 2005).

3.5.1 Versuchsanlage, Versuchstiere, Haltung und Fütterung

Der *in situ*-Abbauversuch wurde auf dem Versuchsgut „Frankenforst“ der Universität Bonn mit drei pansenfistulierten Ochsen durchgeführt. Diese waren zum Versuchszeitpunkt 13 Jahre alt und wurden während des Versuchs auf Tiefstreu gehalten.

Die Ration der Ochsen während des Versuchszeitraums bestand aus 6 kg Maissilage, 2 kg Kraftfutter und 2 kg Heu. Die Ration wies einen Rohproteingehalt von 13 % und einen Energiegehalt von 5,9 MJ NEL/kg TM auf und entsprach damit dem 1,2-fachen energetischen Erhaltungsbedarf. Die Futtevorlage erfolgte zweimal täglich um 7.00 und 19.00 Uhr. Zur Adaptation an das während des Versuchszeitraums vorgelegte Futter wurde die Ration den Tieren bereits zwei Wochen vor Versuchsbeginn vorgelegt.

3.5.2 Durchführung des *in situ*-Versuchs

Die Grassilageproben wurden zur Versuchsvorbereitung zerkleinert und in zerriebenem Zustand in den Versuch eingebracht, um den in der Realität zuvor erfolgten Kauvorgang zu simulieren. Die Inkubation erfolgte in Nylonbeuteln mit einer Porengröße von 50 µm ($\pm 15 \mu\text{m}$). Die leeren Beutel wurden vor Versuchsbeginn kalt gewaschen und getrocknet. Anschließend wurden sie beschriftet, ihr Leergewicht ermittelt und jeweils vier Gramm der zerkleinerten Grassilagegetrocknenmasse eingewogen.

Die verschlossenen Beutel wurden nach dem Einwiegen der Futterproben zur Inkubation an ein Kilogramm schwere Gewichte gehängt, damit sie in den Tieren an der Basis des ventralen Pansensacks im wässrigen Milieu verbleiben. Dort sind die Voraussetzungen für die Mikroorganismen am günstigsten, die Futtermittel in den Beuteln großflächig zu besiedeln und die Nährstoffe abzubauen. Mittels einer zu Jugendzeiten der Tiere operativ eingesetzten Pansenfistel wurden die Probebeutel direkt in den Pansen der Ochsen eingeführt. Bei einer Inkubationszeit von 0 bis 48 Stunden wurden pro Futtermittel und Tier drei Beutel verwendet, von 72 bis 336 Stunden jeweils sechs Beutel.

Die Beutel einer Inkubationszeit wurden jeweils gleichzeitig inkubiert und gleichzeitig wieder entnommen. Nach Ablauf der jeweiligen Inkubationszeit wurden die Gewichte mit Hilfe eines Bandes aus dem Pansen herausgezogen und die Proben sofort in Eiswasser gelegt, um mikrobielle Aktivitäten zu beenden. Die Proben mit abgelaufener Inkubationszeit wurden vom Gewicht entnommen und die Übrigen wieder in den Pansen eingesetzt. Die entnommenen Beutel wurden anschließend in einem Wäschenetz in einer Waschmaschine kalt und ohne zu schleudern gewaschen, um anhaftende Bestandteile des Panseninhalts und verbliebene Mikroorganismen zu entfernen, die die Versuchsergebnisse hätten verfälschen können. Da dies die Mikroorganismen aber nur kurzzeitig inaktiviert, müssen die Proben schnellstmöglich bis zur weiteren Analyse in eine Gefriertruhe verbracht werden, um noch aktive Pansenmikroben zu inaktivieren und Schimmelbildung zu verhindern.

3.5.3 Bestimmung von TM, NDFom und ADFom in den *in situ*-Proben

Zur Bestimmung der NDFom- und ADFom-Gehalte der *in situ*-Proben wurden die inkubierten, getrockneten Proben zunächst auf eine Partikelgröße von ca. 1 mm zermahlen. Zuvor wurden die Probebeutel für zwei Stunden im Trockenschrank getrocknet, anschließend leer gewogen und beschriftet. Die Beutel wurden mit jeweils 0,45 - 0,55 g Probematerial gefüllt. Von jeder Probe wurden jeweils zwei NDF- und zwei ADF-Proben angesetzt. Die Probebeutel wurden zugeschweißt und ihr Gesamtgewicht bestimmt.

Die Probebeutel wurden anschließend chargenweise im Faseranalysegerät mit der entsprechenden Lösung für 1,5 Stunden gekocht. Die NDF- bzw. ADF-Lösung wurde zuvor mit destilliertem Wasser, den in Tabelle 5 aufgeführten Chemikalien und einem Magnetrührer hergestellt.

Tabelle 5: Chemikalien und ihre angewandten Mengen zur Herstellung von fünf Litern NDF¹- bzw. ADF²-Lösung in Gramm soweit nicht anders angegeben

| NDF¹-Lösung | | ADF²-Lösung | |
|---|--------------|--|--------------|
| Chemikalie | Menge | Chemikalie | Menge |
| EDTA Dinatriumsalz Dihydrat | 93,05 | Cetyltrimethylammoniumbormid | 100 |
| di-Sodium Tetraborate | 34,05 | Konz. Schwefelsäure (95 %) (ml) | 133 |
| SDS Pellets | 150 | | |
| Triethylenglykol-Lösung (ml) | 50 | | |
| di-Natriumhydrogenphosphat-12-hydrat | 57,50 | | |

¹ NDF: Neutral-Detergenzienfaser

² ADF: Säure-Detergenzienfaser

Nach dem Kochen wurden die Probebeutel aus dem Faseranalysegerät entnommen, mit Papiertüchern getrocknet und für wenige Minuten in Acetonlösung eingelegt. Anschließend wurden sie auf einem Blech über Nacht in einem 100 Grad Celsius heißen Trockenschrank

getrocknet. Am Morgen wurden die Probebeutel dem Trockenschrank entnommen, in einem Exikator abgekühlt und anschließend gewogen.

Zur Bestimmung der NDFom bzw. ADFom mussten die Proben verascht werden. Hierzu wurden Tiegel über zwei Stunden im Trockenschrank getrocknet, dann im Exikator abgekühlt, leer gewogen und in Probebeutel gefüllt. Die Tiegel wurden zunächst in den Vorverascher gestellt und anschließend über Nacht im 500 Grad heißen Ofen verascht. Morgens wurden die Tiegel entnommen, im Exikator abgekühlt und zurückgewogen.

Zur Bestimmung des Trockenmassegehalts wurde vom Ausgangsmaterial 1 g in zuvor getrocknete, wieder abgekühlte und leer gewogene Tiegel eingewogen und über Nacht in den Trockenschrank gestellt. Anschließend wurden die Tiegel mit den Trockenmasseproben zurückgewogen und der Anteil Trockenmasse errechnet.

3.5.4 Erfassung der Verluste an kleinen Partikeln

Um die Trockenmassedaten um die Verluste an kleinen Partikeln reduzieren zu können, musste zunächst die wasserlösliche Fraktion der Grassilagen bestimmt werden. Dazu wurden von der Ausgangssilage beider Gruppen für jeweils drei Proben 25 g in Bechergläser eingewogen. Diese wurden mit 250 ml destilliertem Wasser aufgefüllt, welches eine Temperatur von 40 °C aufwies. Anschließend wurde das Gemisch mit einem getrockneten Faltpapier Nr. 595^{1/2} gefiltert. Der Filter mit dem Rückstand wurde nun über Nacht in einem 60 °C heißen Trockenschrank und am Morgen für eine Stunde in einem 100 °C heißen Trockenschrank getrocknet. Die Trockenmasse wurde nach dem oben beschriebenen Verfahren von den Ausgangsgrassilagen und den Filtrerrückständen bestimmt.

3.5.5 Kalkulationen und statistische Auswertung

Die Kenngrößen lösliche Fraktion, unlösliche abbaubare Fraktion und Abbauraten der unlöslichen abbaubaren Fraktion wurden über die folgende Gleichung nach WULF und SÜDEKUM (2005) bestimmt:

$$\text{CDEG} = a + b (1 - e^{-c(t-L)}) \quad \text{für } t > L$$

wobei CDEG = Abbau des Nährstoffs zum Zeitpunkt t

a = Wasserlösliche Fraktion (Verlust bei t = 0)

b = Nicht lösliche, aber abbaubare Fraktion

c = Abbauraten von b

t = Inkubationsdauer

L = Lag-Phase

Die zuvor bestimmten Verluste wurden anschließend noch mit folgender Gleichung nach WEISBJERG et al. (1990) um den Anteil an kleinen Partikeln korrigiert:

$$\text{CDI}_i = \text{DI}_i - \text{SP} (1 - ((\text{DI}_i - (\text{SP} + \text{WS})) / (1 - (\text{SP} + \text{WS}))))$$

wobei CDI_i = Um den Verlust kleiner Partikel korrigierter prozentualer Verlust der Stoffgruppe i

DI_i = Unkorrigierter Verlust der Stoffgruppe i

SP = Anteil der kleinen Partikel

WS = Anteil der wasserlöslichen Fraktion

Anschließend wurde für die Trockenmasse, NDFom und ADFom der effektive Abbau nach Mc Donald (1981) mit den Modifikationen von WULF und SÜDEKUM (2005) bestimmt:

$$ED = a + (bc / (c + k)) e^{-kL}$$

wobei ED = Abbau des Nährstoffs zum Zeitpunkt t

a = Wasserlösliche Fraktion (Verlust bei t = 0)

b = Nicht lösliche, aber abbaubare Fraktion

c = Abbaurate von b

k = Passagerate

L = Lag-Phase

4 Ergebnisse

4.1 Futteranalysen

4.1.1 Inhaltsstoffe der Grassilagen

Für die Grassilagen lagen drei Analysebefunde vor (Bohrstockprobe vor Siloöffnung, tägliche Sammelproben von der Anschnittsfläche beim Versuch mit Milchvieh und Hammeln), die nach Versuchsende gemittelt wurden. Der Trockenmassegehalt lag bei 287 g/kg TM für die unbehandelte und 258 g/kg TM für die behandelte Grassilage. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Analyseergebnisse der Grassilagen und der TMR.

Tabelle 6: Analysierte Nährstoffgehalte der behandelten und der unbehandelten Grassilagen (n = 3) sowie kalkulierte Nährstoffgehalte der TMR¹ in g/kg TM² sowie g/kg (TM²), je kg TM² (Strukturwert) und MJ⁶ NEL⁷/kg TM² (NEL⁷)

| Kenngrößen | Unbehandelte Grassilage | Behandelte Grassilage | TMR² mit unbe- handelter Silage | TMR² mit behandelter Silage |
|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|---|
| Trockenmasse | 287 | 258 | 446 | 430 |
| Rohasche | 109 | 106 | 76 | 74 |
| Rohprotein | 159 | 154 | 169 | 168 |
| Rohfett | 35 | 38 | 34 | 35 |
| Rohfaser | 254 | 256 | 156 | 153 |
| Strukturwert | 3,1 | 3,1 | 1,5 | 1,4 |
| Zucker | 16 | 5 | 39 | 36 |
| NDFom³ | 470 | 470 | 333 | 328 |
| ADFom⁴ | 271 | 278 | 176 | 175 |
| nXP⁵ | 132 | 131 | 161 | 162 |
| NEL⁷ | 6,1 | 6,2 | 7,0 | 7,1 |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² TM: Trockenmasse

³ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁴ ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁵ nXP: Nutzbares Rohprotein am Duodenum

⁶ MJ: Megajoule

⁷ NEL: Netto-Energie-Laktation

Die TMR setzt sich zusammen aus den oben dargestellten Grassilagegehalten und den Mittelwerten aus einer Bohrstockprobe und den Sammelproben der Anschnittflächen beider Maissilagen sowie den mittleren Analyseergebnissen der übrigen Rationskomponenten. Da die Ration während des Versuchszeitraums zwei Mal verändert wurde, wurden die Rationen bei der Bildung des Mittelwertes nach ihrer Einsatzdauer im Versuch in Tagen gewichtet. Für die TMR ergab sich somit ein kalkulierter Trockenmassegehalt von 446 g/kg TM für die TMR mit unbehandelter und 430 g/kg TM für die mit behandelte Grassilage. Die weiteren Einzelwerte zeigt Tabelle 6.

Eine wesentliche Fragestellung dieser Arbeit ist, inwiefern das zu untersuchende Siliermittel in der Lage war, die Verdaulichkeit der Rohfaserkomponente und die Energieausbeute aus dem Grobfutter zu verbessern. Daher sind vor allem die Daten der Faserfraktion von Interesse. Der Rohfasergehalt lag in der behandelten Grassilage bei 256 g/kg TM und in der unbehandelten bei 254 g/kg TM. Dies führte durch die grasbetonte Ration zu einem Rohfasergehalt von 156 g/kg TM für die TMR mit unbehandelter und 153 g/kg TM für die mit behandelte Grassilage. Der Strukturwert war mit 3,1 je kg TM bei beiden Silagen identisch. Bei der TMR mit unbehandelter Grassilage lag der Strukturwert bei 1,5 je kg TM und bei der TMR mit behandelte Grassilage bei 1,4 je kg TM. Die NDFom waren in den Silagen mit 470 g/kg TM gleich hoch. Der Gehalt der ADFom betrug 278 g/kg TM bei der behandelten Grassilage und bei der unbehandelten 271 g/kg TM. Bei der TMR ergab sich ein NDFom-Gehalt von 328 g/kg TM für die TMR mit behandelte Grassilage und 333 g/kg TM für die mit unbehandelter Grassilage. Der ADFom-Gehalt der TMR mit unbehandelter Silage betrug 176 g/kg TM, der der TMR mit behandelte Silage 175 g/kg TM. Der Energiegehalt der Silagen lag bei 6,1 MJ NEL/kg TM bei der unbehandelten, 6,2 MJ NEL/kg TM bei der behandelten, 7,0 MJ NEL/kg TM bei der TMR mit unbehandelter sowie 7,1 MJ NEL/kg TM bei der TMR mit behandelte Grassilage.

Ein der Ausgangshypothese zum eingesetzten Siliermittel entsprechender Effekt war eine Erhöhung der Essigsäurekonzentration im behandelten Siliergut gegenüber dem unbehandelten während des Silierprozesses. Wie Tabelle 7 zeigt, lag der Gehalt an Essigsäure bei der behandelten Silage bei 40 g/kg TM gegenüber 31 g/kg bei der unbehandelten. Die behandelte Grassilage wies einen Milchsäuregehalt von 85 g/kg TM gegenüber 90 g/kg bei der unbehandelten Silage auf. Der pH-Wert der Silagen war mit 4,2 bei der behandelten Silage und 4,1 bei der unbehandelten Silage nahezu identisch. Die Gehalte an Butter-, Propion- und Valeriansäure lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Der Gehalt an Ammoniak-N am Gesamt-N betrug 12,0 % des N bei der unbehandelten und 12,1 % des N bei der behandelten Silage. Der Ethanolgehalt der Silagen lag bei 12 g/kg TM.

Tabelle 7: Analyseergebnisse der unbehandelten und der behandelten Grassilage (n = 3) hinsichtlich der Gärsäuren, pH-Werte, Ammoniak-N am Gesamt-N sowie Ethanolgehalt in g/kg TM¹ falls nicht anders angegeben

| Kenngößen | Unbehandelte Silage | Behandelte Silage |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Milchsäure | 90 | 85 |
| Essigsäure | 31 | 40 |
| pH-Wert | 4,1 | 4,2 |
| Buttersäure | n.n. ² | n.n. ² |
| Propionsäure | n.n. ² | n.n. ² |
| Valeriansäure | n.n. ² | n.n. ² |
| Ammoniak-N am Gesamt-N (%) | 12,0 | 12,1 |
| Ethanol | 12 | 12 |

¹ TM: Trockenmasse

² n.n.: nicht nachweisbar

4.1.2 Zusammensetzung der anderen Rationskomponenten

Während des Versuchszeitraums wurde die TMR zwei Mal verändert, davon einmal wegen eines Wechsels der Maissilage. Die zweite Maissilage wies einen geringeren Trockenmassegehalt, eine geringere Energiekonzentration sowie einen leicht höheren Rohfasergehalt und Strukturwert auf. Allerdings war die NDFom-Konzentration der ersten Maissilage höher als bei der zweiten, beim ADFom ist es umgekehrt. Insgesamt wurden für den Versuchszeitraum drei Rationen mit der jeweiligen Maissilage erstellt, wobei die ersten beiden Rationen die erste Maissilage enthielten. Für die Inhaltsstoffe wurde ein nach der Einsatzdauer der Ration gewichteter Mittelwert gebildet. Insgesamt setzten sich die Daten der Maissilage aus einem Mittel der Bohrstockprobe vor Siloöffnung und dem Mittel der täglichen Sammelproben beider Silagen zusammen. Somit ergab sich für die Maissilage in Ration eins und zwei ein Trockenmassegehalt von 339 g/kg TM zu 325 g/kg TM in Ration drei und eine Energiekonzentration von 6,8 MJ NEL/kg TM in allen Rationen.

Der in der Ration eingesetzte Weizen wies bei einem Trockenmassegehalt von 870 g/kg TM einen Energiegehalt von 8,5 MJ/kg TM auf und lieferte 138 g Rohprotein je kg TM. Für das Mischfutter wurden Mittelwerte gebildet, da die Inhaltsstoffe der einzelnen Chargen voneinander abwichen. Bei einem mittleren Trockenmassegehalt von 872 g/kg TM lieferte es ca. 8,0 MJ NEL/kg TM. Der Rohfasergehalt des Mischfutters lag bei 72 g/kg TM, der NDFom-Gehalt bei 198 g/kg TM und der ADFom-Gehalt bei 106 g/kg TM. Da die NDFom- und ADFom-Gehalte nur bei jeder zweiten Probe untersucht wurden, lagen hier nur sieben Datensätze zugrunde.

Das im Melkstand als Lockfutter eingesetzte Milchleistungsfutter wies einen Trockenmassegehalt von 875 g/kg TM, einen Rohproteingehalt von 209 g/kg TM und einen Rohfasergehalt von 86 g/kg TM auf. Der Energiegehalt betrug 7,9 MJ NEL/kg TM.

Weitere Analyseergebnisse zu den oben genannten Rationskomponenten zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8: Analysierte Nährstoffgehalte des Weizens sowie mittlere gewichtete Nährstoffgehalte der Maissilagen (n = 2) und der Mischfutterchargen (n = 14; NDFom¹/ADFom²: n = 7) in g/kg TM³ soweit nicht anders angegeben

| Kenngrößen | Maissilagen (n = 2) | Weizen | Mischfutter (n = 14; NDFom¹/ADFom²: n = 7) | |
|---|----------------------------|------------------|---|-----|
| Trockenmasse (g/kg) | 339 ⁷ | 325 ⁸ | 870 | 872 |
| Rohasche | 33 ⁷ | 32 ⁸ | 19 | 62 |
| Rohprotein | 75 ⁷ | 78 ⁸ | 138 | 243 |
| Rohfett | 33 ⁷ | 32 ⁸ | 21 | 39 |
| Rohfaser | 181 ⁷ | 180 ⁸ | 24 | 72 |
| Strukturwert (kg TM) | 1,5 ⁷ | 1,5 ⁸ | | 0,2 |
| Zucker | 15 ⁷ | 15 ⁸ | 23 | 80 |
| Stärke | 358 ⁷ | 383 ⁸ | 663 | 198 |
| NDFom¹ | 442 ⁷ | 435 ⁸ | | 198 |
| ADFom² | 184 ⁷ | 185 ⁸ | | 106 |
| nXP⁶ | 134 ⁷ | 135 ⁸ | 172 | 211 |
| NEL⁵ (MJ⁴/kg TM³) | 6,8 ⁷ | 6,8 ⁸ | 8,5 | 8,0 |

¹ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

² ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

³ TM: Trockenmasse

⁴ MJ: Megajoule

⁵ NEL: Netto-Energie-Laktation

⁶ nXP: Nutzbares Rohprotein am Duodenum

⁷ Fütterungszeitraum 23.10.2008 - 05.01.2009

⁸ Fütterungszeitraum 06.01.2009 - 02.04.2009

4.2 Fütterungsversuch mit Milchkühen

4.2.1 Futteraufnahmen

Bezogen auf die Frischmasse haben die Tiere der Versuchsgruppe im Durchschnitt 46,9 kg aufgenommen und die der Kontrollgruppe 44,6 kg. Darin enthalten ist bei beiden Gruppen das Lockfutter im Melkstand. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,27 ergaben sich keine Unterschiede für die Frischmasseaufnahme. Die Betrachtung der Mittelwerte der Milchleistungsprüfung ergab eine mittlere tägliche Frischmasseaufnahme von 47,2 kg bei der Versuchs- und 44,9 kg bei der Kontrollgruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 0,15.

Für eine einheitliche Bewertung der Energieaufnahme über die Futteraufnahme ist eine Betrachtung der Trockenmasseaufnahmen beider Versuchsgruppen sinnvoll. So lag die mittlere Gesamttrockenmasseaufnahme der Versuchsgruppe bei 19,9 kg und die der Kontrollgruppe bei 19,0 kg. Daraus ergab sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit für die Trockenmasseaufnahme zwischen den Versuchsgruppen in Höhe von 0,29. Mit den Daten an den Tagen der Milchleistungsprüfung gerechnet verschob sich die Trockenmasseaufnahme auf 19,1 kg bei der Kontrollgruppe und auf 20,1 kg bei der Versuchsgruppe. Auch dabei entstand mit 0,13 kein Unterschied in der Futteraufnahme der Versuchsgruppen. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Futteraufnahmen.

Tabelle 9: Mittlere Futteraufnahmen (kg), Standardabweichungen (kg) und Signifikanzen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen

| Kenngroßen | mUG¹ | sUG² | mBG³ | sBG⁴ | p < 0,05 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Gesamtfrischmasseaufnahme⁵ | 44,6 | 1,53 | 46,9 | 1,43 | 0,27 |
| Gesamttrockenmasseaufnahme⁶ | 19,0 | 0,63 | 19,9 | 0,59 | 0,29 |
| Ergebnisse aus den 14-tägig erhobenen Milchkontrolldaten: | | | | | |
| Gesamtfrischmasseaufnahme⁵ | 44,9 | 1,16 | 47,2 | 1,02 | 0,15 |
| Gesamttrockenmasseaufnahme⁶ | 19,1 | 0,48 | 20,1 | 0,42 | 0,13 |

¹ mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

² sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

³ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁴ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁵ Inkl. 0,50 kg FM MLF im Melkstand pro Tag

⁶ Inkl. 0,4375 kg TM MLF im Melkstand pro Tag

4.2.2 Milchmengenleistungen und Milch Inhaltsstoffe

Milchmengenleistungen

Die natürliche Milchmengenleistung im Versuchszeitraum lag bei der Versuchsgruppe im Mittel bei 36,1 kg pro Tag, bei der Kontrollgruppe bei 32,9 kg. Dies führte zu einer Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen den Versuchsgruppen von 0,17. Die Daten für die natürliche Milchmengenleistung aus den Milchkontrollen ergaben eine mittlere Milchmengenleistung für die Versuchsgruppe von 36,5 kg pro Tag und von 33,5 kg für die Kontrollgruppe. Somit ergaben sich keine Unterschiede für die natürliche Milchmenge zwischen den beiden Versuchsgruppen anhand der Milchkontrolldaten

Die Milchmengenleistung bezogen auf Energie-korrigierte Milch (ECM) betrug im Mittel 33,9 kg pro Tag für die Versuchsgruppe und 31,6 kg für die Kontrollgruppe. Daraus folgten keine Unterschiede für die natürliche ECM-Milchmengenleistung zwischen den Versuchsgruppen. Die aus den Milchkontrolldaten errechnete Leistung energiekorrigierter Milch zeigte eine mittlere ECM-Milchmengenleistung der Versuchsgruppe von 34,4 kg und 32,1 kg bei der Kontrollgruppe pro Tag. Auch hier reichte die Differenz der Daten nicht für einen Unterschied zwischen den Versuchsgruppen aus.

Die mittlere natürliche Milchmengenleistung pro Tier und Tag veränderte sich bei Verwendung der Mittelwerte der Milchkontrolltage auf 35,8 kg bei der Versuchs- und 33,4 kg bei der Kontrollgruppe. Dies resultierte in einer Irrtumswahrscheinlichkeit in Höhe von 0,07. Rein aus den Milchkontrolldaten berechnet erbrachte die unbehandelte Gruppe eine mittlere Milchmengenleistung von 33,3 kg und die behandelte Gruppe 35,9 kg. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 0,07.

Umgerechnet auf Energie-korrigierte Milch führte die Betrachtung der MLP-Tage zu einer ECM-Milchmengenleistung von 33,7 kg für die Versuchs- und 31,9 kg für die Kontrollgruppe. Die Signifikanz betrug 0,11. Die mittleren MLP-Werte lieferten eine ECM-Milchmengenleistung in Höhe von 33,4 kg bei der Versuchsgruppe und 31,8 kg bei der Kontrollgruppe. Auch hier ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen.

Die Milchmengenleistungen der Versuchsgruppen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Mittlere Milchmengenleistungen (kg), Standardabweichungen (kg) und Signifikanzen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen

| Kenngroßen | mUG¹ | sUG² | mBG³ | sBG⁴ | p < 0,05 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Milchmengenleistung | 32,9 | 1,62 | 36,1 | 1,53 | 0,17 |
| Milchmengenleistung MLP⁵ | 33,5 | 1,54 | 36,5 | 1,46 | 0,17 |
| Milchmengenleistung ECM⁶ | 31,6 | 1,21 | 33,9 | 1,14 | 0,18 |
| Milchmengenleistung ECM⁶ MLP⁵ | 32,1 | 1,19 | 34,4 | 1,13 | 0,18 |

Ergebnisse aus den 14-tägig erhobenen Milchkontrolldaten:

| | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Milchmengenleistung | 33,4 | 0,98 | 35,8 | 0,86 | 0,07 |
| Milchmengenleistung MLP⁵ | 33,3 | 1,08 | 35,9 | 0,95 | 0,07 |
| Milchmengenleistung ECM⁶ | 31,9 | 0,85 | 33,7 | 0,75 | 0,11 |
| Milchmengenleistung ECM⁶ MLP⁵ | 31,8 | 0,97 | 33,4 | 0,84 | 0,21 |

¹ mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

² sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

³ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁴ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁵ MLP: Milchleistungsprüfung

⁶ ECM: Energie-korrigierte Milch

Milchfett

Die Milchinhaltsstoffe der Tiere wurden anhand der Milchleistungsprüfungen bestimmt. Dabei ergab sich für den Versuchszeitraum ein mittlerer Milchfettgehalt der Gruppe mit behandelter Silage von 3,68 % und 3,73 % bei der Kontrollgruppe. Daraus resultierte mit 0,62 keine statistisch relevante Differenz zwischen den Versuchsgruppen. Der Milchfettgehalt in kg - errechnet aus dem Milchfettgehalt der jeweils aktuellen Milchleistungsprüfung und den täglichen Milchmengenleistungen - lag bei 1,30 kg für die Versuchs- und 1,22 kg bei der Kontrollgruppe. Auch hier lagen keine Unterschiede zwischen den Gruppen vor. Wurden zur Berechnung ausschließlich die Milchfettprozentage und Milchmengenleistungen aus den Milchkontrolldaten verwendet und auf die Versuchstage hochgerechnet, ergab sich für die behandelte Gruppe ein mittlerer Milchfettgehalt von 1,33 kg und 1,31 kg für die unbehandelte Gruppe bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,86.

Die Berechnung aus den MLP-Daten führte zu einem mittleren Milchfettgehalt von 3,66 % für die Versuchs- und 3,70 % für die Kontrollgruppe. Aus diesen Werten entstand eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,66. Wurden diese Daten nun mit den Mittelwerten der Milchmengenleistung verrechnet, ergab sich ein mittlerer Milchfettgehalt von 1,29 kg für die Versuchs- und 1,22 kg für die Kontrollgruppe. Es lagen keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen vor. Die Verrechnung der alleinigen MLP-Daten des Milchfettgehalts mit den zugehörigen Milchmengenleistungen ergab einen Milchfettgehalt von ebenfalls 1,29 kg bei der behandelten und 1,26 kg bei der unbehandelten Gruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 0,75.

Einen Überblick über die Versuchsergebnisse bezüglich des Milchfetts gibt Tabelle 11.

Milchprotein

Aus den Milchkontrolldaten ergab sich ein mittlerer Milchproteingehalt für die Versuchsgruppe von 3,20 % und für die Kontrollgruppe von 3,30 %. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beim prozentualen Milchproteingehalt der Gruppen war 0,07. Beim Milchproteingehalt in kg wurde so verfahren wie beim Milchfett. Aus den täglich errechneten Werten ergab sich ein mittlerer Milchproteingehalt von 1,15 kg für die behandelte und 1,08 kg für die unbehandelte Gruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag bei 0,31. Bei Verwendung der Milchmengenleistungen aus den Milchkontrolldaten betrug der mittlere

Milchproteingehalt der Versuchsgruppe 1,16 kg und der der Kontrollgruppe 1,11 kg. Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag bei 0,36.

Auch bei den MLP-Werten ergaben sich bei einem durchschnittlichen Milchproteingehalt von 3,22 % für die Versuchs- und 3,28 % für die Kontrollgruppe keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Bei Multiplikation mit den Mittelwerten der Milchmengenleistung ergab sich ein mittlerer Milchproteingehalt von 1,14 kg für die Versuchs- und 1,10 kg für die Kontrollgruppe. Es gab mit 0,23 keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Mittelwertbildung aus den MLP-Daten des Milchproteingehalts mit den entsprechenden Milchmengenleistungen bei den Kontrollen ergab Milchproteingehalte von 1,15 kg bei der Versuchs- und 1,10 kg bei der Kontrollgruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 0,21

Tabelle 11 gibt einen Überblick über die Daten zum Milchproteinanteil und -gehalt der Versuchsgruppen.

Fett:Protein-Quotient

Beim vorliegenden Versuch wurde der Fett:Protein-Quotient aus den Einzeldaten der Milchkontrollen errechnet und für jede Gruppe ein Mittelwert bestimmt. Dieser lag für die Versuchsgruppe bei 1,15 und bei 1,13 für die Kontrollgruppe. Es lagen keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen vor. Der aus den MLP-Daten ermittelte durchschnittliche Fett:Protein-Quotient ergab ein Verhältnis von 1,14 für die Versuchs- und 1,13 für die Kontrollgruppe. Daraus resultierten mit 0,90 keine Unterschiede zwischen den Gruppen.

Die Werte finden sich zusammengefasst in Tabelle 11.

Zellzahl

Beeinflusst durch Mastitiserkrankungen während des Versuchszeitraums ergab sich aus den Milchkontrolldaten ein mittlerer Zellzahlgehalt von 143.000 Zellen für die Versuchs- und 312.000 Zellen für die Kontrollgruppe. Durch die Mastitidfälle zeigte sich eine hohe Differenz in den Einzelwerten der Tiere, was zu Standardfehlern von 86.000 für die Versuchs- und 91.000 für die Kontrollgruppe führte. Aus diesen Daten resultieren keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Der Mittelwert aus den Milchkontrollergebnissen lag für den Zellgehalt der Milch der Versuchsgruppe bei 137.000 Zellen und für die Kontrollgruppe bei 309.000 Zellen. Die Standardabweichung der behandelten Gruppe betrug 86.000 Zellen und

die der unbehandelten Gruppe 100.000. Daraus ergibt sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,19.

Tabelle 11 liefert eine Darstellung der Zellzahlwerte der Versuchsgruppen.

Harnstoff

Der Harnstoffgehalt lag für den Versuchszeitraum bei der Versuchsgruppe im Mittel bei 185 mg/kg und 205 mg/kg bei der Kontrollgruppe. Daraus resultiert ein Unterschied zwischen beiden Gruppen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,04. Dabei muss die Erhöhung des Mischfutteranteils an der Ration ab dem 19.12.2008 berücksichtigt werden. Der mittlere Harnstoffgehalt aus den MLP-Daten lag bei 190 mg/kg für die Versuchs- und 213 mg/kg für die Kontrollgruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt hier bei 0,004, wie Tabelle 11 zeigt.

Laktose

Die Versuchsgruppe wies einen mittleren Laktosegehalt von 4,76 % auf, die Kontrollgruppe lag bei 4,79 %. Daraus ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Der mittlere Laktosegehalt aus den MLP-Daten ließ sich bei 4,77 % für die Versuchsgruppe und 4,76 % für die Kontrollgruppe festmachen. Es ergab sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,74.

Tabelle 11 gibt einen Überblick über die Laktosedaten der Versuchsgruppen.

Tabelle 11: Mittelwerte, Standardabweichungen und Signifikanzen der Milchinhaltsstoffe beider Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen

| Kenngroßen | mUG¹ | sUG² | mBG³ | sBG⁴ | p < 0,05 |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Milchfettgehalt (%) | 3,73 | 0,08 | 3,68 | 0,08 | 0,62 |
| Milchfettmenge (kg) | 1,21 | 0,04 | 1,30 | 0,04 | 0,14 |
| Milchfettmenge MLP⁵ (kg) | 1,31 | 0,09 | 1,33 | 0,09 | 0,86 |
| Milchproteingehalt (%) | 3,30 | 0,04 | 3,20 | 0,04 | 0,07 |
| Milchproteinmenge (kg) | 1,08 | 0,04 | 1,15 | 0,04 | 0,31 |
| Milchproteinmenge MLP⁵ (kg) | 1,11 | 0,04 | 1,16 | 0,04 | 0,36 |
| Fett:Protein-Quotient | 1,13 | 0,02 | 1,15 | 0,02 | 0,58 |
| Zellzahl | 312.130 | 90.965 | 142.790 | 86.047 | 0,18 |
| Harnstoffgehalt (mg/kg) | 205 | 6,42 | 185 | 6,07 | 0,04 |
| Laktosegehalt (%) | 4,79 | 0,04 | 4,76 | 0,03 | 0,61 |

Ergebnisse aus den 14-tägig erhobenen Milchkontrolldaten:

| | | | | | |
|---|---------|--------|---------|--------|-------|
| Milchfettgehalt (%) | 3,70 | 0,08 | 3,66 | 0,07 | 0,66 |
| Milchfettmenge (kg) | 1,22 | 0,04 | 1,29 | 0,03 | 0,17 |
| Milchfettmenge MLP⁵ (kg) | 1,26 | 0,07 | 1,29 | 0,06 | 0,75 |
| Milchproteingehalt (%) | 3,28 | 0,03 | 3,22 | 0,03 | 0,15 |
| Milchproteinmenge (kg) | 1,10 | 0,03 | 1,14 | 0,03 | 0,23 |
| Milchproteinmenge MLP⁵ (kg) | 1,10 | 0,03 | 1,15 | 0,03 | 0,21 |
| Fett:Protein-Quotient | 1,13 | 0,03 | 1,14 | 0,02 | 0,90 |
| Zellzahl | 308.670 | 99.837 | 136.750 | 85.698 | 0,19 |
| Harnstoffgehalt (mg/kg) | 213 | 5,95 | 190 | 5,10 | 0,004 |
| Laktosegehalt (%) | 4,76 | 0,03 | 4,77 | 0,03 | 0,74 |

¹ mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

² sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

³ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁴ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁵ MLP: Milchleistungsprüfung

4.2.3 Körperkondition

Lebendmasse

Aus den zwei Mal täglich über eine Durchtriebswaage am Melkstandausgang bestimmten Lebendmassen wurde zur Reduzierung der natürlichen Schwankungen im Kuhgewicht ein Mittelwert pro Tag gebildet. Daraus ergab sich ein Gruppenmittelwert für den Versuchszeitraum von 629 kg für die Versuchsgruppe und 632 kg für die Kontrollgruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit der Tiergewichte beider Gruppen betrug 0,87. An Hand der Wiegedaten der MLP-Tage ließ sich ein mittleres Gruppengewicht sowohl der Versuchs- als auch der Kontrollgruppe von 630 kg pro Tier bestimmen. Daraus resultierten, wie aus Tabelle 12 hervorgeht, keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen.

Body-Condition-Score

Die Body-Condition-Score-Werte wurden an vier Terminen während des Versuchszeitraums durch Mitarbeiter des Landwirtschaftszentrums „Haus Riswick“ geschätzt. Die Tiere der Versuchsgruppe wiesen einen mittleren Body-Condition-Score von 3,14 BCS-Punkten auf. Für die Kontrollgruppe wurden im Mittel 3,43 BCS-Punkte geschätzt. Dies führte zu keinen Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen. Für die Versuchsgruppe lag der mittlere BCS-Wert an den MLP-Tagen bei 3,25 BCS-Punkten und für die Kontrollgruppe bei 3,58 BCS-Punkten. Hier ergab sich, wie in Tabelle 12 ersichtlich, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,001 ein Unterschied zwischen den Versuchsgruppen.

Rückenfettdicke

Neben den BCS-Werten wurde durch Mitarbeiter von „Haus Riswick“ an fünf Terminen während des Versuchszeitraums die Rückenfettdicke der Tiere gemessen. Im Mittel zeigte sich bei der Versuchsgruppe wie auch bei der Kontrollgruppe eine mittlere Rückenfettdicke von 11 mm. Dementsprechend lag die Irrtumswahrscheinlichkeit des Merkmals Rückenfettdicke bei 0,92. Die mittleren Rückenfettdicken der MLP-Tage lagen bei der Versuchsgruppe bei 11 mm und 12 mm bei der Kontrollgruppe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 0,30. Die Werte sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Mittelwerte der Körperkonditionskenngrößen, Standardabweichungen und Signifikanzen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen

| Kenngößen | mUG¹ | sUG² | mBG³ | sBG⁴ | p < 0,05 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Lebendmasse (kg) | 632 | 13,14 | 629 | 12,45 | 0,87 |
| Body-Condition-Score (BCS⁵-Punkte) | 3,43 | 0,11 | 3,14 | 0,11 | 0,07 |
| Rückenfettdicke (mm) | 11,2 | 0,87 | 11,1 | 0,83 | 0,92 |
| Ergebnisse aus den 14-tägig erhobenen Milchkontrolldaten: | | | | | |
| Lebendmasse (kg) | 630 | 8,22 | 630 | 7,24 | 0,97 |
| Body-Condition-Score (BCS⁵-Punkte) | 3,58 | 0,08 | 3,25 | 0,07 | 0,001 |
| Rückenfettdicke (mm) | 11,6 | 0,55 | 10,9 | 0,48 | 0,30 |

¹ mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

² sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

³ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁴ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁵ BCS: Body Condition Score

4.2.4 Energiebilanz

Die Energiebilanz setzt sich zusammen aus der Differenz zwischen dem Gesamtenergiebedarf einer Kuh, bestehend aus dem Energiebedarf für Erhaltung und Milchbildung, sowie der Energieaufnahme. Der Erhaltungsbedarf wurde für jeden Versuchstag wie folgt errechnet:

Formel:

$$0,044 \times \text{mittlere Lebendmasse} + 9,1$$

Dabei setzt sich die mittlere Lebendmasse aus dem Mittelwert beider Wiegunen pro Tag zusammen. Der Energiebedarf zur Milchbildung wurde errechnet aus der durchschnittlichen täglichen Menge energiekorrigierter Milch (ECM) multipliziert mit dem Faktor 3,28 MJ/ kg ECM. Die Addition dieser Werte ergab den Gesamtenergiebedarf.

Im vorliegenden Versuch lag der tägliche Gesamtenergiebedarf der Tiere in der Versuchsgruppe im Mittel bei 147 MJ und in der Kontrollgruppe bei 140 MJ, woraus sich keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen ergaben. Die Gesamtenergieaufnahme betrug 137 MJ bei der Kontroll- und 145 MJ bei der Versuchsgruppe bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,21. Daraus ergab sich in der Energiebilanz für die Kontrollgruppe ein mittleres Energiedefizit pro Tier und Tag von - 3,1 MJ/ Tag. Die Versuchsgruppe wies hingegen ein Energiedefizit in Höhe von - 1,6 MJ/ Tag auf. Das Niveau der Irrtumswahrscheinlichkeit lag bei 0,73.

Bei der Energiebilanz, die mit den gemittelten Daten aus den MLP-Tagen erstellt wurde, lag der Gesamtenergiebedarf der Versuchsgruppe bei 147 MJ und 141 MJ bei der Kontrollgruppe. Dies führte allerdings nicht zu Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen. Die Versuchsgruppe nahm insgesamt 146 MJ auf, die Kontrollgruppe 138 MJ. Daraus ergab sich eine Energiebilanz der Versuchsgruppe von - 1,1 MJ gegenüber einem Energiedefizit der Kontrollgruppe in Höhe von - 3,0 MJ. Die Irrtumswahrscheinlichkeit konnte hier bei 0,54 festgestellt werden.

Die Werte der Energiebilanz sind gruppenspezifisch in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Mittelwerte (MJ¹), Standardabweichungen (MJ¹) und Signifikanzen der Energiekenngößen der Versuchsgruppen im Versuch mit Milchkühen

| Kenngößen | mUG² | sUG³ | mBG⁴ | sBG⁵ | p < 0,05 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Energiebedarf Erhaltung | 37 | 0,57 | 36 | 0,54 | 0,61 |
| Energiebedarf Milch | 104 | 3,97 | 111 | 3,75 | 0,18 |
| Gesamtenergiebedarf | 140 | 4,24 | 147 | 4,01 | 0,24 |
| Gesamtenergieaufnahme | 137 | 4,46 | 145 | 4,19 | 0,21 |
| Energiebilanz | - 3,1 | 3,13 | - 1,6 | 2,90 | 0,73 |
| Ergebnisse aus den 14-tägig erhobenen Milchkontrolldaten: | | | | | |
| Energiebedarf Erhaltung | 36 | 0,41 | 37 | 0,36 | 0,75 |
| Energiebedarf Milch | 105 | 2,78 | 111 | 2,45 | 0,11 |
| Gesamtenergiebedarf | 141 | 2,95 | 147 | 2,60 | 0,12 |
| Gesamtenergieaufnahme | 138 | 3,40 | 146 | 2,99 | 0,08 |
| Energiebilanz | - 3,0 | 2,36 | - 1,1 | 2,07 | 0,54 |

¹ MJ: Megajoule

² mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

³ sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

⁴ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁵ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

4.3 Verdauungsversuch mit Milchkühen

4.3.1 Futteranalysen und Futteraufnahmen

Futteranalysen

Die aus den Analyseergebnissen der für die Ration im Verdauungsversuch verwendeten Komponenten berechnete Ration wies die in Tabelle 14 dargestellten Nährstoffgehalte auf. Somit ergab sich ein Trockenmassegehalt von 447 g/kg für die Kontrollgruppe und 431 g/kg für die Versuchsgruppe. Die Gehalte an NDFom und ADFom lagen in der kalkulierten TMR für NDFom bei 333 g/kg TM für die Kontrollgruppe gegenüber 328 g/kg TM für die Versuchsgruppe. Die ADFom betrug 175 g/kg TM bei der Kontroll- und 174 g/kg TM bei der Versuchsgruppe. Die an die Kontrollgruppe gefütterte TMR wies einen Energiegehalt von 7,0 MJ NEL/kg TM auf, der kalkulierte Energiegehalt der TMR der Versuchsgruppe lag bei 7,1 MJ NEL/kg TM.

Tabelle 14: Kalkulierte Analyseergebnisse der während des Verdauungsversuchs gefütterten TMR¹ in g/kg TM² soweit nicht anders angegeben

| | Kalkulierte TMR¹ mit unbehandelter Grassilage | Kalkulierte TMR¹ mit behandelter Grassilage |
|---|---|---|
| Trockenmasse | 447 | 431 |
| Rohasche | 77 | 75 |
| Rohprotein | 167 | 166 |
| Rohfett | 33 | 34 |
| Rohfaser | 155 | 152 |
| NDFom³ | 333 | 328 |
| ADFom⁴ | 175 | 174 |
| NEL⁵ (MJ⁶/kg TM²) | 7,0 | 7,1 |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² TM: Trockenmasse

³ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁴ ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁵ NEL: Netto-Energie-Laktation

⁶ MJ: Megajoule

Futterraufnahmen

Bereits bei der Auswahl der Tiere für den Verdauungsversuch wurde darauf geachtet, dass die Tiere zur besseren Vergleichbarkeit relativ ähnliche Futterraufnahmen realisierten. Die Gesamttrockenmasseaufnahme betrug während des Verdauungsversuches - einschließlich des Lockfutters im Melkstand - durchschnittlich 22,13 kg TM/Tag bei der Kontroll- und 19,43 kg TM/Tag bei der Versuchsgruppe. Die Tiere bekamen jeweils die bereits zuvor an sie gefütterte Ration mit unbehandelter oder behandelter Grassilage zu fressen. Die mittleren Aufnahmen weiterer relevanter Futterbestandteile zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Mittlere Trockenmasse-, Rohprotein-, Rohfett-, Rohfaser-, NDFom¹- und ADFom²-Aufnahme sowie Standardabweichungen bei den Kühen mit TMR³ mit unbehandelter Grassilage (n = 3) und mit TMR³ mit behandelter Grassilage (n = 4) im Verdauungsversuch in kg TM⁴ pro Tag

| | mUG⁵ | sUG⁶ | mBG⁷ | sBG⁸ |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Trockenmasseaufnahme⁹ | 22,13 | 0,93 | 19,43 | 1,38 |
| Rohproteinaufnahme⁹ | 3,71 | 0,15 | 3,25 | 0,23 |
| Rohfettaufnahme⁹ | 0,73 | 0,03 | 0,66 | 0,05 |
| Rohfaseraufnahme⁹ | 3,40 | 0,14 | 2,93 | 0,21 |
| NDFom¹-Aufnahme⁹ | 7,31 | 0,31 | 6,32 | 0,45 |
| ADFom²-Aufnahme⁹ | 3,84 | 0,16 | 3,35 | 0,24 |

¹ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

² ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

³ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

⁴ TM: Trockenmasse

⁵ mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

⁶ sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

⁷ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁸ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁹ Aufnahme inklusive 0,44 kg TM Milchleistungsfutter im Melkstand pro Tag

4.3.2 Verdaulichkeiten

Die Verdaulichkeiten der TMR mit der behandelten oder der unbehandelten Grassilage sind in Tabelle 16 dargestellt. Für die TMR betrug die Verdaulichkeit der organischen Masse beim unbehandelten Futter 75,1 % und 76,1 % beim behandelten Futter. Dies führte nicht zu Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen.

Tabelle 16: Verdaulichkeiten, Standardabweichungen und Signifikanzniveau der TMR¹ mit un behandelter Grassilage (n = 3) und der TMR¹ mit behandelter Grassilage (n = 4) in Prozent oder in MJ²/kg TM³

| | mUG ⁴ | sUG ⁵ | mBG ⁶ | sBG ⁷ | p < 0,05 |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|
| Organ. Masse | 75,1 | 1,57 | 76,1 | 1,26 | 0,40 |
| Rohprotein | 69,2 | 1,39 | 70,5 | 1,33 | 0,26 |
| Rohfett | 65,8 | 6,62 | 66,9 | 2,90 | 0,76 |
| Rohfaser | 60,5 | 3,47 | 62,6 | 3,05 | 0,43 |
| NDFom⁸ | 58,2 | 1,99 | 57,4 | 1,95 | 0,64 |
| ADFom⁹ | 51,3 | 2,48 | 52,4 | 3,93 | 0,70 |
| Organ. Rest | 78,6 | 1,26 | 79,2 | 1,20 | 0,51 |
| NEL¹⁰ (MJ²/kg TM³) | 6,6 | 0,18 | 6,7 | 0,12 | 0,34 |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² MJ: Megajoule

³ TM: Trockenmasse

⁴ mUG: Mittelwert Gruppe mit un behandelter Grassilage

⁵ sUG: Standardabweichung Gruppe mit un behandelter Grassilage

⁶ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁷ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁸ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁹ ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

¹⁰ NEL: Netto-Energie-Laktation

Für die Versuchsfragestellung waren vor allem die Verdaulichkeiten der Faserbestandteile und das Energielieferungsvermögen des Futters relevant. In der TMR lagen die Rohfaserverdaulichkeiten der Versuchsgruppe bei 62,6 % und die der Kontrollgruppe bei 60,5 %. Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag hier bei 0,43. Die Verdaulichkeit der NDFom betrug hingegen bei der Versuchsgruppe 57,4 % und bei der Kontrollgruppe 58,2 %. Damit

lagen keine Differenzen zwischen den Versuchsgruppen vor. Ein ähnliches Ergebnis zeigte die Betrachtung der ADFom-Veraulichkeit, die für die Versuchsgruppe bei 52,4 % und für die Kontrollgruppe bei 51,3 % lag, was zu keinen Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen führte.

Die an die Tiere im Verdauungsversuch gefütterte TMR wies für die Kontrollgruppe einen mittleren Energiegehalt von 6,6 MJ NEL/kg TM und 6,7 MJ NEL/kg TM für die Versuchsgruppe auf. Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag hier bei 0,34.

4.3.3 Energiebilanz

Die durchschnittliche Gesamtenergieaufnahme der drei mit der unbehandelten Silage gefütterten Tiere im Verdauungsversuch lag bei 145 MJ/Kuh und Tag und der vier behandelten Tiere bei 130 MJ/Kuh und Tag, einschließlich des Lockfutters im Melkstand. Bei einem mittleren Gesamtenergiebedarf von 150 MJ wies die Energiebilanz der Kontrollgruppe ein Energiedefizit von - 4,7 MJ pro Kuh und Tag auf. Für die Versuchsgruppe zeigte sich ein Gesamtenergiebedarf von 149 MJ. Das daraus resultierende Energiedefizit betrug, wie auch aus Tabelle 17 deutlich wird, - 19,5 MJ pro Kuh und Tag.

Tabelle 17: Energiebilanz der Versuchsgruppen im Verdauungsversuch mit Milchkühen in MJ¹ pro Kuh und Tag

| Kenngößen | Unbehandelte Gruppe | Behandelte Gruppe |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Gesamtenergieaufnahme | 145 | 130 |
| Energiebedarf Milchbildung | 114 | 115 |
| Energiebedarf Erhaltung | 36 | 35 |
| Gesamtenergiebedarf | 150 | 149 |
| Energiebilanz | - 4,7 | - 19,5 |

¹ MJ: Megajoule

4.4 Verdauungsversuch mit Hammeln

4.4.1 Futteranalysen

Grassilagen

Die Grassilagen der Hammel wurden vor Versuchsbeginn an den Anschnittsflächen des jeweiligen Fahrsilos entnommen und nach sorgfältiger Durchmischung portionsweise eingefroren. Von diesen Mischungen wurden Sammelproben erstellt, wobei die der unbehandelten Grassilage einen mittleren Trockenmassegehalt von 293 g/kg aufwies und die der behandelten 252 g/kg. Der Rohfasergehalt wurde mit 236 g/kg TM für die Kontrollgruppe ausgewiesen, für die Versuchsgruppe mit 254 g/kg TM. Im Verhältnis dazu bewegten sich die NDFom- und ADFom-Gehalte der unbehandelten Silage auch leicht unter denen der behandelten, nämlich bei 451 g/kg TM für die NDFom-Fraktion der unbehandelten Silage gegenüber 468 g/kg TM für die behandelte. Der ADFom-Gehalt lag bei 259 g/kg TM für die unbehandelte Silage und bei 278 g/kg TM für die behandelte. Die unbehandelte Silage wies einen Energiegehalt von 6,6 MJ NEL/kg TM und die behandelte von 6,8 MJ NEL/kg TM auf.

Auch für die Grassilage des Verdauungsversuchs mit Hammeln wurde ein Gärsäuremuster erstellt. Dabei ergab sich ein Essigsäuregehalt der unbehandelten Silage von 25 g/kg TM und der behandelten Silage von 35 g/kg TM. Der Milchsäuregehalt der behandelten Silage lag bei 109 g/kg TM gegenüber 118 g/kg TM bei der unbehandelten Silage. Der pH-Wert der behandelten Silage betrug 4,1, der der unbehandelten Silage 3,9. Die Konzentration an Buttersäure, Propion- und Valeriansäure lag unterhalb der Bestimmungsgrenze.

TMR

Neben den acht mit Grassilage gefütterten Hammeln wurden weitere acht Hammel mit der TMR gefüttert, die auch den Kühen im Verdauungsversuch vorgelegt wurde. Diese enthielt für jeweils vier Hammel die behandelte oder die unbehandelte Grassilage, war von der Rationszusammensetzung her ansonsten jedoch identisch. Bei Trockenmassegehalten von 447 g/kg für die TMR mit unbehandelter Grassilage und 407 g/kg für die mit behandelter Silage, wies die TMR mit unbehandelter Grassilage einen NDFom-Gehalt von 378 g/kg TM und einen ADFom-Gehalt von 183 g/kg TM auf gegenüber 413 g NDFom/kg TM und 189 g ADFom/kg TM bei der behandelten.

Die Einzelwerte zu den Grassilagen und der TMR im Verdauungsversuch mit Hammeln sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Analysierte Nährstoffgehalte der unbehandelten und der behandelten Grassilagen und ihre Gärsäuren sowie die Nährstoffgehalte der TMR¹ in g/kg TM² und MJ⁶ NEL⁷/kg TM² (NEL⁷) im Verdauungsversuch mit Hammeln

| Merkmal | Unbehandelte Silage | Behandelte Silage | TMR² mit unbehandelter Silage | TMR² mit behandelter Silage |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---|---|
| Trockenmasse | 293 | 252 | 447 | 407 |
| Rohasche | 108 | 104 | 72 | 74 |
| Rohprotein | 152 | 152 | 168 | 165 |
| Rohfett | 41 | 44 | 40 | 39 |
| Rohfaser | 236 | 254 | 168 | 169 |
| Zucker | 11 | 5 | 34 | 22 |
| NDFom³ | 451 | 468 | 378 | 413 |
| ADFom⁴ | 259 | 278 | 183 | 189 |
| NEL⁷ | 6,6 | 6,8 | 7,2 | 7,4 |
| Essigsäure | 25 | 35 | | |
| Milchsäure | 118 | 109 | | |
| pH-Wert | 3,9 | 4,1 | | |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² TM: Trockenmasse

³ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁴ ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁵ nXP: Nutzbares Rohprotein am Duodenum

⁶ MJ: Megajoule

⁷ NEL: Netto-Energie-Laktation

4.4.2 Verdaulichkeiten

Grassilagen

Bei der Bestimmung der Verdaulichkeiten im Verdauungsversuch mit Hammeln kam es zu keinen erkennbaren Akzeptanzproblemen beim Futter oder Auffälligkeiten im Kot. Als Ergebnis der Verdaulichkeitsbestimmung des Versuchs mit Hammeln ließen sich für die behandelte und die unbehandelte Grassilage die in Tabelle 19 zusammengefassten Werte festhalten. So lag die Verdaulichkeit der organischen Masse der unbehandelten Grassilage bei 78,4 % und die der behandelten bei 79,8 % mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,72. Die Verdaulichkeit der Rohfaserkomponenten der behandelten Silage betrug 85,6 % und die der unbehandelten Silage 81,8 %. Daraus ergab sich eine Signifikanz in Höhe von 0,001. Die Verdaulichkeit der NDFom betrug 78,8 % bei der unbehandelten und 81,8 % bei der behandelten Silage, was zu einem Unterschied zwischen den Versuchsgruppen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,009 führte. Auch für die ADFom-Fraktion wurde mit einer Verdaulichkeit von 77,5 % bei der unbehandelten und 80,7 % bei der behandelten Grassilage ein Unterschied zwischen den Versuchsgruppen festgestellt. Der Energiegehalt der unbehandelten Grassilage lag bei 6,6 MJ NEL/kg TM und bei der behandelten bei 6,8 MJ NEL/kg TM. Daraus resultierte eine Irrtumswahrscheinlichkeit in Höhe von 0,04.

TMR

Für die TMR ergab sich eine Verdaulichkeit der organischen Masse in Höhe von 80,1 % für die TMR mit unbehauelter und 83,4 % für die mit behauelter Grassilage. Die Signifikanz der organischen Masse lag bei 0,012. Im Gegensatz zur Grassilage unterschied sich die mittlere Verdaulichkeit der Rohfaser mit 69,4 % in der TMR mit unbehauelter Grassilage nicht von der mit behauelter mit 73,6 %. Auch bei der Verdaulichkeit der NDFom war ein Unterschied zwischen den Versuchsgruppen bei einem Mittelwert von 69,4 % für die TMR mit unbehauelter und 74,1 % für die mit behauelter Grassilage feststellbar. Die TMR mit unbehauelter Grassilage zeigte eine ADFom-Verdaulichkeit von 62,4 % und die mit behauelter von 66,5 %, was zu keiner Differenz zwischen den Versuchsgruppen führte. Die TMR mit unbehauelter Grassilage unterschied sich im Verdauungsversuch mit Hammeln mit einem Energiegehalt von 7,1 MJ NEL/kg TM von der TMR mit behauelter Grassilage mit 7,5 MJ NEL/kg TM bei einer Signifikanz von 0,007.

Tabelle 19: Verdaulichkeiten, Standardabweichungen und Signifikanzen im Verdauungsversuch mit Hammeln für die unbehandelte und die behandelte Grassilage sowie für die TMR¹ mit unbehandelter und behandelter Grassilage in Prozent soweit nicht anders angegeben

| Kenngrößen | | mUG ⁴ | sUG ⁵ | mBG ⁶ | sBG ⁷ | p < 0,05 |
|------------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|
| Silage | Organische Masse | 78,4 | 0,99 | 79,8 | 0,77 | 0,072 |
| | Rohprotein | 70,8 | 1,32 | 72,4 | 0,87 | 0,079 |
| | Rohfett | 64,6 | 2,86 | 66,7 | 1,44 | 0,233 |
| | Rohfaser | 81,8 | 0,74 | 85,6 | 1,08 | 0,001 |
| | NDFom⁸ | 78,8 | 1,05 | 81,8 | 1,14 | 0,009 |
| | ADFom⁹ | 77,5 | 0,83 | 80,7 | 1,33 | 0,006 |
| | Organischer Rest | 78,1 | 0,99 | 78,3 | 0,82 | 0,763 |
| | NEL¹⁰ (in MJ²/kg TM³) | 6,6 | 0,11 | 6,8 | 0,07 | 0,040 |
| TMR ¹ | Organische Masse | 80,1 | 0,68 | 83,4 | 1,75 | 0,012 |
| | Rohprotein | 74,5 | 1,58 | 79,1 | 1,50 | 0,006 |
| | Rohfett | 66,9 | 4,68 | 77,8 | 0,57 | 0,004 |
| | Rohfaser | 69,4 | 0,44 | 73,6 | 3,88 | 0,075 |
| | NDFom⁸ | 69,4 | 0,29 | 74,1 | 3,22 | 0,026 |
| | ADFom⁹ | 62,4 | 1,27 | 66,5 | 3,68 | 0,079 |
| | Organischer Rest | 82,9 | 0,60 | 85,7 | 1,37 | 0,010 |
| | NEL¹⁰ (in MJ²/kg TM³) | 7,1 | 0,09 | 7,5 | 0,18 | 0,007 |

¹ TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

² MJ: Megajoule

³ TM: Trockenmasse

⁴ mUG: Mittelwert Gruppe mit unbehandelter Grassilage

⁵ sUG: Standardabweichung Gruppe mit unbehandelter Grassilage

⁶ mBG: Mittelwert Gruppe mit behandelter Grassilage

⁷ sBG: Standardabweichung Gruppe mit behandelter Grassilage

⁸ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

⁹ ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

¹⁰ NEL: Netto-Energie-Laktation

4.5 *In situ*-Versuch

Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Abbaukenngößen im *in situ*-Versuch sind in Tabelle 20 dargestellt. Dabei sind die Abbaumerkmale die Anteile der löslichen Fraktion, die der unlöslichen abbaubaren Fraktion, die Abbauraten und die potenziell abbaubare Fraktion. Diese setzt sich aus der Summe der löslichen und der unlöslichen abbaubaren Fraktion zusammen.

Tabelle 20: Mittelwerte und Standardabweichungen der *in situ*-Abbaukenngößen für Trockenmasse, NDFom¹ und ADFom² (jeweils unbehandelt/ behandelt) in Prozent soweit nicht anders angegeben

| Kenngößen | Mittelwerte | | | | Standardabweichungen | | | |
|--------------------------------------|-------------|------|-------|------|----------------------|-----|-------|-----|
| | a | b | c | d | a | b | c | d |
| | (%) | (%) | (%/h) | (%) | (%) | (%) | (%/h) | (%) |
| TM³ unbehandelt | 8,1 | 63,1 | 6,8 | 71,2 | 0,7 | 4,0 | 0,9 | 3,3 |
| TM³ behandelt | 3,2 | 67,9 | 6,8 | 71,1 | 0,7 | 4,0 | 0,9 | 3,3 |
| NDFom¹ unbehandelt | 0,1 | 73,4 | 7,5 | 73,5 | 0,1 | 1,9 | 2,8 | 1,9 |
| NDFom¹ behandelt | 0,0 | 76,3 | 5,7 | 76,3 | 0,1 | 1,9 | 2,8 | 1,9 |
| ADFom² unbehandelt | 0,0 | 71,2 | 8,8 | 71,2 | 0,0 | 2,3 | 2,2 | 2,3 |
| ADFom² behandelt | 0,0 | 74,6 | 6,2 | 74,6 | 0,0 | 2,3 | 2,2 | 2,3 |

mit a = lösliche Fraktion

b = unlösliche abbaubare Fraktion

c = Abbaurate von b

d = Potenziell abbaubare Fraktion (a + b)

¹ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

² ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

³ TM: Trockenmasse

Beim Abbau der Trockenmasse ergab sich bei der löslichen Fraktion ein Anteil von 8,1 % bei der unbehandelten Silage und 3,2 % bei der behandelten. Die unlösliche abbaubare Fraktion lag bei 63,1 % bei der unbehandelten und 67,9 % bei der behandelten. Die Abbaurate der Trockenmasse war mit 6,8 % pro Stunde bei beiden Silagen gleich hoch.

Das NDFom wies dafür eine Abbaubarkeit der unlöslichen abbaubaren Fraktion von 73,4 % bei der unbehandelten und 76,3 % bei der behandelten Silage auf. Beim ADF ergab sich eine unlösliche abbaubare Fraktion von 71,2 % bei der unbehandelten und 74,6 % bei der

behandelten Silage. Die Abbaurate der NDFom lag bei 7,5 %/ h für die unbehandelte und 5,7 %/h für die behandelte Silage. Die der ADFom betrug 8,8 %/ h bei der unbehandelten und 6,2 %/h bei der behandelten Silage. Die potenzielle Abbaubarkeit der NDFom in der unbehandelten Silage war 73,5 % und 76,3 % bei der behandelten. Die ADFom erreichte eine potenzielle Abbaubarkeit von 71,2 % in der unbehandelten und 74,6 % in der behandelten Silage. Aus diesen Daten ergaben sich die in Tabelle 21 zusammengefassten Irrtumswahrscheinlichkeiten für die *in situ*-Abbaukenngößen.

Tabelle 21: Irrtumswahrscheinlichkeiten der *in situ*-Abbaukenngößen zwischen den Versuchsgruppen für Trockenmasse, NDFom¹ und ADFom² (p < 0,05)

| Kenngößen | a | b | c | d |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| TM³ | 0,006 | 0,437 | 0,963 | 0,991 |
| NDFom¹ | 0,374 | 0,334 | 0,683 | 0,347 |
| ADFom² | 0,401 | 0,353 | 0,456 | 0,353 |

mit a = lösliche Fraktion

b = unlösliche abbaubare Fraktion

c = Abbaurate von b

d = Potenziell abbaubare Fraktion (a + b)

¹ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

² ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

³ TM: Trockenmasse

Die einzige statistisch absicherbare Kenngröße im *in situ*-Versuch war die Differenz des Anteils der löslichen Fraktion der Trockenmasse. Sowohl beim Trockenmasseabbau und der unlöslichen abbaubaren Fraktion wie auch mit den Daten zu NDFom und ADFom ließen sich keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen nachweisen. Die Irrtumswahrscheinlichkeit der Abbaurate bezüglich der NDFom betrug 0,683 und beim ADFom 0,456. Die der potenziell abbaubaren Fraktion lag bei 0,991 für die Trockenmasse, 0,347 für NDFom und 0,353 für ADFom. Somit lagen keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen vor.

Insgesamt wies der Versuch - vor allem beim NDFom und ADFom - relativ lange lag-Phasen auf. Diese Verzögerungszeiten bis zum Abbaubeginn zeigt Tabelle 22.

Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Signifikanzniveaus der Verzögerungszeit bis zum Abbaubeginn in Stunden für Trockenmasse, NDFom¹ und ADFom² (jeweils unbehandelt/ behandelt)

| | Mittelwerte | Standardabweichungen | Signifikanzniveau |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------|
| TM³ unbehandelt | 0,560 | 0,335 | |
| TM³ behandelt | 0,384 | 0,335 | 0,728 |
| NDFom¹ unbehandelt | 7,249 | 2,026 | |
| NDFom¹ behandelt | 4,088 | 2,026 | 0,332 |
| ADFom² unbehandelt | 1,095 | 1,115 | |
| ADFom² behandelt | 3,265 | 1,115 | 0,241 |

¹ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

² ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

³ TM: Trockenmasse

Die mittlere Verzögerungszeit bis zum Abbaubeginn lag für die Trockenmasse der unbehandelten Silage bei 0,560 Stunden und bei der behandelten Silage bei 0,384 Stunden. Daraus ergab sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,728. Beim NDFom führte der Versuch zu einer lag-Phase von 7,249 Stunden für die unbehandelte und 4,088 Stunden für die behandelte Silage. Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag hier bei 0,332. Die Verzögerungszeit der ADFom lag bei 1,095 Stunden für die unbehandelte und 3,265 Stunden für die behandelte Silage bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,241.

Der effektive Nährstoffabbau wurde in der statistischen Auswertung bei Passageraten von zwei, vier und sechs Prozent pro Stunde ermittelt. Einen Überblick darüber gibt Tabelle 23.

Tabelle 23: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent (jeweils unbehandelt/ behandelt) sowie Signifikanzen des effektiven Nährstoffabbaus im *in situ*-Versuch für Trockenmasse, NDFom¹ und ADFom² bei angenommenen Passageraten von 2 Prozent (PR 2), 4 Prozent (PR 4) und 6 Prozent (PR 6) pro Stunde

| | Mittelwerte | | | Standardabw. ³ | | | Signifikanzen | | |
|--------------------------------------|-------------|------|------|---------------------------|------|------|---------------|------|------|
| | PR 2 | PR 4 | PR 6 | PR 2 | PR 4 | PR 6 | PR 2 | PR 4 | PR 6 |
| TM⁴ unbehandelt | 55,7 | 46,1 | 39,7 | 3,1 | 2,7 | 2,3 | 0,94 | 0,85 | 0,74 |
| TM⁴ behandelt | 55,3 | 45,4 | 38,5 | 3,1 | 2,7 | 2,3 | | | |
| NDFom¹ unbehandelt | 45,2 | 36,6 | 27,8 | 3,9 | 3,6 | 2,8 | 0,38 | 0,32 | 0,23 |
| NDFom¹ behandelt | 50,6 | 30,9 | 22,2 | 3,9 | 3,6 | 2,8 | | | |
| ADFom² unbehandelt | 55,0 | 38,9 | 30,4 | 3,5 | 3,7 | 3,6 | 0,57 | 0,33 | 0,23 |
| ADFom² behandelt | 52,0 | 44,7 | 37,6 | 3,5 | 3,7 | 3,6 | | | |

¹ NDFom: Neutral-Detergenzienfaser nach Veraschung

² ADFom: Säure-Detergenzienfaser nach Veraschung

³ Standardabw.: Standardabweichung

⁴ TM: Trockenmasse

Bei allen untersuchten Kenngrößen zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Passagerate auf den effektiven Trockenmasseabbau. Bezogen auf die Trockenmasse der unbehandelten Grassilage ging bei einer Zunahme der Passagerate von 2 %/h auf 6 %/h der effektive Abbau der Trockenmasse von 55,7 % auf 39,7 % zurück, bei der behandelten Gruppe von 55,3 % auf 38,5 %. Es lagen keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen vor. Der effektive Abbau der NDFom der unbehandelten Silage betrug bei einer Passagerate von 2 %/h noch 45,2 % und reduzierte sich auf 27,8 % bei einer Passagerate von 6 %/h. Bei der behandelten Silage reduzierte sich der Wert sogar von 50,6 % auf 22,2 %. Auch hier lagen keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen vor. Der effektive Abbau der ADFom in der unbehandelten Silage ging bei einer Passagerate mit 2 %/h von 55,0 % auf 30,4 %/h bei einer Passagerate von 6 %/h zurück. Die behandelte Gruppe wies bei einer Passagerate von 2 %/h einen effektiven Abbau von 52,0 % auf, der sich bei einer Passagerate von 6 %/h auf 37,6 % reduzierte. Auch hier fanden sich keine manifestierbaren Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen.

5 Diskussion

5.1 Grassilagen

Die beiden Silomieten wurden unmittelbar nach dem Einfahren des Silierguts nach gängiger Praxis mit Folien und Beschwergut zugedeckt. Dennoch bildete sich zeitweise an beiden Silos im Bereich der abgedeckten Anschnittsfläche quer über die Miete Schimmel aus, so dass teilweise bis zu dreißig Zentimeter der oberen Schicht verworfen werden mussten. Die Schimmelbildung am Silo mit unbehandelter Grassilage verlief zunächst langsam und über einen längeren Zeitraum nur am rechten Randbereich. Kurz darauf setzte am Silo mit der behandelten Silage Nacherwärmung ein und die Schimmelbildung verschlimmerte sich an beiden Mieten. Daraufhin wurden die Silos unmittelbar nach der Entnahme verschlossen und die mit Schimmel befallene Grassilage nicht verfüttert.

Die täglich während der Fütterung an der unbefallenen Anschnittsfläche entnommenen Silageproben wiesen einen im Mittel identischen Energiegehalt für die Silagen aus. Insgesamt lag der Energiegehalt von 6,2 MJ NEL/kg TM für die behandelte und 6,1 MJ NEL/kg TM für die unbehandelte Grassilage unterhalb des allgemeinen Zielwertes von $\geq 6,4$ MJ NEL/kg TM für eine Grassilage vom ersten Schnitt (SPIEKERS 2006). Auch beim Rohfasergehalt, beim Strukturwert sowie bei NDFom und ADFom wiesen die Versuchs- und die Kontrollsilage ähnliche Analyseergebnisse auf. Das Siliermittel beeinflusste somit die Kennzahlen der Faserfraktion nicht. Details zu den im Rahmen der Diskussion zu Vergleichszwecken hinzugezogenen Publikationen zeigt Tabelle A1 im Anhang, wobei auf die entsprechende Quelle im Text verwiesen wird. So beobachteten auch FENG et al. (1996, A7) keine Veränderungen in den Gehalten von NDF und ADF, nachdem sie faserabbauende Enzyme auf Grassilage sprühten. Dies gilt auch für die Analyseergebnisse der TMR, bei der sich im vorliegenden Versuch die Anteile an NDFom und ADFom zwischen der Kontroll-TMR und der TMR mit behandelter Grassilage ebensowenig unterschieden wie bei KUNG et al. (2000, A14) oder bei LEWIS et al. (1999, A17). Der Vergleich mit bisher veröffentlichten Arbeiten zeigte somit, dass die lange Einwirkzeit der Enzyme während der gesamten Lagerungs- und Silierphase von drei Monaten gegenüber einer direkten Applikation vor der Fütterung keine Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Futters bewirkte. Auch ein der Ausgangshypothese entsprechender erhöhter Aufschluss der Faserbestandteile im Silierprozess ließ sich somit auf Basis der Analysedaten nicht belegen.

Auffallend war, dass beide Silageproben einen geringen Restzuckeranteil aufwiesen. Dieser lag bei 16 g/kg TM für die unbehandelte und 5 g/kg TM für die behandelte Silage, was relativ gesehen eine durchaus beachtliche Differenz darstellt. Der geringere Zuckergehalt in der behandelten Silage könnte als Beleg für eine Wirkung der Bakterien angesehen werden, wenn davon ausgegangen wird, dass ein Teil der freigesetzten pflanzlichen Zuckermonomere während des Silierprozesses von den Bakterien in der behandelten Silage umgesetzt wurde. Daher standen diese Zuckermonomere nicht zur Verfügung, um die Energiebilanz der Tiere zu verbessern und höhere tierische Leistungen zu realisieren.

Neben den Einflüssen des Siliermittels auf die Futterinhaltsstoffe war eine weitere Versuchsfragestellung, ob das verwendete Siliermittel einen Einfluss auf den Siliererfolg hat. In diesem Zusammenhang ist die Betrachtung des Gär säuremusters zur Beurteilung der Konservierung von Interesse. So ermittelten NSEREKO et al. (2008, A18) beim Einsatz von *L. buchneri* eine Erhöhung des Essigsäuregehalts gegenüber der Kontrollsilage. Dieser Effekt zeigte sich bereits in vorherigen Versuchen mit faserabbauenden Enzymen. Trotz des der Ausgangshypothese entsprechendem höheren Essigsäuregehaltes in der behandelten Silage konnte während der Fütterungsphase die aerobe Stabilität nicht aufrechterhalten werden. Zwar lagen die Essigsäuregehalte beider Silagen über der allgemeinen Zielgröße von 20 - 30 g/kg TM (SPIEKERS 2006), waren jedoch olfaktorisch nicht wahrnehmbar. Vor allem der Gehalt an Milchsäure ist ein entscheidender Faktor für den Siliererfolg, da diese einen starken Abfall des pH-Wertes bewirkt. Die Milchsäuregehalte der Silagen waren jedoch, wie auch bei THAYSEN et al. (2007, A24) identisch, wodurch sich auch die pH-Werte der Silagen nicht unterschieden. Der Buttersäuregehalt lag im beprobten Bereich der Silos unterhalb der Bestimmungsgrenze. Dasselbe gilt für Propion- und Valeriansäure. Allerdings lag der Gehalt an Ammoniak-N am Gesamt-N oberhalb der Grenze von 10 % N am Gesamt-N, was als ein Indikator für nicht optimal konservierte Silagen gilt (KAISER 2006). Da beide Silagen betroffen waren, unterschied sich der Anteil $\text{NH}_3\text{-N}$ in den Silagen nicht. THAYSEN et al. (2007, A24) stellten dagegen bei ihren Untersuchungen mit *L. buchneri* (Stamm PTA 6138) einen geringeren Anteil $\text{NH}_3\text{-N}$ in der behandelten Silage fest.

5.2 Leistungs- und Körperkonditionskenngrößen im Fütterungsversuch

5.2.1 Futteraufnahmen

Die Analyseergebnisse der Grassilagen zeigten einen erhöhten Essigsäuregehalt in der behandelten Silage, was bei der Beurteilung der Futteraufnahmen berücksichtigt werden muss. Der höhere Essigsäuregehalt im Futter war olfaktorisch nicht wahrnehmbar und die Futteraufnahmen der beiden Versuchsgruppen unterschieden sich nicht voneinander. Es gilt festzuhalten, dass trotz des erhöhten Essigsäuregehalts in der behandelten Silage die Futteraufnahme verglichen mit der Kontrollgruppe nicht reduziert war. Somit ließ sich ein futteraufnahmesteigernder Einfluss des Siliermittels nicht belegen. Diese Beobachtung der konstant bleibenden Futteraufnahmen deckt sich mit den Beobachtungen zahlreicher anderer Studien, die mit unterschiedlichen Enzymmischungen und unter abweichenden Untersuchungsbedingungen durchgeführt wurden. Details zu den Publikationen zeigt Tabelle A1 im Anhang. So berichten KUNG et al. (2002, A15) und SUTTON et al. (2003, A23) nicht von einer Erhöhung der Trockenmasseaufnahme. Bei RODE et al. (1999, A22) veränderte der Zusatz faserspaltender Enzyme im Konzentratfutter die Trockenmasseaufnahmen im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht. HOLTSHAUSEN et al. (2011, A10), die faserabbauende Enzyme in verschiedenen Dosierungen dem Futter zusetzten, beschrieben einen Rückgang der Futteraufnahme verglichen mit der Kontrollgruppe bei hoher Dosierung. Im Gegensatz dazu berichteten LEWIS et al. (1999, A17) von einer gestiegenen Trockenmasseaufnahme bei Aufsprühen des mikrobiellen Zusatzes auf TMR.

5.2.2 Milchmengenleistungen und Milchhaltsstoffe

Die meisten biologisch wirkenden Siliermittel zielen darauf ab, durch eine Erhöhung des Besatzes milchsäurebildender Bakterien die pH-Wert-Absenkung der Silage zu unterstützen. Über eine bessere Futterqualität, vornehmlich durch eine Verbesserung des Silierprozesses, soll der wirtschaftliche Gewinn des Betriebszweiges Milcherzeugung für den Landwirt indirekt erhöht werden. Das im Rahmen dieses Versuchs verwendete Siliermittel soll zusätzlich durch einen Voraufschluss der Pflanzenzellwände während des Silierprozesses den mikrobiellen Abbau der Zellwandverbindungen und somit die Verfügbarkeit der Zellinhaltsstoffe verbessern. Die dadurch zusätzlich verfügbare Energie aus dem Grobfutter soll den Anteil

der zur Milchbildung zur Verfügung stehenden Energie und somit die Milchmengenleistung erhöhen.

Die Ergebnisse des vorliegenden Versuches zeigten jedoch keine Erhöhung der Milchmengenleistungen in der Gruppe mit behandelter Grassilage. Einen ökonomischen Vorteil durch eine erhöhte Milchmengenleistung durch den Einsatz des Siliermittels ließ sich durch den hier dargestellten Versuch somit nicht belegen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch zahlreiche andere Studien. ARRIOLA et al. (2011, A1) und PETERS et al. (2010, A19) beobachteten keine Veränderungen in den Milchmengenleistungen durch den Einsatz faserabbauender Enzyme. HOLTSHAUSEN et al. (2011, A10) berichten von einer durch die Enzyme unbeeinflussten Milchmengenleistung sowohl bei niedriger als auch bei erhöhter Enzymkonzentration. Nach KNOWLTON et al. (2002, A12) haben sich die Milchmengenleistungen auch bei verschiedenen Laktationstadien beim Einsatz von Enzymzusätzen nicht verändert. Hingegen beobachteten KUNG et al. (2000, A14) eine erhöhte Milchmengenleistung bei geringerer Enzymdosierung. Die Betrachtung der ECM-Milchmengenleistung führte auch in den Versuchen von LEWIS et al. (1999, A17) und PETERS et al. (2010, A19) zu keinen Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen.

Dasselbe Bild zeigte sich auch bei den Milchinhaltsstoffen. Zwar wies die behandelte Grassilage höhere Essigsäuregehalte auf, da die zelluloseabbauenden Mikroorganismen Essigsäure produzieren, die unter anderem auch zur Milchfettproduktion verwendet wird, jedoch war die Differenz zu gering, um höhere Milchfettgehalte bei den Tieren der Versuchsgruppe mit behandelter Grassilage zu realisieren. Entsprechendes ließ sich auch für den Milchproteingehalt feststellen. Auch dieser hätte theoretisch durch einen erhöhten Nutzungsgrad der Proteine durch eine verbesserte Energieverfügbarkeit erhöht sein können, aber die Unterschiede zwischen den Gruppen waren auch hier zu gering. Die während des Versuchs ermittelten mittleren Laktosegehalte lagen auf einem relativ niedrigen Niveau. Dies kann als Indikator für eine schlechte Eutergesundheit der Tiere gesehen werden, hervorgerufen durch die vielen klinischen Mastitisfälle während des Versuchs. Zwischen den Versuchsgruppen bestand auch bei den Laktosegehalten der Milch keine Differenz.

Auch in anderen Studien, deren Versuchsdetails in Tabelle A1 im Anhang beschrieben werden, zeigte der Einsatz faserspaltender Enzyme oder der sie produzierenden Mikroorganismen keinen nennenswerten Einfluss auf die Milchinhaltsstoffe. So beschrieben

KNOWLTON et al. (2002, A12), die ebenfalls Tiere in frühem Laktationsstadium einsetzten, keinen Einfluss auf die Milchhaltsstoffe bei der Silage, welcher faserspaltende Enzyme zugesetzt wurde, gegenüber der Kontrollgruppe. Auch HOLTSHAUSEN et al. (2011, A10) sowie YANG et al. (2000, A26) konnten keine Beeinflussung der Gehalte der Milchhaltsstoffe feststellen. Jedoch berichteten SUTTON et al. (2003, A23) von konstanten Milchfett- und Laktosegehalten, aber von erhöhten Milchproteingehalten bei Aufsprühen der Enzyme auf TMR, wobei RODE et al. (1999, A22) gesunkene Milchfettprozente beschrieben.

5.2.3 Körperkondition

Die Tiergewichte variierten während des Versuchszeitraums nur in sehr geringem Maße. Somit zeigte sich kein Einfluss des Siliermittels auf die Entwicklung der Körperkondition der Tiere aufgrund erhöhter Energiezufuhr, denn ein Unterschied in den mittleren Lebendmassen der Tiere zwischen den beiden Versuchsgruppen war statistisch nicht abzusichern. Auch in anderen in Tabelle A1 im Anhang näher dargestellten Versuchen führte der Zusatz faserabbauender Enzyme nicht zu Veränderungen bei den Lebendmassen der Tiere (KNOWLTON et al. 2002, A12; KUNG et al. 2000, A14; KUNG et al. 2002, A15).

Entsprechend der Lebendmasseentwicklung zeigte sich auch für den Body-Condition-Score und die Rückenfettdicke ein ähnliches Bild. Bei beiden Kenngrößen waren keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen zu beobachten. Erst bei der Betrachtung der mittleren Daten an den Tagen der Milchleistungsprüfung zeigte sich eine Verbesserung des Body-Condition-Scores zu Gunsten der mit unbehandelter Grassilage gefütterten Gruppe. Allerdings lag der Körperkonditionsvorsprung entgegen der Ausgangshypothese bei der unbehandelten Gruppe. Korrelierend zu den vorliegenden Ergebnissen zeigten auch die Versuche von RODE et al. (1999, A22) sowie YANG et al. (2000, A26) keinen Einfluss des Enzymeinsatzes auf die Entwicklung des Body Condition Score. Dennoch sei an dieser Stelle für den Vergleich mit den zuvor genannten Studien auf die subjektive Beurteilung der Tiere bei der Erfassung des Body-Condition-Scores hingewiesen.

5.3 Nährstoffabbau

5.3.1 Verdauungsversuch mit Milchkühen

Bei der Bewertung des im Rahmen dieses Versuchs durchgeführten Verdauungsversuchs ist ein Einfluss der Tiergesundheit auf die Versuchsergebnisse nicht auszuschließen. Insgesamt wiesen während des Zeitraums des Verdauungsversuchs drei Tiere eine Diarrhoe auf, davon zwei in der Versuchsgruppe und eine in der unbehandelten Gruppe. Die Diarrhoe der Kuh in der Kontrollgruppe entwickelte sich so stark, dass die Daten der Kuh bei der Versuchsauswertung auf Grund extremer Abweichungen herausgenommen wurden. Die Auswertung bezieht sich somit auf drei Tiere in der Kontroll- und vier Tiere in der Versuchsgruppe.

Der Verdauungsversuch hat gezeigt, dass für die Verdaulichkeiten der einzelnen Nährstofffraktionen keine Unterschiede zwischen der Versuchs- und der Kontrollgruppe nachweisbar waren. Die Werte der behandelten Gruppe waren zwar leicht höher als die der unbehandelten, aber die Differenz der Daten war zu gering, als dass sie eine statistisch abzusichernde Differenz zeigten. So wiesen die Daten beider Versuchsgruppen bei den für die Versuchsfragestellung relevanten Kenngrößen NDFom und ADFom keine Unterschiede auf.

Bei den Verdaulichkeiten zeigt der Vergleich mit anderen Publikationen kein einheitliches Bild. Auch hier ist zu beachten, dass diese sich bezüglich Futterration sowie Applikationsart, Dosierung und verwendeten Mikroorganismen (bzw. Enzymen) voneinander unterscheiden. Details zu den einzelnen Studien zeigt Tabelle A1 im Anhang. Die Verdaulichkeit der organischen Masse war bei PETERS et al. (2010, A19) zwischen den Versuchsgruppen identisch, wohingegen bei RODE et al. (1999, A22) und YANG et al. (2000, A26) bereits eine Verbesserung der Verdaulichkeit der organischen Masse bestimmt werden konnte. Ähnliches gilt auch für die Verdaulichkeit der Trockenmasse. Während sie bei LEWIS et al. (1999, A17), PETERS et al. (2010, A19) und YANG et al. (2000, A26) zwischen den Versuchsgruppen nicht variierte, beschrieben ARRIOLA et al. (2011, A1) und RODE et al. (1999, A22) im Vergleich der Versuchsgruppen einen Anstieg der Trockenmasseverdaulichkeit. Bezogen auf die Verdaulichkeiten von NDF und ADF kam es bei RODE et al. (1999, A22) wiederum zu einer deutlichen Steigerung bei der behandelten Gruppe. Auch ARRIOLA et al. (2011, A1)

beschreiben hier eine Erhöhung der NDF- und ADF-Verdaulichkeit. SUTTON et al. (2003, A23) und YANG et al. (2000, A26) konnten eine Erhöhung nur für die NDF belegen. Dagegen zeigte sich bei KNOWLTON et al. (2002, A12) wiederum keine Verbesserung der NDF-Verdaulichkeit durch den Einsatz faserabbauender Enzyme. In den Versuchen von PETERS et al. (2010, A19) konnten weder für die NDF- noch für ADF-Verdaulichkeit Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen manifestiert werden.

5.3.2 Verdauungsversuch mit Hammeln

Der Verdauungsversuch mit Hammeln wurde mit vier Fütterungsgruppen durchgeführt. Eine Versuchsgruppe wurden mit Grassilage, der bei der Ernte faserspaltende Enzyme produzierende Mikroorganismen zugesetzt wurde, eine mit unbehandelter Grassilage, eine mit TMR, die die oben beschriebene Grassilage enthielt, und eine mit TMR mit unbehandelter Grassilage gefüttert. Die TMR für die Hammel war in Zusammensetzung und Enzymgehalt identisch mit der des Verdauungsversuchs mit Milchkühen, um eine Vergleichbarkeit der Versuche gewährleisten zu können. Nur bei alleiniger Fütterung der Grassilage zeigten sich Unterschiede in den Kenngrößen der Faserverdaulichkeit (Rohfaser, NDFom, ADFom) zu Gunsten der mit behandelter Grassilage gefütterten Versuchsgruppe. Die verbesserte Nutzung der Faserkomponenten resultierte in einer verbesserten Energieversorgung der Gruppe, die behandelte Grassilage bekamen. Die Fütterung der mit behandelter Grassilage versetzten TMR ergab dagegen bei den relevanten Kenngrößen nur eine Verbesserung der NDFom und der Energie zu Gunsten der behandelten Gruppe. Somit zeigten sich im Hammelversuch Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen, die im Verdauungsversuch mit Milchkühen nicht in Erscheinung traten.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Verdaulichkeiten bei den Hammeln für die Faserkomponenten höher waren als die der Milchkühe. Es scheint, dass die Hammel anders auf den Enzymzusatz reagiert haben als die Milchkühe. Die genauen Gründe für den mangelnden Effekt beim Verdauungsversuch mit Milchkühen im Vergleich zum Verdauungsversuch mit Hammeln ließen sich nicht ermitteln. Die Versuchsergebnisse könnten auf eine Art „Verdünnungseffekt“ hindeuten, weshalb bei den Hammeln ein deutlicherer Effekt durch den Einsatz des Siliermittels zu beobachten war.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse des Verdauungsversuchs mit Hammeln mit ähnlichen Arbeiten bezüglich des Einsatzes faserspaltender Enzyme zeigt keine einheitlichen Ergebnisse, da die zu Vergleichszwecken herangezogenen Publikationen sich im verwendeten Produkt und der Versuchsdurchführung unterscheiden. Details zu den Studien zeigt Tabelle A1 im Anhang. Im Gegensatz zur verbesserten Verdaulichkeit der Grassilage im vorliegenden Versuch beobachteten GIRALDO et al. (2008, A9) bei Fütterung von Heu keine Einflüsse auf die Verdaulichkeit von NDF und ADF. Die Fütterung von Luzerneheu hingegen führte in den Versuchen von PINOS-RODRIGUEZ et al. (2002, A20) zu einer Zunahme der NDF-Verdaulichkeit bei mit Luzerneheu gefütterten Lämmern. Anders als im vorliegenden Versuch beobachteten die Autoren jedoch keine Veränderungen in der Verdaulichkeit der ADF. YANG et al. (2000, A26) gaben bei einem Verdauungsversuch Schafen eine TMR, auf die das getestete Enzymprodukt vor der Fütterung aufgesprüht wurde. Auch hier zeigten sich keine Unterschiede in den Verdaulichkeiten zwischen der Versuchs- und der Kontrollgruppe. Die Versuche von REDDISH und KUNG (2007, A21) führten ebenfalls zu keinen Verbesserungen der Verdaulichkeit der Faserkomponenten zwischen den Versuchsgruppen.

5.3.3 Nährstoffabbau *in situ*

Mit der *in situ*-Technik kann die ruminale Verdaulichkeit und die Abbaugeschwindigkeit einzelner Futtermittel realitätsnah geschätzt werden (SÜDEKUM 2005) und so die Verdauung von Futtermitteln im Zeitablauf erfasst werden. Dabei werden Futterproben in einem durchlässigen Beutel über einem bestimmten Zeitraum dem Pansenmilieu ausgesetzt. An Hand der so ermittelten Daten kann der ruminale Abbau des untersuchten Futtermittels nachvollzogen werden, was Rückschlüsse auf die Verdaulichkeit der Trockenmasse und der Zellwandbestandteile (über die Kenngrößen NDFom und ADFom) des Futtermittels erlaubt. Im Gegensatz zu Labormethoden ist der Vorteil dieser Methodik, dass sie unmittelbar im Pansen eines lebenden Tieres durchgeführt wird und somit dem Einfluss aller Verdauungsvorgänge unterliegt. Allerdings sind dadurch auch tierindividuelle Abweichungen möglich. Zur Erhöhung der Genauigkeit des geschätzten ruminalen Nährstoffabbaus wurde eine Korrektur um Verluste der kleinen Partikel vorgenommen. Die Bestimmung des Abbaus von behandelter oder unbehandelter Grassilage mittels der *in situ*-Technik kann eine Aussage über Umfang und Geschwindigkeit des ruminalen Nährstoffabbaus liefern (SÜDEKUM 2005).

Die im vorliegenden Versuch ermittelten Daten für die vollständig lösliche Fraktion zeigten einen Unterschied beim Abbau der löslichen Fraktion der Trockenmasse zu Gunsten des Abbaus der Trockenmasse der unbehandelten Silage, der stärker ausgeprägt war als bei der behandelten Silage. Bezogen auf die NDFom und die ADFom ist die lösliche Fraktion definitionsgemäß gleich Null. Der nicht lösliche und potenziell abbaubare Anteil zeigte sowohl für die Trockenmasse wie auch für NDFom und ADFom eine Tendenz zu Gunsten der behandelten Versuchsgruppe, die sich aber nicht statistisch manifestieren ließ. An dieser Stelle sollte auch auf die vergleichsweise hohe Streuung der Daten beim Merkmal Trockenmasse hingewiesen werden.

Die Konstante der Abbaurrate der potenziell abbaubaren Fraktion war für die Trockenmasse identisch. Bezogen auf die Daten von NDFom und ADFom zeigte sich, dass sich anhand der Daten zum prozentualen Abbau pro Stunde kein Unterschied zwischen den beiden Silagen festmachen ließ. Der effektive ruminale Abbau wurde für Passageraten von zwei, vier und sechs Stunden errechnet. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Passagerate zwar der Nährstoffabbau abnahm, aber auch keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen manifestiert werden konnten. Letztlich zeigten sich auch im *in situ*-Versuch keine statistisch relevanten Verbesserungen des Trockenmasse- und Nährstoffabbaus durch das eingesetzte Siliermittel gegenüber der Kontrollsilage.

Besonders für die NDFom und auch für die ADFom wiesen die Daten des *in situ*-Versuchs hohe Zeitspannen zwischen dem Beginn der Inkubation der Proben und dem Beginn des Abbaus auf. Diese Verzögerungszeiten (lag-Phasen) waren sowohl für die Mittelwerte wie auch für die Standardabweichungen erhöht. Die Abweichungen könnten durch Fehler oder Ungenauigkeiten bei der Laborauswertung entstanden sein, wofür die Ausgangsdaten jedoch keine Hinweise liefern. Letztendlich wurde keine Erklärung für die extremen Abweichungen gefunden.

Ein Vergleich der im Rahmen dieses Versuchs ermittelten Daten mit den publizierten Daten in der Literatur ist wegen der unterschiedlichen Produkte, der Applikationsformen, Konzentrationen und abweichender Versuchsgestaltung schwierig, daher sollen hier lediglich die Grundaussagen verglichen werden. Tabelle A1 im Anhang gibt einen Überblick über die hinzugezogene Vergleichsliteratur. YANG et al. (1999, A25) beschrieben einen höheren Abbau der löslichen Fraktion der Trockenmasse bei hoher Enzymkonzentration bei der

behandelten Gruppe gegenüber der Kontrollgruppe. Dieses Ergebnis wurde auch von HRISTOV et al. (1998, A11) bestätigt. In Übereinstimmung mit den im vorliegenden Versuch dargestellten Daten beschrieben KRUEGER et al. (2008, A13) eine Verringerung der löslichen Fraktion im Vergleich zur Kontrollgruppe, wenn das Enzymprodukt dem Futter bei der Ernte zugesetzt wurde, was auch im vorliegenden Versuch der Fall war und ebenso zu einer Verringerung der löslichen Fraktion führte. GALLARDO et al. (2010, A8) führten einen Abbaueversuch mit Luzerneheu durch und beobachteten eine erhöhte Abbaubarkeit der potenziell abbaubaren Fraktion zu Gunsten der behandelten Gruppe. Bei LEWIS et al. (1996, A16) zeigten sich keine Veränderungen im *in situ*-Abbau zwischen behandeltem und unbehandeltem Futter bis 24 Stunden nach Abbaubeginn. In den darauf folgenden 72 Stunden zeigte sich ein verbesserter Abbau der behandelten Silage. Auch FENG et al. (1996, A7) beobachteten bei ihren *in vitro*-Versuchen keinen erhöhten Abbau der Trockenmasse zwischen 24 und 48 Stunden. KRUEGER und ADESOGAN (2007, A14) konnten dagegen bei ihren Untersuchungen der Abbaubarkeit von TM und NDF keine Effekte nach 24 und 96 Stunden beobachten. Die Tatsache, dass sich im vorliegenden *in situ*-Versuch keine weiteren Unterschiede bei den beobachteten Kenngrößen zwischen der Versuchs- und der Kontrollgruppe ergeben haben, wurde in den Studien von ARRIOLA et al. (2011, A1) und HOLTSHAUSEN et al. (2011, A10) bestätigt. DEAN et al. (2007, A6) bestimmten den Einfluss faserabbauender Enzyme auf verschiedene tropische Gräser. Auch bei ihren *in situ*-Versuchen zeigte sich bei keinem der verwendeten Enzyme ein Einfluss auf die Abbaubarkeit. Auch in den Versuchen von BEAUCHEMIN et al. (2000, A2) kam es zu keinen Effekten durch die eingesetzten Enzymprodukte gegenüber der Kontrollgruppe.

Es lässt sich somit festhalten, dass das im vorliegenden Versuch bei Grassilage verwendete Enzymprodukt den ruminalen Abbau der Trockenmasse und der Zellwandbestandteile sowohl in seiner Geschwindigkeit als auch in seinem Ausmaß nicht beeinflusste.

6 Schlussfolgerungen

Die zum Teil verbesserten Verdaulichkeiten im Verdauungsversuch der Hammel bestätigen eine Wirkung des Siliermittels, welches allerdings in den Versuchen mit Milchkühen die relevanten Kenngrößen Futteraufnahme, Milchmengenleistung, Körperkondition und Energiebilanz der Tiere, deren TMR die behandelte Grassilage enthielt, nicht veränderte. Auch im Verdauungsversuch der Milchkühe und im *in situ*-Versuch waren keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen zu beobachten. Der Verdauungsversuch mit Hammeln zeigte Verbesserungen in der Verdaulichkeit von Rohfaser, NDFom, ADFom und im Energiegehalt bei der behandelten Grassilage sowie von Organischer Masse, NDFom und Energiegehalt bei der TMR mit behandelter Grassilage.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Einsatz des untersuchten faserspaltenden Enzymprodukts in der Grassilage keinen Einfluss auf die Leistungs- und Körperkonditionskenngößen sowie die Nährstoffverdaulichkeiten bei Milchkühen hatte. Auch andere Studien kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Letztlich lassen sich unterschiedliche Erklärungsansätze für die zuvor beschriebenen Versuchsergebnisse aufführen:

- 1) Da sich in den Versuchen mit Milchkühen im Vergleich zum Verdauungsversuch mit Hammeln keine Verbesserungen zeigten, könnte es zu einer Art „Verdünnungseffekt“ gekommen sein, wodurch der Effekt des Siliermittels bei den Kühen nicht in erforderlichem Maße zur Ausprägung kam. Interessant wären hier Ergebnisse eines Versuchs mit noch höheren Anteilen behandelter Grassilage in der TMR und einem längeren Beobachtungszeitraum.
- 2) Die für die Versuchsfragestellung relevanten Kenngrößen NDFom und ADFom waren im Verdauungsversuch mit Hammeln bei der behandelten Grassilage verbessert, in der TMR existierte eine Verbesserung nur bei NDFom, was auf eine erhöhte Abbaubarkeit der Hemizellulosen hindeutet.
- 3) Das der Ausgangshypothese entsprechende höhere Energielieferungsvermögen der TMR mit behandelter Grassilage ließ sich in den Kuhversuchen nicht belegen. Somit stand nicht genügend zusätzliche Energie zur Verfügung, um das Leistungsvermögen der Tiere zu verbessern.

- 4) Auch gilt es bei der Bewertung zu berücksichtigen, dass die im vorliegenden Versuch und in den aufgezeigten Vergleichsstudien verwendeten Enzymprodukte nicht identisch waren. Unterschiedliche Mischungen faserspaltender Enzyme wirken höchst verschieden auf die jeweiligen Substrate ein und unterscheiden sich in ihrem Abbaupotenzial (COLOMBATTO et al. 2003c). Auch weisen sie unterschiedliche ruminale Stabilitäten auf (MORGAVI et al. 2000b), was eine weitere Erklärung für die unterschiedlichen Versuchsergebnisse zwischen Milchkühen und Hammeln sein kann.
- 5) Ein weiterer Einfluss auf die Wirksamkeit des Siliermittels könnte vom Reifestadium der Grassilage ausgegangen sein. Hier handelte es sich um Grassilage vom ersten Schnitt, die zu einem frühen Zeitpunkt geerntet wurde. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen könnte ermittelt werden, ob das Siliermittel bei einem höheren physiologischen Reifegrad deutlichere Effekte zeigt.
- 6) Ein schwer einschätzbarer Faktor ist die Grassilagequalität. Die Silagen waren an den Randbereichen teilweise nach dem Öffnen von Schimmel befallen und warm. Obwohl diese Bereiche, soweit visuell erkennbar, nicht verfüttert wurden, lässt sich ein Einfluss auf die TMR und die Futteraufnahme nicht a priori ausschließen. Dennoch sollte die Konzentration an Schimmel und warmer Silage in der TMR zu gering gewesen sein, um auf das Versuchsergebnis einzuwirken. Zudem waren beide Silagen und somit auch beide Versuchsgruppen ähnlich stark davon betroffen. Auch ist ein Einfluss auf die Wirkung der Enzyme unwahrscheinlich, da die Enzymwirkung hauptsächlich während der Lagerzeit stattfand, Schimmel und Nacherwärmung jedoch nach Öffnung an den Randbereichen der Silomieten auftraten.

ANHANG

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|----------------------|-----------------------------|--|
| A1 | ARRIOLA et al. (2011) | Versuch mit Milchkühen mit niedrigem oder hohem Anteil Konzentrat an der Ration (18 oder 33 % der TM ¹), jeweils mit und ohne Enzymzusatz, der mit 3,1 mg Enzym/g TM auf die TMR ² gesprüht wurde. Zudem wurde der ruminale Abbau <i>in situ</i> bestimmt. Das getestete Enzym war aufbereitet von einem Stamm <i>Trichodema longibrachiatum</i> . |
| A2 | BEAUCHEMIN et al. (2000) | Versuch mit Milchkühen mit im Mittel 84 Laktationstagen. Es wurde eine niedrige Konzentration von 1,22 oder eine höhere Konzentration von 3,67 ml Enzymprodukt/kg TM der TMR zugesetzt sowie ein <i>in situ</i> -Versuch durchgeführt. Das verwendete Enzymprodukt (Natugrain-33-L, BASF Corporation, Ludwigshafen, Deutschland) enthielt vornehmlich β -Glukanasen, Xylanasen und Endozellulasen. |
| A3 | BOWMAN et al. (2002) | Milchkühe mit im Mittel 111 Laktationstagen wurden mit 1 g des Enzymprodukts in der TMR pro Kuh und Tag gefüttert, entweder im Konzentratfutter, im Ergänzungsfutter oder in der Vormischung. Das Enzymprodukt (Promote N.E.T., Agribands International, St. Louis, MO, USA) bestand aus Xylanasen und Zellulasen. |
| A4 | BOWMAN et al. (2003) | Versuch mit Kühen in erster (im Mittel 134 Laktationstage) sowie in zweiter Laktation (im Mittel 128 Laktationstage). Jede Kuh bekam 1 g des Enzymprodukts in der TMR pro Tag, entweder im Konzentratfutter, im Ergänzungsfutter oder in der Vormischung. Das Enzymprodukt (Promote N.E.T., Agribands International, St. Louis, MO, USA) bestand hauptsächlich aus Xylanasen und Zellulasen. |

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen (Fortsetzung)

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|---------------|------------------------|--|
| A5 | COLOMBATTO et al. 2007 | <p>Im ersten Versuch wurden Luzernestängel mit Enzymkonzentrationen von 0,51, 1,02, 2,55, 5,1 und 25,5 µl/g Futter-TM¹ eingesetzt. Das Enzymprodukt war Liquicell 2500, L, Specialty Enzymes and Biochemicals, Fresno, CA, USA. Die Auswirkungen wurden <i>in vivo</i> beobachtet.</p> <p>In einem zweiten Versuch wurden Luzernestängel, ein Puffermedium und Pansenflüssigkeit mit 0, 4,2, 8,2 und 12,6 g in einen Fermentationskessel gefüllt. Vor der Inkubation wurden 0,51 µl/g Futter-TM¹ des Enzyms hinzugegeben und nach 6, 12, 18, 24, 48 und 96 Stunden analysiert.</p> |
| A6 | DEAN et al. (2007) | <p>In Versuch 1 wurde die Zusammensetzung <i>in vivo</i> und die Verdaulichkeit <i>in situ</i> eines Enzymprodukts (Promote, Cargill, Minnetonka, MN, USA) bestimmt. Die Konzentration betrug 0,65, 1,3 und 2,6 g/kg TM Futter. Das Enzymprodukt wurde aufgesprüht und drei Wochen in Plastikbeuteln gelagert.</p> <p>In Versuch 2 wurden die Enzymprodukte CA mit 89, 178 und 356 mg/kg TM sowie Biocellulase X-20 und Biocellulase A-20 mit 73, 15 und 29 mg/kg TM (alle Loders Croklaan, Channahon, IL, USA) wie in Versuch 1 verwendet.</p> |
| A7 | FENG et al. (1996) | <p>In <i>in situ</i>- und <i>in vivo</i>-Untersuchungen wurden mit zellwandabbauenden Enzymen (Finn-Feeds International, Marlborough, Wiltshire, UK) durchgeführt. Sie verwendeten die hauptsächlich aus Zellulasen und Xylanasen bestehenden Produkte Alphazym, Grasszyme und eine 50 : 50-Kombination. Diese wurden den Versuchsproben in geringer (2,1 ml/kg TM) oder in hoher Konzentration (5,26 ml/kg TM) zugesetzt.</p> <p>Beim Fütterungsversuch an Ochsen mit ruminalen Kanülen wurden die Enzymprodukte auf Heu, angewelktes oder frisches Gras in geringer (2,1 ml/kg TM) oder in hoher Konzentration (5,26 ml/kg TM) gesprüht.</p> |

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen (Fortsetzung)

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|----------------------|---------------------------|---|
| A8 | GALLARDO et al. (2010) | Der <i>in sacco</i> -Versuch wurde mit vier Ochsen durchgeführt, um den Effekt von 3 g/kg TM des Produkts (Fibrozyme, Alltech Inc., Nicholasvill, KY, USA) auf den Abbau von TM, NDF ³ und ADF ⁴ für Luzerneheu zu untersuchen. |
| A9 | GIRALDO et al. (2008) | Im Versuch wurde Schafen ein hauptsächlich Endoglukanasen und Xylanasen enthaltendes Enzymprodukt (Fibrozyme, Alltech Inc., Nicholasvill, KY, USA) mit 12g/Tier und Tag unmittelbar vor der Fütterung durch eine Kanüle direkt in den Rumen appliziert. |
| A10 | HOLTSHAUSEN et al. (2011) | Der <i>in vivo</i> -Fermentationsversuch wurde mit Luzerneheu, Luzernesilage und Pansenflüssigkeit durchgeführt. Der Enzymzusatz (Econase RDE, AB Vista, Marlborough, UK) wurde auf das Substrat in den Probebeuteln appliziert mit einer Konzentration von 0,5, 1,0, 1,5 und 2,0 µl/g Substrat-TM. Der <i>in situ</i> -Abbauversuch wurde mit Milchkühen (im Mittel 120 Laktationstage) durchgeführt, deren TMR sowie die Probebeutel mit 1,0 ml des Produkts/kg TM versetzt waren. Die Probebeutel verblieben 21 Stunden in den Tieren. Der Laktationsversuch wurde mit Kühen in verschiedener Laktationszahl durchgeführt, die im Mittel 16 Laktationstage aufwiesen. Das Enzymprodukt wurde mit geringer (0,5 ml/kg TMR-TM) und hoher Konzentration (1,0 ml/kg TMR-TM) eingesetzt. |
| A11 | HRISTOV et al. (1998) | Der Abbauversuch wurde mit vier Färsen der Rasse Angus durchgeführt, um den Effekt der verwendeten Enzymmischung (Finn-Feeds International, Marlborough, Wiltshire, UK) für TMR zu untersuchen. |
| A12 | KNOWLTON et al. (2002) | Versuch mit Milchkühen in frühem (im Mittel 30 Laktationstage) und spätem (im Mittel 194 Laktationstage) Laktationsstadium. Das Enzymprodukt von Loveland Industries (Greeley, CO, USA) weist vornehmlich Zellulasen auf und wurde über Maiskörner der TMR ² mit 0,2 g/kg TM zugesetzt.) |

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen (Fortsetzung)

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|----------------------|-----------------------------|--|
| A13 | KRUEGER et al. (2008) | Im Versuch wurden unterschiedliche Applikationsmethoden des Enzymprodukts (Biocellulase A20, Loders Croklaan, Channahonn, IL, USA) bei Bermudagrass-Heu verglichen. Der Abbau der Trockenmasse wurde <i>in situ</i> bestimmt. |
| A14 | KRUEGER und ADESOGAN (2007) | Der Versuch wurde mit verschiedenen Enzymmischungen (5 g/kg TM) <i>in vitro</i> für Heu durchgeführt. Beobachtet wurde der Abbau der TM und der NDF. |
| A14 | KUNG et al. (2000) | Der Versuch wurde mit laktierenden Kühen mit im Mittel 100 Laktationstagen untersucht. Auf die TMR aus Mais und Luzerneheu wurden verschiedene Enzymkombinationen aus Zellulasen und Xylanasen in geringer (2,0 ml/kg Futter-TM) und hoher (5,0 ml/kg Futter-TM) Konzentration aufgesprüht. Im zweiten Jahr war die TMR nahezu identisch. Die Kühe wiesen im Mittel 112 Laktationstage auf und der Enzymzusatz wurde variiert. Die Enzymprodukte wurden von einem Stamm <i>Trichodema longibrachiatum</i> gewonnen (Finn-Feeds International, Marlborough, Wiltshire, UK). |
| A15 | KUNG et al. (2002) | Verschiedene Enzymkombinationen wurden während des Mischvorgangs auf das Futter gesprüht. Eine Gruppe bekam eine Kombination aus Zellulase D und Sultanasen B, eine weitere Zellulase D und Xylanase C. |
| A16 | LEWIS et al. (1996) | Im Fütterungsversuch mit Ochsen wurden die Enzyme, hauptsächlich Zellulasen und Xylanasen, in einer Konzentration von 1.65 ml/kg Futter-TM entweder 24 Stunden vor der Fütterung oder unmittelbar vor der Fütterung der Ration oder des Strohs auf das jeweilige Futter gesprüht oder zwei Stunden nach der Fütterung ruminal zugeführt. Zudem wurde der ruminale Abbau <i>in situ</i> bestimmt. Das verwendete Produkt war Grasszyme (Finn-Feeds International, Marlborough, Wiltshire, UK) |

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen (Fortsetzung)

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|----------------------|-------------------------------|---|
| A17 | LEWIS et al. (1999) | Versuch mit Milchkühen in mittlerem Laktationsstadium (213 Laktationstage). Gefüttert wurde eine TMR, auf die 8 - 24 Stunden vor der Fütterung 1,65 ml/kg Futter-TM ¹ des Enzymprodukts (Cornzyme, Finn-Feeds International, Marlborough, Wiltshire, UK), das hauptsächlich Zellulasen und Xylanasen enthält, gesprüht wurde. In einem zweiten Versuch wurde mit frischlaktierenden Kühen die Enzymkonzentration variiert mit 1,25, 2,5 oder 5,0 ml/kg Futter-TM. Das Enzymprodukt war eine 2 : 1 -Kombination aus Zellulasen und Xylanasen. |
| A18 | NSEREKO et al. (2008) | Nahezu 10.000 isolierte Kulturen an Milchsäurebakterien (Pioneer Hi-Breed Int., Johnston, IA, USA) wurden auf ihre Fähigkeit zur Produktion von Ferulat-Esterase getestet. Dem geernteten Gras wurden 1×10^5 koloniebildende Einheiten/g Frischmasse <i>L. buchneri</i> PTA 6138 zugesetzt. Anschließend wurden 1,36 kg des Futters zur Silierung in Plastikbeuteln für 30 Tage vakuumverpackt. |
| A19 | PETERS et al. (2010) | Versuch mit Milchkühen, die im Mittel 98 Laktationstage aufwiesen. Das Enzymprodukt (Roxazyme G2, DSM Nutritional Products, Ltd, Basel, Switzerland) bestand hauptsächlich aus Xylanasen und Zellulasen und wurde der TMR mit 6,2 ml/kg TMR-TM vor der Fütterung zugesetzt. |
| A20 | PINOS-RODRIGUEZ et al. (2002) | Schafe wurden in einer Ration entweder mit Heu oder in einer zweiten Ration mit Luzerneheu gefüttert. Bei der morgentlichen Fütterung wurden 5 g des Enzymprodukts durch eine Kanüle zugeführt (Fibrozyme, Alltech Inc., Nicholasvill, KY, USA). |
| A21 | REDDISH und KUNG (2007) | Es wurde ein Verdauungsversuch mit einem hauptsächlich Xylanasen und Zellulasen enthaltenden Enzymprodukt (Alltech Inc., Nicholasvill, KY, USA) durchgeführt, das mit 4 g pro Lamm und Tag dem Futter zugesetzt wurde. |

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen (Fortsetzung)

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|----------------------|-----------------------|--|
| A22 | RODE et al. (1999) | Versuch mit Milchkühen in frühem Laktationsstadium. Das verwendete Enzym (Pro-Mote, Biovance Technol. Inc., Omaha, NE, USA) wurde dem Konzentratfutter mit 1,3 g/kg TMR-TM beigefügt. Es bestand hauptsächlich aus Xylanasen und Zellulasen. |
| A23 | SUTTON et al. (2003) | Versuch mit Milchkühen (28 - 56 Laktationstage), denen der Enzymzusatz mit 2 g/kg TM eine Stunde vor der Fütterung auf die TMR oder einen Tag vor der Fütterung auf das Konzentratfutter gesprüht oder eine Stunde vor der Fütterung direkt in den Rumen appliziert wurde. Das Enzymprodukt (Biovance Technol. Inc., Omaha, NE, USA) aus Xylanasen und Endoglukanasen wurde aus <i>Trichodema longibrachiatum</i> gewonnen |
| A24 | THAYSEN et al. (2007) | Behandlung von Grasaufwüchsen in Fermentations- und Verdauungsversuchen mit einem <i>L. buchneri</i> PTA 6138 enthaltenen Enzymprodukt (X11G27, Pioneer Hi-Breed Int., Johnston, IA, USA). |
| A25 | YANG et al. (1999) | Es wurde ein Fütterungsversuch mit Milchkühen, ein Verdauungsversuch mit Milchkühen und ein <i>in situ</i> -Versuch an Kühen mit ruminaler und duodenaler Kanüle durchgeführt. Die Kühe bekamen dieselbe TMR mit Luzerneheu, aber über die Kanüle entweder 0 g, 1 g Enzymprodukt/kg Heu (geringe Konzentration) oder 2 g Enzymprodukt/kg Heu (hohe Konzentration) oder 1 g Enzymprodukt/kg Heu plus 1 g Enzymprodukt/kg Konzentratfutter-TM ¹ . Das verwendete Produkt war Pro-Mote (Biovance Technol. Inc., Omaha, NE, USA), hauptsächlich mit Xylanasen und Zellulasen. |

Tabelle A 1: Kurzdarstellung der hinzugezogenen Vergleichsarbeiten einschließlich ihrer Kennzeichnung im Text und ihrer Quellen (Fortsetzung)

| Kennzeichnung | Quelle | Kurzdarstellung des Versuchs |
|---------------|--------------------|---|
| A26 | YANG et al. (2000) | <p>Versuch mit Milchkühen in frühem Laktationsstadium (21 Laktationstage). Der Enzymzusatz wurde vor der Fütterung auf die TMR² gesprüht (50 mg/kg TMR²-TM¹) oder dem Konzentratfutter beigefügt. Das Enzymprodukt (Biovance Technol. Inc., Omaha, NE, USA) wies eine hohe Xylanase- und geringe Zellulase-Aktivität auf und wurde aus einem Stamm <i>Trichoderma longibrachiatum</i> gewonnen.</p> <p>Bei einem Verdauungsversuch mit Schafen wurde das oben beschriebene Produkt der TMR² hinzugefügt</p> |

¹ TM: Trockenmasse

² TMR: Gesamt-Misch-Ration (total-mixed-ration)

³ NDF: Neutral-Detergenzienfaser

⁴ ADF: Säure-Detergenzienfaser

LITERATURVERZEICHNIS

- Adesogan, A. T. (2005): Improving forage quality and animal performance with fibrolytic enzymes; Ruminant Nutrition Symposium 2005 des Institute of Food and Agricultural Sciences der University of Florida, Gainesville, 91-109
Online im Internet: URL: <http://dairy.ifas.ufl.edu/files/rns/2005/Adesogan.pdf>
Zuletzt am 26.01.2008
- Akin, D. E.; Burdick, D.; Michaels, G. E. (1974): Rumen bacterial interrelationships with plant tissue during degradation revealed by transmission electron microscopy; *Appl. Environ. Microbiol.*, 27, 1149-1156
- Akin, D. E.; Rigsby, L. L. (1987): Mixed fungal populations and lignocellulosic tissue degradation in the bovine rumen; *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 1987-1995
- Åman, P. (1993): Composition and structure of cell wall polysaccharides in forages
In: Jung, H. G.; Buxton, D. R.; Hatfield, R. D.; Ralph, J. (Hrsg.): Forage cell wall structure and digestibility; ASA-CSSA-SSSA, Madison, 183-199
- Arriola, K. G.; Klim, S. C., Staples, C. R., Adesogan, A. T. (2011): Effect of fibrolytic enzyme application to low- and high-concentrate diets on the performance of lactating dairy cattle; *J. Dairy Sci.*, 94, 832-841
- Baird, G. D. (1982): Primary ketosis in the high-producing dairy cow: clinical and subclinical disorders, treatment, prevention and outlook; *J. Dairy Sci.*, 65, 1-10
- Banos, G.; Coffey, M. P.; Brotherstone, S. (2005): Modeling daily energy balance of dairy cows in the first three lactations; *J. Dairy Sci.*, 88, 2226-2237
- Bauman, D. E.; Currie, W. B. (1980): Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation - A review of mechanism involving homeostasis and homeorhesis; *J. Dairy Sci.*, 63, 1514-1529
- Beauchemin, K. A.; Colombatto, D.; Morgavi, D. P.; Yang, W. Z. (2003): Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilisation by ruminants; *J. Anim. Sci.*, 82, Suppl. 2, E37-E47
- Beauchemin, K. A.; Rode, L. M.; Maekawa, M.; Morgavi, D. P.; Kampen, R. (2000): Evaluation of a nonstarch polysaccharidase feed enzyme in dairy cow diets; *J. Dairy Sci.*, 83, 543 - 553

- Bidlack, J.; Malone, M.; Benson, R. (1992): Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants; *Proc. Okla. Acad. Sci.*, 72, 51-56
- Blum, D. L.; Kataeva, I. A.; Li, X. - L.; Ljungdahl, L. G. (2000): Feruloyl Esterase activity of the clostridium thermocellum cellosome can be attributed to previously unknown domains of XynY and XynZ; *Bacteriol.*, 182, 1346-1351
- Bostedt, H. (2006): Fruchtbarkeitsmanagement beim Rind; 5. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 315-321
- Bowman, G. R.; Beauchemin, K. A.; Shelford, J. A. (2002): The proportion of the diet to which fibrolytic enzymes are added affects nutrient digestion by lactating dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 85, 3420-3429
- Bowman, G. R.; Beauchemin, K. A.; Shelford, J. A. (2003): Fibrolytic enzymes and parity effects on feeding behaviour, salivation and ruminal pH of lactating dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 86, 565-575
- Braune, W.; Leman, A.; Taubert, H. (2007): Pflanzenanatomisches Praktikum I; 9. Auflage, Spektrum Verlag, Heidelberg, 43-49
- Breves, G.; Leonhard-Marek, S. (2005): Verdauungsvorgänge in den Vormägen; In: Von Engelhardt, W.; Breves, G. (Hrsg.): *Physiologie der Haustiere*, Zweite Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, 357-366
- Butler, W. R. (2003): Energy balance relationships with follicular development, ovulation and fertility in postpartum dairy cows; *Livestock Production Science*, 83, 211-218
- Butler, W. R., Everett, R. W.; Coppock, C. E. (1981): The relationships between energy balance, milk production and ovulation in postpartum Holstein cows; *J. Anim. Sci.*, 53, 742-748
- Butler, W. R., Smith, R. D. (1989): Interrelationships between energy balance and postpartum reproductive function in dairy cattle; *J. Dairy Sci.*, 72, 767-783
- Buxton, D. R.; Redfearn, D. D. (1997): Plant limitations to fiber digestion and utilization; *J. Nutr.*, 127, 814-818
- Chesson, A.; Forsberg, C. W. (1988): Polysaccharide degradation by rumen microorganism In: Hobson, P. N.; Stewart, C. S. (Hrsg.): *The rumen microbial ecosystem*; 1. Aufl., Elsevier Applied Science, London, New York, 251-284
- Coffey, M. P.; Simm, G.; Brotherstone, S. (2002): Energy balance profiles for the first three lactations of dairy cows estimated using random regression; *J. Dairy Sci.*, 85, 2669-2678

- Collard, B. L.; Boettcher, P.J.; Dekkers, J. C. M.; Petitclerc, D.; Schaeffer, L. R. (2000): Relationships between energy balance and health trails of dairy cattle in early lactation; *J. Dairy Sci.*, 83, 2683-2690
- Colombatto, C. Beauchemin, K. A. (2003): A proposed methodology to standadize the determination of enzymic activities present in enzyme additives used in ruminant diets; *Can. J. Anim. Sci.*, 83, 550-569
- Colombatto, D.; Hervás, G.; Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A. (2003a): Effects of enzyme supplementation of a total mixed ration on microbial fermentation in continous culture, maintained at high and low pH; *J. Anim. Sci.*, 81, 2617-2627
- Colombatto, D.; Mould, F. L.; Bhat, M. K.; Morgavi, D. P.; Beauchemin, K. A.; Owen, E. (2003b): Influence of fibrolytic enzymes on the hydrolysis and fermentation of pure cellulose and xylan by mixed ruminal microorganisms in vitro; *J. Anim. Sci.*, 81, 1040-1050
- Colombatto, D.; Mould, F. L.; Bhat, M. K.; Owen, E. (2003c): Use of fibrolytic enzymes to improve the nutritive value of ruminant diets. A biochemical and in vitro rumen degradation assessment; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 107, 201-209
- Colombatto, D.; Mould, F. L.; Bhat, M. K.; Owen, E. (2007): Influence of exogenous fibrolytic enzyme level and incubation pH on the in vitro ruminal fermentation of alfalfa stems; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 137, 150-162
- Coppock, C. E. (1985): Energy nutrition and metabolism of the lactating dairy cow; *J. Dairy Sci.*, 68, 3403-3410
- Cornu, A.; Besle, J. M.; Mosoni, P.; Grenet, E. (1994): Lignin-carbohydrate complexes in forages: structure and consequences in the ruminal degradation of cell-wall carbohydrates; *Reprod. Nutr. Dev.*, 34, 385-398
- Dean, D. B.; Adesogan, A. T.; Krueger, N.; Littell, R. C. (2005): Effect of fibrolytic enzymes on the fermentation of bermudagrass silage; *J. Dairy Sci.*, 88, 994-1003
- Dean, D. B.; Adesogan, A. T.; Krueger, N.; Littell, R. C. (2007): Effects of treatment with ammonia or fibrolytic enzymes on chemical composition and ruminal degradability of hays produced from tropical grasses; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 145, 68-83
- De Boever, J. L.; De Smet, A.; De Brabander, D. L.; Boucque, C. V (1993): Evaluation of Physical Structure, 1. Grass Silage ; *J. Dairy Sci.*, 76, 140-153
- De Vries, M. J.; Van der Beek, S.; Kaal-Lansbergen, L. M. T. E.; Ouweltjes, W.; Wilmink, J. B. M. (1999): Modeling of energy balance in early lactation and the effect of energy deficits in early lactation on first detecting estrus postpartum in dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 82, 1927-1934

- De Vries, M. J.; Veerkamp, R. F. (2000): Energy balance of dairy cattle in relation to milk production variables and fertility; *J. Dairy Sci.*, 83, 62-69
- Diekman, M. A.; Green, M. L. (1992): Mycotoxins and reproduction in domestic livestock; *J. Anim. Sci.*, 70, 1615-1627
- Dirksen, G. (1973): Mikroorganismen und Störungen der Pansenfunktion; In: Giesecke, D.; Henderickx, H. K. (Hrsg.): *Biologie und Biochemie der mikrobiellen Verdauung*, BLV Verlagsgesellschaft, München, Bern, Wien, 256-275
- Donaghy, J. A.; Bronnenmeier, K.; Soto-Kelly, P. F., McKay, A. M. (2000): Purification and characterization of an extracellular feruloyl esterase from the thermophilic anaerobe *Clostridium stercorarium*; *Appl. Microbiol.*, 88, 458-466
- Drackley, J. K. (1999): Biology of dairy cows during the transition period: the final frontier?; *J. Dairy Sci.*, 82, 2259-2273
- Eun, J.-S.; Beauchemin, K. A. (2007): Enhancing in vitro degradation of alfalfa hay and corn silage using feed enzymes; *J. Dairy Sci.*, 90, 2839-2851
- Eun, J.-S.; Beauchemin, K. A.; Schulze, H. (2007): Use of exogenous fibrolytic enzymes to enhance in vitro fermentation of alfalfa hay and corn silage; *J. Dairy Sci.*, 90, 1440-1451
- Feng, P.; Hunt, C. W.; Pritchard, G. T.; Julien, W. E. (1996): Effects of enzyme preparations on in situ and in vitro degradation and in vitro digestive characteristics of mature cool-season grass forage in beef steers; *J. Anim. Sci.*, 74, 1349-1357
- Franz, G. (1991): Polysaccharide: Eine Einführung; In: Franz, G. (Hrsg.): *Polysaccharide*; Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1-15
- Gallardo, I.; Bárcena, R.; Pinos-Rodríguez, J. M.; Cobos, M.; Carreón, L.; Ortega, M. E. (2010): Influence of exogenous fibrolytic enzymes on in vitro and in sacco degradation of forages for ruminants; *Ital. J. Anim. Sci.*, 8, 34-38
- Galyean, M. L.; Goetsch, A. L. (1993): Utilization of forage fiber by ruminants In: Jung, H. G.; Buxton, D. R.; Hatfield, R. D.; Ralph, J. (Hrsg.): *Forage cell wall structure and digestibility*; ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 33-71
- Gasteiner, J. (2000): Ketose, die bedeutendste Stoffwechselerkrankung der Milchkuh; *Schrift zur 27. Viehwirtschaftliche Fachtagung (6. - 8. Juni 2000) der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, Österreich*, 11-18
- Giraldo, L. A.; Tejido, M. L.; Ranilla, M. J.; Ramos, S.; Carro, M. D. (2008): Influence of direct-fed fibrolytic enzymes on a diet digestibility and ruminal activity in sheep fed a grass hay-based diet; *J. Anim. Sci.*, 86, 1617-1623

- Grabber, J. H. (2005): How do lignin composition, structure and cross-linking affect degradability; *Crop Science*, 45, 13-16
- Grummer, R. R. (1995): Impact of changes in organic nutrient metabolism on feeding the transition dairy cow; *J. Anim. Sci.*, 73, 2820-2833
- Guidon, D. (1990): Anforderungen an Enzyme aus futtermittelrechtlicher Sicht
In: ETH-Zürich (Hrsg.): *Enzyme in der Tierernährung*; Schriftenreihe aus dem Institut für Nutztierwissenschaften, Gruppe Ernährung, Heft 3, ETH, Zürich, Schweiz, 39-43
- Harrison, R. O.; Ford, S. P.; Young, J. W.; Conley, A. J.; Freeman, A. E. (1990): Increased milk production versus reproductive and energy status of high producing dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 73, 2749-2758
- Hatfield, R. D. (1989): Structural polysaccharides in forages and their digestibility; *Agron. J.*, 81, 39-46
- Hespell, R. B.; Whitehead, T. R. (1990): Physiology and genetics of xylan degradation by gastrointestinal tract bacteria; *J. Dairy Sci.*, 73, 3013-3022
- Hoffmann, L. (1996): Energieverwertung und Energiebedarf
In: Bergner, H.; Hoffmann, L. (Hrsg.): *Bioenergetik und Stoffproduktion landwirtschaftlicher Nutztiere*; Harwood Academic Publishers, Chur, Schweiz, 189-335
- Hofrichter, M. (2000): Mangan-Peroxidasen: Enzymatische Verbrennung von Lignin; *Biospectrum*, 6, No 3, 198-199
- Holtshausen, L.; Chung, Y. - H.; Gerardo-Cuervo, H.; Oba, M.; Beauchemin, K. A. (2011): Improved milk production efficiency in early lactation dairy cattle with dietary addition of a developmental fibrolytic enzyme additive; *J. Dairy Sci.*, 94, 899-907
- Hristov, A. N.; McAllister, T. A.; Cheng, K.-J. (1998): Effect of dietary or abomasal supplementation of exogenous polysaccharide-degrading enzymes on rumen fermentation and nutrient digestibility; *J. Anim. Sci.*, 76, 3146-3156
- Hristov, A. N.; McAllister, T. A.; Cheng, K.-J. (2000): Intraruminal supplementation with increasing levels of exogenous polysaccharide-degrading enzymes: Effects on nutrient digestion in cattle fed a barley grain diet; *J. Anim. Sci.*, 78, 477-487
- Hungate, R. E. (1988): The ruminant and the rumen
In: Hobson, P. N.; Stewart, C. S. (Hrsg.): *The rumen microbial ecosystem*; 1. Auflage, Elsevier Applied Science, London, New York, 1-19

- Jung, H. G. (1989): Forage lignins and their effects on fiber digestibility; *Agron. J.*, 81, 33-38
- Jung, H. G. (1997): Analysis of forage fiber and cell walls in ruminant nutrition; *J. Nutr.*, 127, 810S-813S
- Jung, H. G.; Allen, M. S. (1995): Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants; *J. Anim. Sci.*, 73, 2774-2790
- Jung, H. G.; Vogel, K. P. (1986): Influence of lignin on digestibility of forage cell wall material; *J. Anim. Sci.*, 62, 1703-1712
- Kaiser, E (2006): Beurteilung der Gärqualität; In: Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung; 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 42-48
- Kertz, A. F.; Reutzel, L. F.; Thomson, G. M. (1991): Dry matter intake from parturition to midlactation; *J. Dairy Sci.*, 74, 2290-2295
- Knowlton, K. F.; McKinney, J. M.; Cobb, C. (2002): Effect of a direct-fed fibrolytic enzyme formulation on nutrient intake, partitioning, and excretion in early and late lactating holstein cows; *J. Dairy Sci.*, 85, 3328-3335
- Krueger, N. A.; Adesogan, A. T. (2007): Effects of different mixtures of fibrolytic enzymes on digestion and fermentation of bahiagrass hay; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 145, 68-83
- Krueger, N. A.; Adesogan, A. T.; Staples, C. R.; Krueger, W. K.; Dean, D. B.; Littell, R. C. (2007): The potential to increase digestibility of tropical grasses with a fungal, ferulic acid esterase enzyme preparation; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 145, 95-108
- Krueger, N. A.; Adesogan, A. T.; Staples, C. R.; Krueger, W. K.; Kim, S. C.; Littell, R. C., Sollenberger, L. E. (2007): Effect of method of applying fibrolytic enzymes or ammonia to Bermudagrass hay on feed intake, digestion, and growth of beef steers; *J. Anim. Sci.*, 86, 882-889
- Kull, U. (2000): Grundriss der allgemeinen Botanik; 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 70-79
- Kung, L., J.; Cohen, M. A.; Rode, L. M.; Treacher, R. J. (2002): The effect of fibrolytic enzymes sprayed onto forages and fed in a total mixed ration to lactating dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 85, 2396-2402
- Kung, L. J.; Treacher, R. J., Naumann, G. A.; Smagala, A. M.; Endres, K. M.; Cohen, M. A. (2000): The effect of treating forages with fibrolytic enzymes on its nutritive value and lactation performance of dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 83, 115-122

- Lewis, G. E.; Hunt, C. W.; Sanchez, W. K.; Treacher, R.; Pritchard, G. T.; Feng, P. (1996): Effect of direct-fed fibrolytic enzymes on the digestive characteristics of a forage-based diet fed to beef steers; *J. Anim. Sci.*, 74, 3020-3028
- Lewis, G. E.; Sanchez, W. K.; Hunt, C. W.; Guy, M. A.; Pritchard, G. T.; Swanson, B. I.; Treacher, R. J. (1999): Effect of direct-fed fibrolytic enzymes on the lactational performance of dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 82, 611-617
- McAllister, T.A.; Bae, H.D.; Jones, G.A.; Cheng, K.J. (1994): Microbial attachment and feed digestion in the rumen; *J. Anim. Sci.*, 72, 3004-3018
- McAllister, T. A.; Hristov, A. N.; Beauchemin, K. A.; Rode, L. M.; Cheng, K. J. (2001): Enzymes in ruminant diets; In: Bedford, M. R., Partridge, G. G. (Hrsg.): *Enzymes in farm animal nutrition*; CABI–Publishing, Wallingford, New York, USA, 270-298
- Mc Donald, I. (1981): A revised model for the estimation of protein degradability in the rumen, *J. Agric. Sci. Camb.*, 96, 251-252
- Mital, B. K.; Shallenberger, R. S.; Steinkraus, K. H. (1973): α -Galactosidase activity of *Lactobacilli*; *Appl. Environ. Microbiol.*, 26, 783-788
- Morgavi, D. P.; Beauchemin, K. A.; Nsereko, V. L.; Rode, L. M.; Iwaasa, A. D.; Yang, W. Z.; McAllister, T. A.; Wang, Y. (2000a): Synergy between ruminal fibrolytic enzymes and enzymes from *trichoderma longibrachiatum*; *J. Dairy Sci.*, 83, 1310-1321
- Morgavi, D. P.; Newbold, C. J.; Beaver, D. E.; Wallace, R. J. (2000b): Stability and stabilization of potential feed additive enzymes in rumen fluid; *Enzym. Microbiol. Technol.*, 26, 171-177
- Nsereko, V. L.; Smiley, B. K.; Rutherford, W. M.; Spielbauer, A.; Forrester, K. J.; Hettinger, G. H.; Harman, E. K.; Harman, B. R. (2008): Influence of inoculating forage with lactic acid bacterial strains that produce ferulate esterase on ensilage and ruminal degradation of fibre; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 145, 122-135
- Nultsch, W. (1974): *Allgemeine Botanik*; 5. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 73-107
- Obritzhauser, W. (2004): Zusammenhänge zwischen Fütterungsfehlern und Fruchtbarkeitsstörungen bei Milchkühen (Azyklie, Stillbrüsigkeit, Ovarialzysten); Schrift zur 31. viehwirtschaftlichen Fachtagung (27. - 28. April 2004) der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, Österreich, 1-7

- Oestmann, A.; Südekum, K.-H.; Voigt, K.; Stangassinger, M. (1995): Zur Rolle von Lignin und phenolischen Monomeren in Futtermitteln für Wiederkäuer: I.: Vorkommen, Funktionen und Nachweisverfahren; Übers. Tierernährg., 23, 105-131
- Pérez, J.; Muñoz-Dorado, J.; de la Rubia, T.; Martínez, J. (2002): Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin - an overview; Int. Micorbiol., 5, 53-63
- Peters, A.; Lebzien, P.; Meyer, U.; Borchert, U.; Bulang, M.; Flachowsky, G. (2010): Effect of exogenous fibrolytic enzymes on ruminal fermentation and nutrient digestion in dairy cows; Archives of Animal Nutrition, 64, 221-237
- Petry, H. (2005): Energiehaushalt; In: Von Engelhardt, W.; Breves, G. (Hrsg.): Physiologie der Haustiere; 2. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, 435- 445
- Pfeffer, E. (1987): Energiehaushalt; In: Scheunert, A.; Trautmann, A. (Hrsg.): Lehrbuch der Veterinärphysiologie; Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg, 119-133
- Pinos-Rodríguez, J. M.; González, S. S.; Mendoza, G. D.; Bárcena, R.; Cobos, M. A.; Hernández, A.; Ortega, M. E. (2002): Effect of exogenous fibrolytic enzyme on ruminal fermentation and digestibility of alfalfa and rye-grass hay fed to lambs; J. Anim. Sci., 80, 3016-3020
- Platen, M. (2003): Tiergesundheit, Fruchtbarkeit und Reproduktion als Kostenfaktoren in Milchviehherden; DGfZ-Schriftenreihe zum IV. Brandenburger Nutztierforum, Heft 32, 33-57
- Poorter, H.; Giffort, R. M.; Kriedemann, P. E.; Wong, S. C. (1992): A quantitative analysis of dark respiration and carbon content as factors in the growth response of plants to elevated CO₂; Aust. J. Bot., 40, 501-513
- Reddish, M. A.; Kung, L. (2007): The effect of feeding a dry enzyme mixture with fibrolytic activity on the performance of lactating dairy cows and digestibility of a diet for sheep; J. Dairy Sci., 90, 4724-4729
- Reeds, P. J.; Mersmann, H. J. (1991): Protein and energy requirements of animals treated with beta-adrenergic agonists: a discussion; J. Anim. Sci., 69, 1532-1550
- Rode, L. M.; Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A. (1999): Fibrolytic enzyme supplements for dairy cows in early lactation; J. Dairy Sci., 82, 2121-2126
- Russell, J. B.; Wilson, D. B. (1996): Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH?; J. Dairy Sci., 79, 1503-1509

- Sallmann, H.-P.; Fuhrmann, H (2005): Physiologische Aspekte der Leberfunktion; In: Von Engelhardt, W.; Breves, G. (Hrsg.): Physiologie der Haustiere; 2. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, 423-435
- Schopfer, P.; Brennicke, A. (1999): Pflanzenphysiologie; 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 24-33
- Spiekers, H. (2007): Fütterung der Milchkühe zur Optimierung des Laktationsstarts; Schrift zur 34. viehwirtschaftlichen Fachtagung (19. - 20. April 2000) der HBLFA (Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft) Raumberg-Gumpenstein, Irdning, Österreich, 9-13
- Spiekers, H (2006): Einleitung und Zielgrößen; In: Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung; 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7-10
- Stangassinger, M. (2005): Stoffwechselregulation; In: Von Engelhardt, W.; Breves, G. (Hrsg.): Physiologie der Haustiere; 2. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, 588-600
- Staples, C. R.; Thatcher, W. W.; Clark, J. H. (1990): Relationship between ovarian activity and energy status during the early postpartum period of high producing dairy cows; J. Dairy Sci., 73, 938-947
- Statistisches Bundesamt (2010): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei; Milcherzeugung und -verwendung 2009; Fachserie 3, Reihe 4.2.2; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 9
- Steinwider, A. (2002): Einfluss der Futterkonservierung auf die Strukturwirksamkeit von Grundfutter; Schrift zum achten alpenländischen Expertenforum (9. - 10. April 2002) der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, Österreich, 7-10
- Steinwider, A.; Zeiler, E. (2003): Einfluss von Partikellänge und Trockenmassegehalt von Grassilage bei unterschiedlichem Krafftutterniveau auf Pansenparameter, Verdaulichkeit und Futteraufnahme von Rindern; Schrift zur 30. viehwirtschaftlichen Fachtagung (14. - 25. April 2003) der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, Österreich, 7-10
- Südekum, K.-H. (2005): Möglichkeiten und Grenzen einer Standardisierung der in situ-Methodik zur Schätzung des ruminalen Nährstoffabbaus; Übers. Tierernährg., 33, 71-86

- Südekum, K.-H.; Hasselmann, A. (1989): Ausmaß und Ort der Verdauung von Zellwandbestandteilen in Wiederkäuern; Übers. Tierernährg., 17, 191-227
- Südekum, K.-H.; Oestmann, A.; Stangassinger, M. (1995): Zur Rolle von Lignin und phenolischen Monomeren in Futtermitteln für Wiederkäuer: II.: Einfluss auf die Verdauung pflanzlicher Gerüstsubstanzen; Übers. Tierernährg., 23, 229-260
- Sutton, J. D.; Phipps, R. H.; Beever, D. E.; Humphries, D. J.; Hartnell, G. F.; Vicini, J. L.; Hard, D. L. (2003): Effect of method of application of a fibrolytic enzyme product on digestive processes and milk production in Holstein-Friesian cows; J. Dairy Sci., 86, 546-556
- Thaysen, J.; Ruser, B.; Brüsemeister, F. (2007): Verbesserte Zellwandverdaulichkeit in Gras- und Maissilagen durch Siliermittel mit dem Ferulat Esterase bildenden *Lactobacillus buchneri* Stamm PTA 6138; Kongressband 2007, VDLUFA Schriftenreihe, 63, 443-450
- Van Soest, P.J. (1994): Nutritional Ecology of the Ruminant; Second Edition, Cornell University Press, Ithaca, New York, 140-186
- Verbič, J. (2002): Factors affecting microbial protein synthesis in the rumen with emphasis on diets containing forage; Schrift zur 29. viehwirtschaftlichen Fachtagung (24. - 25. April 2002) der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, Österreich, 1-6
- Wang, Y.; McAllister, T.; Rode, L.; Beauchemin, K.; Morgavi, D.; Nsereko, V.; Iwaasa, A.; Yang, W. (2002): Effects of exogenous fibrolytic enzymes on epiphytic microbial populations and in vitro digestion of silage; J. Sci. Food Agric., 82, 760-768
- Weng, J. - K.; Li, X.; Stout, J.; Chapple, C. (2008): Independent origins of syringyl lignin in vascular plants; Proc. Natl. Acad. Sci., 105, 7887-7892
- Weimer, P. J. (1996): Why don't ruminal bacteria digest cellulose faster?; J. Dairy Sci., 79, 1496-1502
- Weisbjerg, M. R.; Bhargava, P. K.; Hvelplund, T.; Madsen, J. (1990): Anvendelse af nedbrydningsprofiler i fodermiddelvurderingen; Beretning fra Statens Husdyrbrugsforsøg, 679, Tjele, Denmark, 33
- Wilson, J. R. (1993): Organization of forage plant tissues; In: Jung, H. G.; Buxton, D. R.; Hatfield, R. D.; Ralph, J. (Hrsg.): Forage cell wall structure and digestibility; ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 1-32

- Wulf, M.; Südekum, K.-H. (2005): Effects of chemically treated soybeans and expeller rapeseed meal on in vivo and in situ crude fat and crude protein disappearance from the rumen; *Anim. Feed Sci. Technol.*, 118, 215-227
- Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A. (2006): Effects of physically effective fiber on chewing activity and ruminal pH of dairy cows fed diets based on barley silage; *J. Dairy Sci.*, 89, 217-228
- Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A.; Rode, L. M. (1999): Effects of an enzyme feed additive on extent of digestion and milk production of lactating dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 82, 391-403
- Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A.; Rode, L. M. (2000): A comparison of methods of adding fibrolytic enzymes to lactating dairy cows; *J. Dairy Sci.*, 83, 2512-2520

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich versichere eidesstattlich, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, wurden als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Bedburg-Hau, den 25.01.2012

DANKSAGUNG

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Südekum für die Überlassung des interessanten Themas, der auch persönlich außerordentlich guten Zusammenarbeit, seiner ständigen Unterstützung, Diskussionsfreudigkeit und Hilfsbereitschaft. Danke für die freundliche Aufnahme als externer Doktorand am Institut für Tierwissenschaften, Abteilung Tierernährung, der Universität Bonn.

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Büscher für die Übernahme des Korreferates.

Herrn Dr. Martin Pries und Frau Annette Menke von der Landwirtschaftskammer NRW für ihre Unterstützung und die stetige Bereitschaft zur Diskussion und Beantwortung meiner Fragen.

Der Firma Pioneer für die finanzielle Unterstützung des Projektes, insbesondere Herrn Dr. Frank Brüsemeister als Projektpartner.

Den Mitarbeitern des Landwirtschaftszentrums Haus Riswick für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und der Diskussion der Ergebnisse. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Klaus Hünting, Frau Silke Beintmann, Herrn Michael Berntsen, Frau Claudia Verhülsdonk und Herrn Ludger Steevens sowie allen, die an der Durchführung der Versuche beteiligt waren.

Den Mitarbeitern des Instituts für Tierwissenschaften, insbesondere Herrn Jens Benninghoff, Herrn Dirk Breer, Frau Nadja Wahl und Frau Petra Jaquemien.

Meinen Eltern für ihre Geduld und Unterstützung.

