

Benjamin Junck

**Eine physiologische Bewertung
der Auswirkungen der Partikellänge
von Gras- und Maissilage in
Gesamtmischrationen bei Milchkühen**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Aus dem Institut für Tierernährung
Universität Hohenheim
Fachgebiet Tierernährung
Prof. i. R. Dr. med. vet. & agr. Drs. h.c. Winfried Drochner



Eine physiologische Bewertung der Auswirkungen der Partikellänge von Gras- und Maissilage in Gesamtmischrationen bei Milchkühen

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften

vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften

von
Benjamin Junck
aus Jungingen

2009

gefördert durch die H. W. Schaumann Stiftung (Hamburg)

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. – Göttingen: Cuvillier, 2010
Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2010

D100 (Diss. Univ. Hohenheim)

978-3-86955-358-0

Die vorliegende Arbeit wurde am 25. Oktober 2009 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2009

1. Prodekan:	Prof. Dr. W. Bessei
Berichterstatter, 1. Prüfer:	Prof. Drs. Drs. h.c. W. Drochner
Berichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. H. Schenkel
3. Prüfer:	Prof. Dr. J. Bennewitz

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

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

1. Auflage, 2010
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-358-0

Meiner Frau und meinen Kindern

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG.....	1
2 LITERATURÜBERSICHT	4
2.1 Bedeutung der Totalen Mischratio	
n Hochleistungsmilchkühen	4
2.1.1 Definition und Technik der Totalen Mischratio.....	4
2.1.2 Vor- und Nachteile der Totalen Mischratio	5
2.2 Bedeutung der Struktur für eine wiederkäuergerechte Fütterung von	
Hochleistungsmilchkühen	9
2.2.1 Definition und physiologische Bedeutung der Struktur	9
2.2.2 Verschiedene Systeme zur Strukturbewertung	11
2.3 Effekte der Partikellänge des Grundfutters auf Futteraufnahme, Leistung	
und Verdauung von Hochleistungsmilchkühen	20
2.3.1 Effekte der Partikellänge (PL) auf die Futteraufnahme.....	20
2.3.2 Effekte der PL auf Milchfettgehalt und Milchleistung	22
2.3.2.1 Physiologie der Milchfettsynthese	22
2.3.2.2 Effekte der PL auf den Milchfettgehalt.....	24
2.3.2.3 Effekte der PL auf die Milchleistung und andere Milchinhaltsstoffe	26
2.3.3 Kauaktivität, Fress- und Wiederkauverhalten	30
2.3.3.1 Effekte der PL auf das Fressverhalten	33
2.3.3.2 Effekte der PL auf das Wiederkauverhalten	34
2.3.4 Digestaschichtung und die Effekte der PL	38
2.3.5 Effekte der PL auf die Pansenfermentation	43
2.3.6 Effekte der PL auf die Passage	46
3 MATERIAL UND METHODEN.....	51
3.1 Grassilage-Versuch.....	51
3.1.1 Versuchsschema	51
3.1.2 Versuchstiere und Haltungsform	52
3.1.3 Futter und Fütterung.....	53

3.1.4 Futtermittelanalytik	55
3.1.4.1 Durchführung der Rohnährstoffanalyse	56
3.1.5 Statistische Auswertung	56
3.2 Maissilage-Versuch	58
3.2.1 Versuchsschema	58
3.2.2 Versuchstiere und Haltungsform	59
3.2.3 Silagebereitung.....	60
3.2.4 Futter und Fütterung.....	60
3.2.5 Futtermittelanalytik	61
3.2.6 Statistische Auswertung	62
3.3 Untersuchungsmethoden	63
3.3.1 Datenerfassung	63
3.3.2 Futteraufnahme	64
3.3.2.1 Futteraufnahme- und Futterselektionsverhalten	64
3.3.3 Milchparameter.....	65
3.3.4 Erfassung der Kauaktivität.....	65
3.3.4.1 Grassilage-Versuch	65
3.3.4.2 Maissilage-Versuch	66
3.3.5 Bestimmung von NDF- und TM-Abbau der TMR und deren Komponenten mittels Nylon bag Technik	67
3.3.6 Bestimmung der Partikel- und Flüssigkeitspassage	68
3.3.7 Erfassung des Pansenvolumens	70
3.3.8 Messung der Partikelgrößenverteilung und Kinetik der Digesta	70
3.3.8.1 Erfassung der funktionellen spezifischen Dichte der Digesta	72
3.3.9 Messung der Partikelgrößenverteilung in den Komponenten und der TMR ...	73
3.3.9.1 Trockensiebung mit dem Penn State Particle Separator (PSPS)	73
3.3.9.2 Nasssiebanalyse	74
3.3.10 TMR-Bewertung nach verschiedenen Strukturbewertungssystemen	74
3.3.10.1 Strukturwirksame Rohfaser nach HOFFMANN	74
3.3.10.2 Strukturwert nach DE BRABANDER	74
3.3.10.3 Physikalisch effektive NDF (peNDF _M) nach MERTENS	75
3.3.10.4 Physikalisch effektive NDF (peNDF _L) nach LAMMERS.....	76

4 ERGEBNISSE	77
4.1 Grassilage-Versuch.....	77
4.1.1 Einfluss der PL auf die Leistungsparameter	77
4.1.2 Parameter der Kauaktivität	78
4.1.3 Einfluss der PL auf die Partikelkinetik.....	80
4.1.3.1 Einfluss der PL auf die Partikelgrößenverteilung von TMR, Digesta und Kot	80
4.1.3.2 Einfluss der PL auf die Partikelgrößenverteilung der Digesta.....	81
4.1.3.3 Einfluss der PL auf die funktionelle spezifische Dichte der Digesta....	83
4.1.3.4 Einfluss der PL auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage sowie das Pansenvolumen.....	84
4.2 Maissilage-Versuch	86
4.2.1 Qualität und Strukturwirksamkeit der Maissilage- & TMR-Varianten	86
4.2.2 Einfluss der PL auf die Leistungsparameter	88
4.2.3 Einfluss der PL auf Futteraufnahmeverhalten und Futterselektion	89
4.2.3.1 Einfluss der PL auf das Futteraufnahmeverhalten	89
4.2.3.2 Einfluss der PL auf das Futterselektionsverhalten	90
4.2.4 Parameter der Kauaktivität	91
4.2.5 Einfluss der PL auf die Partikelkinetik.....	93
4.2.5.1 Einfluss der PL auf die Partikelgrößenverteilung von TMR, Digesta und Kot	93
4.2.5.2 Einfluss der PL auf die Partikelgrößenverteilung der Digesta.....	95
4.2.5.3 Einfluss der PL auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage	96
4.2.6 Einfluss der PL auf den <i>in situ</i> -NDF- und TM-Abbau der TMR und deren Komponenten	98
5 DISKUSSION	99
5.1 Grassilage-Versuch.....	99
5.1.1 Bewertung der Strukturwirksamkeit der TMR-Varianten auf Basis von Grassilage nach aktuellen Systemen	99
5.1.2 Einfluss der PL der Grassilage auf Futteraufnahme und Milchleistung	101

5.1.3 Einfluss der PL der Grassilage auf die Verdauungsvorgänge (Kauaktivität, Passage, Partikeldynamik und funktionelle spezifische Dichte)	105
5.2 MS-Versuch.....	110
5.2.1 Einfluss der PL auf die Qualität der Maissilage-Varianten.....	110
5.2.2 Bewertung der Strukturwirksamkeit der TMR-Varianten auf Basis von Maissilage nach aktuellen Systemen.....	110
5.2.3 Einfluss der PL der Maissilage auf Futteraufnahme und Milchleistung.....	113
5.2.4 Einfluss der PL der Maissilage auf das Futteraufnahme- und Selektionsverhalten	117
5.2.5 Einfluss der PL der Maissilage auf die Verdauungsvorgänge (Kauaktivität, Passage, Partikeldynamik und <i>in situ</i> -Abbau)	119
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN	127
7 ZUSAMMENFASSUNG	131
8 SUMMARY	134
10 LITERATURVERZEICHNIS	137
10 ANHANG.....	165
10.1 Verzeichnis der Abkürzungen	165
10.2 Verzeichnis der Tabellen	168
10.3 Tabellenanhang	171
Danksagung.....	172
Lebenslauf	174

1. Einleitung und Zielsetzung

Die Zahl der Milchviehbetriebe, die eine durchschnittliche Jahresleistung von über 9000 kg Milch pro Kuh erzielen, steigt vorwiegend aus wirtschaftlichen Gründen stetig an. Mit der Erhöhung des Leistungsniveaus erschwert sich die leistungs- und insbesondere tiergerechte Ernährung der Hochleistungsmilchkuh. Dies erfordert eine bessere Versorgung mit Energie und Nährstoffen. Diesbezüglich bietet die Totale Mischration (TMR) – auch Gesamtmischration – wichtige pansenphysiologische Vorteile, insbesondere bei Hochleistungsmilchkühen, die eine Kraffuttermenge von 45 bis 55 % in der Ration benötigen.

Mit steigendem Leistungsniveau rückt neben der Versorgung mit Energie, nutzbarem Rohprotein und anderen notwendigen Stoffen die Gewährleistung einer ausreichenden Struktur in der Ration in den Vordergrund. Dies wird vor allem durch eine ausreichende Menge an Grundfutter gesichert, wobei in Deutschland je nach Region die Grundfutterkomponenten Grassilage, Maissilage oder deren Mischung eingesetzt werden. Eine Erhöhung der Grundfutteraufnahme gewinnt aus verschiedenen Gründen zunehmend an Bedeutung. Die physiologisch-ethologischen Gründe beziehen sich vorwiegend auf die wiederkäuergerechte Fütterung, die eine hohe Aufnahme an Grundfutter voraussetzt. Des Weiteren tragen eine bessere Ausnutzung des Grundfutters und eine höhere Grundfutteraufnahme dazu bei, die Kosten der Milchkuhfütterung zu verringern. Jedoch ist eine optimale Ausnutzung des Grobfutters in der Fütterung von Hochleistungsmilchkühen von dessen chemischen und physikalischen Eigenschaften abhängig. Hierbei spielt der Zerkleinerungsgrad des Grundfutters eine wichtige Rolle, insbesondere bei der TMR-Fütterung. Der Zerkleinerungsgrad beeinflusst vor allem die Schichtung im Pansen und folglich alle Verdauungsvorgänge und die Höhe der Grundfutteraufnahme (BAL et al., 2000). Die Partikellänge ist einer der bedeutendsten Faktoren auch für die Qualität der TMR selbst. Eine optimale Mischung und Homogenisierung der TMR ist die wichtigste Voraussetzung, um eine Selektion der Einzelfuttermittel beim Fressen zu vermeiden. Hierbei spielt die Partikellänge des Grundfutters in der TMR eine entscheidende Rolle. Eine grobe Partikellänge führt zu einer heterogenen TMR, was eine selektive Aufnahme der Einzelkomponenten ermöglicht und womit die aufgenommene Ration der angebotenen Mischung nicht mehr entspricht (CALBERRY et al., 2003).

Neben dem Fasergehalt ist die Partikellänge der wichtigste Faktor für die Strukturwirksamkeit des Grundfutters und folglich der TMR. Obwohl es in der letzten Dekade intensive Forschung auf diesem Gebiet gegeben hat (CLARK et al., 1999; BERNARD et al., 2000; FIRKINS et al., 2001; SCHWAB et al., 2002; FERNANDEZ et al., 2004; BEAUCHEMIN et al., 2005; YANG et al., 2006b; SILVEIRA et al., 2007), ist es bis heute nicht gelungen, eine optimale Partikellänge des Grundfutters zu definieren. Dasselbe gilt auch für die Normen der Strukturversorgung. Weder das NRC (2001) noch der Ausschuss für Bedarfsnormen der GFE (2001) konnten die physikalischen Charakteristika des Grundfutters berücksichtigen und einen Mindestbedarf an Strukturfutter ableiten. Das NRC (2001) konnte zum Beispiel aufgrund einer unzureichenden Validierung keinen Mindestbedarf für die von MERTENS (1997) eingeführte physikalisch effektive NDF angeben. In der Tat hat der Ausschuss für Bedarfsnormen der Deutschen Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GFE, 2001) die strukturwirksame Rohfaser nach HOFFMANN (1990) und den Strukturwert nach DE BRABANDER (1999a und b) vorgestellt, konnte jedoch keinen Mindestbedarf für beide Systeme festlegen. In beiden Systemen wird die Partikellänge des Grundfutters, insbesondere der Grassilage, nur unzureichend berücksichtigt. Ein zusätzliches Problem liegt auch in der Erkennung eines Strukturmangels in der Ration. Beispielsweise wurden bisher als Indikatoren für einen Strukturmangel der Milchfettgehalt und die Kauaktivität verwendet, zum Teil wurden die Untersuchungen an trockenstehenden Milchkühen durchgeführt.

Mehrere Studien haben gezeigt, dass die Beziehungen zwischen dem Fettgehalt in der Milch und der Kauaktivität in der ersten Laktationsphase, insbesondere bei Hochleistungskühen, nicht ausreichend zu sein scheint, um den Strukturmangel und die daraus folgenden Pansenstoffwechselstörungen rechtzeitig zu erkennen (ALLEN, 1997; MERTENS, 2000). Ein reduzierter Milchfettgehalt weist nach DE BRABANDER (1999a) am deutlichsten auf ein Defizit in der Strukturversorgung hin. Dagegen beschreibt MERTENS (2000) Erscheinungen von Lahmheiten als Folgeerkrankung einer subklinischen Pansenacidose, obwohl sich der Fettgehalt in der Milch nicht veränderte. Dies spricht dafür, dass eine Milchfettdepression nicht der beste Indikator für die Pansenfunktion und Gesundheit des Tieres ist. Nach SCHWARZ (2000) sind bei Rationen für leistungsstarke Kühe jedoch sensiblere Parameter notwendig, welche die Kaskade der Ereignisse von der Pansenschichtung über Kau- und Wiederkauaktivität, Speichelproduktion, präprandialen pH-Wert,

Fermentationsintensität, Milchfettgehalt, Passagerate bis zur Futteraufnahme widerspiegeln. Daraus zeigt sich, dass eine Erweiterung der physiologischen Grundlagen zur Bewertung der Strukturwirkung der Rationen bei Hochleistungsmilchkühen erforderlich ist.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, in zwei Versuchen den Einfluss dreier verschiedener Partikellängen einer Grassilage und einer Maissilage auf die Struktureigenschaften von Gesamtmischrationen in der Fütterung von Hochleistungsmilchkühen zu überprüfen. Um die Wirkung der Partikellänge auf die Kaskade der Verdauungsvorgänge im Reticulorum zu untersuchen, wurden Kauaktivität, Pansenvolumen, Partikelverteilung sowie Partikeldynamik, funktionelle spezifische Dichte der Digesta, Passagerate und *in situ*-Verdaulichkeit erfasst. Des Weiteren wurde auch der Effekt der Partikellänge auf Futteraufnahme und Milchleistung untersucht.

2. Literaturübersicht

2.1 Bedeutung der Totalen Mischration in der Fütterung von Hochleistungsmilchkühen

2.1.1 Definition und Technik der Totalen Mischration (TMR)

Totale Mischrationen (TMR) sind heute ein weit verbreitetes Fütterungssystem in der Milchkuhfütterung auf Grund der zu erwartenden Vorteile in der Tierernährung, dem Herdenmanagement und den tierischen Leistungen, die von einigen Autoren berichtet werden (MCCULLOUGH, 1969; OWEN, 1979; HOWARD et al., 1986; SIROHI et al., 2001). COPPOCK et al. (1981) und COENEN (1996) definieren die TMR als eine Mischung aus allen Nährstoffkomponenten, die als Alleinfutter vorgelegt wird und von den Kühen nicht mehr selektiert werden kann. Den Tieren können somit die Futterkomponenten und Nährstoffe in einem gleich bleibenden Verhältnis angeboten werden. Zur Herstellung von Mischrationen werden Futtermischwagen verschiedener Bauart verwendet. Es werden heute drei verschiedene Systeme unterschieden, der horizontale Mischer mit 1 bis 4 Schnecken, der Vertikalmischer (1 - 2 Schnecken) und der Haspel- bzw. Balkenmischer, der so genannte Freifallmischer (HOFS, 2000). Alle Systeme verfolgen das Ziel, die vorhandenen Grund- und Kraffutterkomponenten sowie Ergänzungsfuttermittel entsprechend einer definierten Rationszusammenstellung zu einer homogenen Ration zu mischen (GERIGHAUSEN, 2000). Es ist selbstverständlich, dass heute ein Wiegesystem zur Standardausrüstung eines Futtermischwagens gehören sollte. Nur durch die exakte Rationsdefinition und deren strikte Einhaltung können die Ziele der TMR-Fütterung erreicht werden. Hierbei soll möglichst viel Struktur erhalten bleiben (JEROCH et al., 1999).

Die totale Mischration wird in Abhängigkeit von der Herdengröße, dem Leistungsniveau und der Homogenität der Leistung in zwei verschiedenen Varianten angewendet (PIRKELMANN, 1994a):

- TMR-Einheitsration während der gesamten Laktation:

Die Kühe erhalten während der gesamten Laktation eine Totale Mischration, deren Nährstoff- und Energiegehalt auf den mittleren Bedarf der gesamten Herde ausgerichtet ist.

- TMR-Phasenfütterung für verschiedene Leistungsgruppen:

Die Herde wird in zwei bis drei Leistungsgruppen entsprechend der Milchleistung und des Laktationsstadiums eingeteilt und mit entsprechenden Mischrationen versorgt.

2.1.2 Vor- und Nachteile der Totalen Mischration

Für den Einsatz einer Mischration gibt es unterschiedliche Gründe, die auf Vorteile dieses Fütterungssystems zurückzuführen sind. Ein wichtiger Vorteil besteht in der einheitlichen Zusammensetzung der Ration (ENGELHARD et al., 1993; LOSAND, 1999). COPPOCK et al. (1981) sprechen von steady-state-Verhältnissen im Pansen bei *ad libitum* Fütterung von Mischrationen, welche sich förderlich auf die Pansenfunktion und Digestapassage auswirken. MOSELEY et al. (1976), MCGILLIARD et al. (1983) und NOCK et al. (1985) berichteten, dass das TMR-Fütterungssystem einen gleichmäßigen pH-Verlauf erhält und ein weites Acetat-Propionat-Verhältnis im Pansen unterstützt. HILGEFORT (1993) und POTTHAST (1993) geben als Grund die kontinuierliche Futteraufnahme bei gleich bleibender Aufnahme von Struktur- und Kraftfutter an. Die gleichmäßigere Futteraufnahme führt nicht unbedingt zu einem höheren mittleren pH-Wert (GRUHN und HOFFMANN, 1982). Jedoch weist die postprandiale pH-Wert-Änderung eine geringere Amplitude auf (COENEN, 1986). Deshalb kommt es auch nach POTTHAST (1993) nicht zu Phasen übermäßiger Fermentation, wodurch der pH-Wert und Bikarbonatgehalt, durch hohe Säurekonzentrationen sehr stark abfallen und die cellulolytischen Mikroorganismen in ihrer Aktivität gestört würden. PHIPPS et al. (1984) stellten als Folge der TMR-Fütterung einen höheren Acetat und Butyrat-Gehalt in Verbindung mit einer niedrigeren Propionatkonzentration fest, woraus sich ein günstigeres Acetat-Propionat-Verhältnis ergab. LI et al. (2003) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass bei Fütterung einer Mischration im Vergleich zu einer getrennten Vorlage an Holstein-Ochsen die Gesamtzahl der Pansenbakterien ($17,0$ vs. $20,3 \times 10^{10}$), die Protozoenzahl ($3,9$ vs. $5,2 \times 10^5$) sowie die hydrolytische Enzymaktivität signifikant erhöht wurden. Dies ist eine Bestätigung der verbesserten Fermentationsbedingungen im Pansen, wie sie auch von anderen Arbeitsgruppen festgestellt wurden (LEE et al., 2000; RUSSELL und RYCHLIK et al., 2001).

Nach Aussagen von OWEN (1986) treten bei TMR-Fütterung metabolische Störungen auch bei hohen Konzentratgaben nur selten auf. Somit können erhöhte Anteile energiereicher, faserarmer Futtermittel eingesetzt werden (COENEN, 1996) und der Rohfasergehalt der Ration ohne nachteilige Folgen auf 15 % der Trockenmasse festgelegt werden (ENGELHARD et al., 1993). Durch die stabileren Pansenverhältnisse kann es zu einer besseren TM-Aufnahme kommen (NOCEK et al., 1986; DLG, 1995; FISCHER, 2001). Die Folge können Leistungssteigerungen (WIECKERT, 1993) und höhere Milchfettgehalte sein (BINES, 1986). MEIJER (1981) konnte im Vergleich zur getrennten Vorlage keine gesteigerte Futteraufnahme durch das Vermischen feststellen. Die fettkorrigierte Milchleistung war in 150 Laktationstagen mit 22,4 kg pro Tag zwischen den Gruppen von je 130 Kühen gleich. Auch SPANN (1997) ist der Meinung, dass durch das Vermischen von qualitativ hochwertiger Gras- und Maissilage sowie Heu keine Erhöhung der Futteraufnahme zu erwarten sei. KUNDRA et al. (1995) beobachteten an schwarzbunten Erstkalbinnen eine mit 15,6 kg pro Tag um etwa 1,1 kg verminderte tägliche Trockenmasseaufnahme in der ersten Laktationshälfte bei Verabreichung einer Mischration im Vergleich zur getrennten Vorlage verwendeter Grund- und Krafffutterkomponenten. INGVARTSEN et al. (1995) konnten dagegen an Dänischen Friesian in der Früh-laktation einen signifikanten Unterschied zu Gunsten einer Totalen Mischration, bestehend aus 50 % Grassilage und 50 % Krafffutter, feststellen. ENGELHARD et al. (1993) berichteten von einer höheren täglichen Milchleistung sowie einem höheren Milchfett- und Eiweißgehalt bei TMR-Fütterung, wohingegen EVERSON (1976) keinen Einfluss auf die Milchleistung und -zusammensetzung feststellte.

DUPCHAK (1999) spricht außerdem von einer verbesserten Gesundheit und Fruchtbarkeit durch TMR-Fütterung, da weniger Acidosen, Ketosen und Labmagenverlagerungen auftreten. FISCHER (2001) berichtet von einer deutlicheren negativen Energiebilanz bei getrennter Grund- und Krafffuttermittelvorgabe, welche sich durch Körperreservenabbau nachteilig auf die erneute Konzeption auswirkt. Die Kühe der TMR-Gruppe hatten einen kürzeren Zeitraum zwischen Kalbung und erfolgreicher Besamung bzw. einen um 8 % höheren Anteil an Trächtigkeiten (78,1 vs. 70,2 %) aus Erstbesamungen.

Ein weiterer positiver Effekt der Mischration besteht darin, dass Futtermittel verwendet werden können, die sich aufgrund ihrer Konsistenz bzw. Struktur,

besonderer Behandlung oder geringer Schmackhaftigkeit kaum für eine getrennte Vorlage eignen (OWEN, 1986; GIVENS, 1987; NIJE und REED, 1995; COENEN, 1996). MIRON et al. (2002) stellten sogar eine verbesserte Futtermittelverwertung bei teilweisem Austausch von Mais mit Zitruspülpel bei Milchkühen fest. HOWARD et al. (1968) berichteten davon, dass der schlechte Geschmack mancher Nebenprodukte durch den hohen Silageanteil in der Ration überdeckt wird.

Das Mischen kann aber auch negative Folgen haben. Werden bei der Rationszusammenstellung verdorbene Futterpartien oder Komponenten mit geringer Qualität nicht erkannt (COENEN, 1996), haben die ausschließlich mit TMR versorgten Kühe nicht mehr die Möglichkeit, die befallenen Partien zu selektieren oder die unausgewogene Versorgung mit Nährstoffen und Energie durch die Auswahl anderer Futterkomponenten auszugleichen (LOSAND, 1999). Fehler in der Rationsqualität wirken sich somit umso gravierender auf die Gesundheit, Leistung und Fruchtbarkeit der Gruppe aus (LOSAND, 1999). In diesem Zusammenhang ist auch die Gefahr der Vermischung der Mischration zu nennen, die durch technische Mängel am Futtermischwagen, falsche Befüllung oder zu lange Mischzeiten entstehen kann (COENEN, 1999; GERIGHAUSEN, 2000). Die Struktureigenschaften der Ration werden dadurch verschlechtert, mit negativen Folgen auf die Pansenphysiologie. Für diese ist aber die Struktur des Futters zur Aufrechterhaltung der Schichtung im Pansen ernährungsphysiologisch wichtig (BEAUCHEMIN et al., 1991; MERTENS, 1997; HOFFMANN, 2003).

Ein weiterer Aspekt, der entweder als positiv oder als negativ angesehen wird, liegt darin, dass die Nährstoffzusammensetzung einer Mischration genau auf den durchschnittlichen Bedarf einer Gruppe bzw. der Herde abgestimmt wird (COPPOCK, 1977). Dies ist aber nur bei einem homogenen Leistungsniveau der Gruppe bzw. Herde von Vorteil. Bei heterogenen Leistungen werden nur wenige Tiere entsprechend ihres Bedarfs versorgt, was deutliche Unter- und Überversorgungen zur Folge hat (FISCHER, 2001).

Die Frage, ob den Kühen eine Einheitsmischung während der gesamten Laktation gegeben werden kann, oder ob es notwendig ist, die Tiere in Leistungsgruppen mit entsprechender TMR-Phasenfütterung einzuteilen, wird in der Literatur schon seit längerer Zeit kontrovers diskutiert (BINES, 1986).

Nach Meinung von OWEN (1979) spricht eine wesentliche Vereinfachung des ganzen Fütterungsprozesses als Hauptargument für die Verabreichung einer

Mischration an die gesamte Herde. Auch COPPOCK et al. (1974) befürworten eine Mischration für alle Kühe, wenn sie einerseits die Tiere mit hoher Leistung ausreichend mit Nährstoffen versorgt und andererseits die Kühe mit geringer Milchleistung nicht zu stark verfetten. Außerdem lassen sich kleinere Milchvieherden mit etwa 80 oder weniger Tieren schlecht oder gar nicht in Leistungsgruppen einteilen (LÜPPING et al., 1999). Nach PIRKELMANN und WAGNER (1994b) sind Über- und Unterversorgungen von 10 bis 15 % vertretbar. FISCHER (2001) ist der Meinung, dass Einheitsmischungen erst ab einem durchschnittlichen Leistungsniveau der Herde von über 9000 kg Milch eingesetzt werden sollen. Bei der Fütterung einer Mischration gegenüber der Gruppenfütterung besteht zwar die Problematik eines postpartalen Energiedefizits und einer Überversorgung ab dem letzten Laktationsdrittel. Jedoch verweisen Befürworter der Einheitsmischung auf den Zusammenhang und die Regulation zwischen Leistungspotential und Futteraufnahme. Konkret wird davon ausgegangen, dass durch das ausgeprägtere Energiedefizit zu Laktationsbeginn das Milchleistungsplateau flacher verläuft, jedoch der Energiestoffwechsel entlastet wird (BINES, 1986; WIECKERT, 1994; BIRKHAMMER, 1995; FISCHER, 2001). Nach der Hochlaktation verhindert eine bessere Persistenz der Milchleistung eine Überversorgung und eine Verfettung bis zum Trockenstellen (FISCHER, 2001).

Nach SMITH et al. (1978a) ermöglicht die Phasenfütterung in Abhängigkeit von der Milchleistung und dem Laktationsstadium die leistungsgerechte Versorgung der einzelnen Hochleistungstiere und verhindert die Überversorgung von Kühen mit geringerem Leistungspotential. PIRKELMANN und WAGNER (1994b) sind der Auffassung, dass der Einsatz von Totalen Mischrationen nur über Leistungsgruppen erfolgreich sein kann. Dies ist differenzierter zu betrachten. Herden zwischen 8000 und 9000 kg Milchleistung sollten in zwei Leistungsgruppen eingeteilt werden (FISCHER, 2001), Herden unter 8000 kg Leistung müssen nach DLG-Empfehlungen in drei Laktationsgruppen, zuzüglich Trockenstehergruppe, versorgt werden (CLARK et al., 1980; DLG, 1995; SPANN, 1997). Eine Einteilung in Leistungsgruppen lässt sich ohne Probleme realisieren, wenn die Herde mindestens 100 bis 150 Kühe umfasst und es die stallbaulichen Gegebenheiten zulassen (COPPOCK, 1981). Die Gruppenzugehörigkeit der Tiere wird maßgeblich durch die Milchleistung und das Laktationsstadium geregelt (KROLL et al., 1987). Die Zugehörigkeitsdauer zu einer Gruppe wird vor allem vom Leistungsniveau beeinflusst (PIRKELMANN und WAGNER, 1994). Laut COPPOCK et al. (1981) und FISCHER (2001) ist es generell

wichtig, dass alle Kühe nach dem Abkalben die Ration mit hoher Energiestufe erhalten, damit sie ihr genetisches Milchleistungspotential voll entwickeln können.

Neben den tierspezifischen Vor- und Nachteilen sollen ökonomische Aspekte nicht außer Acht gelassen werden, die den Einsatz einer Mischration interessant machen. Durch eine sehr gute Mechanisierung kann Arbeitszeit eingespart werden (WIECKERT, 1993). Demgegenüber stehen allerdings auf der anderen Seite hohe Investitionskosten bei der Anschaffung eines Futtermischwagens (FISCHER, 2001), andererseits werden Krafftutterabrufstationen nicht mehr benötigt (OWEN, 1986). Durch den Einsatz von preisgünstigen, hochwertigen Nebenprodukten aus der Lebensmittelindustrie lassen sich die Kosten pro kg Fett-Eiweiß-korrigierter Milch deutlich senken (COPPOCK et al., 1981; KROLL et al., 1987; FISCHER, 2001).

2.2 Bedeutung der Struktur für eine wiederkäuergerechte Fütterung von Hochleistungsmilchkühen

2.2.1 Definition und physiologische Bedeutung der Struktur

Die Struktur eines Futtermittels ist durch drei Faktorgruppen gekennzeichnet (HOFFMANN, 1983):

- Die *physikalische* Form wird über die geometrischen Ausmaße der Futterteilchen und das Verteilungsbild der Teilchengrößen bestimmt.
- Die *chemische* Zusammensetzung eines Futtermittels spielt über den Trockenmassegehalt sowie im besonderen den Gerüstsubstanzengehalt (z. B. Rohfasergehalt, NDF-Gehalt) eine wichtige Rolle für den Strukturwert eines Futtermittels.
- Die *physiologische* Wirkung der Futtermittelstruktur, insbesondere im Bereich der Fermentation im Pansen, wird durch den Gehalt an Gerüstsubstanzen und die physikalische Form bestimmt.

Die Futterstruktur wird als Rauzigkeit, Härte und Größe der Futterpartikel (ROSENBERGER, 1978), Fasrigkeit und Elastizität des Futters (FRENS, 1960) und als grobes Gefüge (MERTENS, 1993) beschrieben. Als Strukturfutter werden demnach Grundfuttermittel mit einem gewissen Fasergehalt bezeichnet, die beim Wiederkäuer intensives Kauen und Wiederkauen auslösen (GFE, 2001). Das Kau- und Wiederkauverhalten geht einher mit einer erhöhten Speichelproduktion, die

wiederum eine wichtige Rolle bei der Pufferung der bei der ruminalen Fermentation gebildeten flüchtigen Fettsäuren darstellt (BALCH, 1958; SUDWEEKS et al., 1975; SANTINI et al., 1983). Eine Steigerung des Heuanteils von 0 auf 15 %, in einer Ration basierend auf Kraftfutter und Silage, führte bei Versuchen von BEAUCHEMIN und BUCHANA-SMITH (1989 und 1990) zu einer Steigerung der Kauaktivität, was die Autoren auf einen höheren Anteil an Gerüstsubstanzen (NDF) zurückführten. Eine belgische Arbeitsgruppe definiert den Begriff physikalische Struktur als das Maß, in dem ein Futtermittel durch seine Menge und die Eigenschaften seiner Kohlenhydrate zu einer optimalen und stabilen Pansentätigkeit beiträgt (DE BRABANDER et al., 1999a). Die physikalische Struktur von Futtermitteln kann durch verschiedene technische Aufbereitungsverfahren erheblich variiert werden. Je nach Konservierungsart bzw. Konservierungsverfahren und Vorlageform sind die Auswirkungen auf den Trockenmasse- und Nährstoffgehalt unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Strukturwirksamkeit steigt mit zunehmendem Trockenmassegehalt der Rationskomponenten leicht an. Hohe Stängelanteile von Grünlandfutter, die vor allem zur Blüte bzw. im Stadium der Samenbildung erreicht werden, bedingen einen hohen Gehalt an Gerüstsubstanzen wie Hemizellulose, Zellulose und Lignin, die Strukturwirksamkeit steigt an (STEINWIDDER, 2002). Nach ALLEN (1997) haben die verschiedenen Grundfuttermittel eine kritische Partikellänge, wobei eine weitere Erhöhung der Partikellänge keine Verbesserung der Strukturwirksamkeit bewirkt.

Bei unzureichender Strukturversorgung bzw. Partikellänge kommt es zu einer Reduzierung des ruminalen Acetat-Propionat-Verhältnisses und des pH-Werts, was oft mit einer Verringerung des Milchfettgehaltes verbunden ist (WOODFORD et al., 1986; SHAVER, 1990). Fällt der pH-Wert unter 6, ist das Wachstum der zellulolytischen Mikroorganismen deutlich reduziert. Die Propionat produzierenden Mikroorganismen sind davon weniger betroffen, es kommt zur Abnahme des ruminalen Acetat-Propionat-Verhältnisses (GRANT et al., 1990a). Des Weiteren kann eine intensive Aufbereitung (Musen, Mahlen oder Pelletieren) von Strukturfutter bei Wiederkäuern zum Auftreten von Pseudoruminationen (DESWYSEN et al., 1978; DESWYSEN und EHRLEIN, 1981; TAJAJ et al., 1999), zur Verringerung der Pansenmotorik (FREER et al., 1965), Pansentympenien (ERIKSSON et al., 1968), Pansenacidosen (SAUVANT et al., 1999; KRAJCARSKI-HUNT et al., 2002), zur Abnahme des Pansen-Hauben-Gewichtes (GREENHALGH und REID, 1974) und zu Veränderungen des Pansenepithels (MEYER et al., 1965; OWEN et al., 1998) führen.

Die Fütterung von pelletiertem Heu kann eine Erhöhung der Futteraufnahme bewirken, die Verdaulichkeit der N-freien Extraktstoffe und der Stärke kann verbessert werden. Es ist möglich, dass die Zahl der motorischen Bewegungen je Zeiteinheit gleich bleibt, der Druck im Pansen bis zu 50 % absinkt und damit auch die Wiederkauzeit, mit negativen Folgen auf die Pansenphysiologie (ORTH und KAUFMANN, 1966).

Umgekehrt sind bei unzerkleinertem Futtergut wie z. B. Langheu eine niedrige Futteraufnahme, eine gute Verdaulichkeit der Rohfaser, ein hoher pH-Wert im Pansen, lange Wiederkauzeiten, lange Fress- und Wiederkauzeiten je kg Trockenmasse und stabile Pansenverhältnisse zu erwarten (BEUKELLEN et al., 1985). Auf Grund der geringen Futteraufnahme sind die Tierleistungen niedriger als bei zerkleinertem Material und deshalb nicht relevant in die Fütterung hochleistender Kühe, da eine hohe Energiekonzentration je Futtereinheit gewährleistet werden muss (ALLEN, 1997; DE VRIES und VEERKAMP, 2000)

Die langen Partikel erschweren die Futteraufnahme und fördern die Futterselektion (DEMARQUILLY und DULPHY, 1977; CALBERRY et al., 2003; BEAUCHEMIN und YANG, 2005). Zudem ist eine längere Aufbereitungszeit im Pansen in Form von Wiederkauen erforderlich, um die Futterpartikel auf die für eine Weiterbeförderung in den Omasum notwendige Größe zu zerkleinern. Dadurch wird die Passagerate verringert und das Reticulorumen wird auf Grund des konstanten Volumens der Fermentationskammer nicht frei für eine weitere Futteraufnahme (GRUHN und HOFFMANN, 1982; KASKE, 1997; JOHNSON et al., 2003a).

Eine optimale Struktur zeichnet sich durch eine schnelle Passagerate und hohe Futteraufnahme bei gleichzeitig vollständiger Ausnutzung der im Futter enthaltenen Nährstoffe aus (MERTENS, 1997).

2.2.2 Verschiedene Systeme zur Strukturbewertung

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die Entwicklung der Strukturbewertungssysteme gegeben werden. Die aktuell diskutierten Systeme werden näher erläutert.

BALCH (1971) schlug zur Bewertung der physiologischen Struktureigenschaften eines Futtermittels als geeigneten Parameter die Gesamtkauzeit pro Tag, bestehend aus

Fress- und Wiederkauzeit, ausgedrückt in Minuten Kauzeit pro kg Trockenmasse, vor. Anhand verschieden zusammengestellter Rationen beobachtete der Autor, dass sich die Reaktion des Tieres auf die Struktureigenschaften des Futters in der Kauzeit widerspiegelt. Er nahm diese Zusammenhänge zur Erstellung eines Raufutterindex (roughage index) zum Anlass, eine Quantifizierung der vom Futter ausgehenden strukturwirksamen Eigenschaften vorzunehmen. Diese Gedanken griffen SUDWEEKS et al. (1981) auf und entwickelten das „roughage value index system“, welches den Strukturbedarf einer Milchkuh zur Erreichung bestimmter Milchleistungsparameter für verschiedene Futtermittel errechnet. Der Strukturbedarf wird dabei definiert als aufzuwendende Kauzeit (min/kg TM) für das jeweilige Futtermittel. Eine andere Erweiterung erfuhr der „roughage index“ von SANTINI et al. (1983), welche die Partikellänge des Futters in den Index einbezogen, da die Autoren eine Abhängigkeit der Kauzeit pro kg Trockenmasse auch von der Partikellänge feststellten. WESTON und KENNEDY (1984) schlugen den Begriff „mechanoreceptor stimulating capacity“ (MSC) als einen allgemeinen deskriptiven Begriff für unterschiedliche physikalische Eigenschaften der Ration vor. In dieser Weise werden Rationen mit hohem Gehalt an Strukturfasern und hohem Zerkleinerungswiderstand sowie niedriger Abbaubarkeit im Pansen mit einer hohen „mechanoreceptor stimulating capacity“ eingestuft. Demgegenüber stehen Rationen mit niedrigem Gehalt an Strukturfasern oder mit fein zerkleinerten Partikeln sowie gemahlene Kraftfutter mit einer niedrigen MSC. Die besondere Eignung der Kauaktivität zur Abschätzung der Futtermittelstruktur wurde von WOODFORD und MURPHY (1988) bestätigt. NØRGAARD et al. (1989) schlugen für die Milchkuh einen Minimalbedarf von 30 min pro kg Trockenmasse vor. Der Faserindex (indice de fibrosité) nach SAUVANT et al. (1990) berechnet sich ebenfalls aus der Zeit für Futteraufnahme und Wiederkauzeit pro kg Trockenmasse. Dieser wird in Minuten pro kg Trockenmasse angegeben. Für gebräuchliche Futtermittel beträgt der Faserindex zwischen 0 und 250 min pro kg Trockenmasse. So liegt eine fein gehäckselte Maissilage bei etwa 40 min pro kg Trockenmasse, eine grob gehäckselte bei knapp 70 min pro kg Trockenmasse. Bei Futtermitteln bzw. Rationen mit einem Faserindex im Bereich von 20 bis 40 min pro kg Trockenmasse wird die Kauaktivität reduziert, und der Milchfettgehalt fällt um 0,3 % bei einer Verminderung des Faserindex um 10 min pro kg Trockenmasse (SAUVANT et al., 1990).

Die Untersuchungen zum Fress- und Wiederkauverhalten und zur Speichelbildung sowie zur Pansenfermentation und zu verschiedenen Stoffwechselprozessen, die von PIATKOWSKI et al. seit 1974 vorwiegend bei Rindern und von HOFFMANN et al. ab 1976 vorwiegend bei Schafen durchgeführt wurden, haben zur Formulierung des Begriffes **strukturwirksame Rohfaser** geführt und können zur Einschätzung der Strukturwirksamkeit verschiedener Futtermittel verwendet werden (HOFFMANN, 1990; PIATKOWSKI et al., 1990). Als strukturwirksam gilt ein trockener und in Wasser weitgehend beständiger Futterpartikel von 5 bis 8 mm Länge. Dabei gelten 5 mm für kleine Wiederkäuer und 8 mm für Rinder. Als Grundlage verwendeten HOFFMANN et al. (1990) die Wiederkauzeit, die 1 kg Wiesenheu mit 28 bis 30 % Rohfaser auslöst. Diese wurde gleich 1 bzw. 100 % gesetzt. Die zur Berechnung der strukturwirksamen Rohfaser ermittelten Formeln basieren somit auf Kauaktivitätsmessungen, wobei Heu als Referenzfuttermittel diente. Je nach Futtermitteltyp, Vegetationsstadium und Zerkleinerungsgrad kommen unterschiedliche Strukturfaktoren (Faktor f) zur Anwendung. Diese schwanken zwischen 0 (Krafffutter) und 1,5 (Langstroh), wobei die Strukturwirkung der Grundfuttermittel von Stroh zu Grünfutter abnimmt. Dazwischen liegen Heu, Gras- und Maissilage (HOFFMANN et al., 1990). Abstufungen des Strukturfaktors sind mit 0,25 angegeben und werden für geringere Rohfasergehalte oder für kürzere Partikellängen bei Grundfutter vorgenommen (GFE, 2001). Die Strukturfaktoren der Futtermittel werden mit deren Rohfasergehalt multipliziert und ergeben die strukturwirksame Rohfaser pro kg Trockenmasse. Als Empfehlung für die Praxis wird ein Mindestanteil von 10 % strukturwirksamer Rohfaser in der Ration angegeben. Bezogen wird die strukturwirksame Rohfaser auf die Lebendmasse der Tiere. So sind einer Kuh mit einer Lebendmasse von 550 kg ungeachtet der täglichen TM-Aufnahme täglich mindestens 2,2 kg Rohfaser zu verabreichen (PIATKOWSKI et al., 1990). HOFFMANN (2003) gibt eine Optimalversorgung von 400 g strukturwirksamer Rohfaser je 100 kg Lebendmasse an, wobei der Autor ein Maximum bei 550 g sieht und niedrige Werte von 300 bis 350 g nur kurzfristig von gesunden Tieren kompensiert werden können.

In der DLG-Information (2/2001) wurde dieses Bewertungssystem als Möglichkeit für die Anwendung in der Praxis angegeben, jedoch nur zur Orientierung in der Rationsplanung, da weitere Untersuchungen die Empfehlungen bestätigen müssen. MEYER et al. (2002) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass es bei

Fütterung von Gesamtmischrationen an Milchkühe zu Anzeichen von Strukturmangel kam, obwohl der Anteil der strukturwirksamen Rohfaser rechnerisch ausreichend war. Von STEINGASS und ZEBELI (2008) wurde bemängelt, dass das System der strukturwirksamen Rohfaser durch Kauaktivitätsmessungen an trockenstehenden Kühen abgeleitet wurde und damit bei Rationen für Hochleistungskühe in seiner Anwendung problematisch ist. Des Weiteren ist eine Validierung an Versuchen aus der internationalen Literatur nicht möglich, da dieses System als Grundlage die Rohfaser verwendet.

In der internationalen Literatur ist die NDF eine gebräuchliche Kenngröße und dient auch als Basis für die Futterstruktur. Wie bei den Strukturbewertungssystemen auf Basis der Rohfaser, ist der Gehalt an NDF allein dafür nicht ausreichend. MERTENS (1997) stellte mit der **physikalisch effektiven NDF** (peNDF) ein System vor, bei dem der chemisch analysierte Gehalt an NDF mit der Art des Futtermittels, Konservierungsform und der physikalischen Eigenschaft der Futtermittel verknüpft werden. Nach MERTENS (1997 und 2000) bietet die peNDF eine konstanteres Maß der strukturwirksamen Faser als Systeme, welche die Kauaktivität mit einbeziehen, da sie auf zwei grundlegenden Eigenschaften eines Futtermittels basiert – Partikellänge und NDF-Gehalt – und damit unabhängig von Tiereinflüssen ist (Laktationsstadium, Gewicht, Leistungsniveau). Die aktuellen Systeme zur Bewertung der Strukturwirksamkeit des Grundfutters berücksichtigen die Effekte der Partikellänge auf die Kauaktivität (HOFFMANN, 1990) sowie auf den pH-Wert im Pansen und den Milchfettgehalt (DE BRABANDER et al., 1999a und b). Nach MERTENS (1997) erklären die erwähnten Zusammenhänge aber vorwiegend die Effekte der effektiven NDF (eNDF). Die eNDF zeigt, in welchem Umfang ein bestimmtes Futtermittel die Fähigkeit hat, bei gleich bleibendem Fettgehalt in der Milch ein Grundfutter in einer Ration zu ersetzen. Demgegenüber bezieht sich die physikalisch effektive NDF (peNDF) auf die physikalischen Eigenschaften der Faser (primär Partikellänge), welche die Kauaktivität und Pansenschichtung beeinflussen (MERTENS, 1997). Nach Aussagen von ARMENTANO und PEREIRA (1997) ist die Fasermatte im Pansen ein weiterer guter Ansatz für die physikalische Bewertung von NDF. Da die peNDF sich nur auf die physikalischen Eigenschaften des Futtermittels bezieht, ist sie ein präziseres Maß als die eNDF, welche alle Eigenschaften eines Futtermittels charakterisiert, um den Milchfettgehalt zu erhalten (MERTENS, 2000). Obwohl ein

geringer Milchfettgehalt ein Indikator für Defizite in der Strukturversorgung von Milchkühen darstellt, können Anzeichen von Laminitis in Herden erkannt werden, welche keine Probleme mit Milchfettdepression haben. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Milchfettdepression nicht der beste Indikator ist, um die Physiologie der Pansenverhältnisse und der Tiergesundheit zu beschreiben. Das bedeutet, dass die eNDF ein weniger sensibles Maß als die peNDF ist, um die Effektivität der Faser zu beschreiben, welche einer Futteraufnahme-Depression, einer subakuten Pansenacidose (SARA), einer Laminitis und einer Labmagenverlagerung bei Milchkühen vorbeugen kann (MERTENS, 1997).

MERTENS (1986) kam zu dem Schluss, dass die beiden Parameter NDF-Aufnahme und physikalische Form die Hauptcharakteristika eines Futtermittels sind, welche die Kauaktivität beeinflussen. Deshalb wertete MERTENS (1997) 45 publizierte Untersuchungen mit 274 Futtermittelkombinationen zum Strukturgehalt im Zusammenhang mit der Kauaktivität aus. Das Ergebnis ist eine Gleichung, in der die Regressionskoeffizienten die Kauaktivität in Minuten pro kg NDF der verschiedenen Futtermittel und der physikalischen Form (Partikellänge) darstellen. Langes Heu löst eine Kauaktivität von 150 Minuten pro kg NDF aus und wurde von MERTENS (1997) als Standard mit dem physikalischen Effektivitätsfaktor (PEF) 1 angenommen, um den PEF anderer Futtermittel zu berechnen. MERTENS (1997) hat sowohl für Grundfuttermittel als auch für Kraffuttermittel, abhängig von der Aufbereitungsform, Effektivitätsfaktoren ermittelt. Lang gehäckselte Maissilage besitzt z.B. einen höheren Effektivitätsfaktor als kurz oder fein gehäckselte Maissilage (1,0 vs. 0,95 vs. 0,90).

Der peNDF-Gehalt eines Futtermittels ist das Ergebnis aus NDF-Gehalt und dem dem Futtermittel entsprechenden PEF. Der PEF eines Futtermittels kann aus von MERTENS (1997, 2000) ermittelten Tabellen abgelesen werden. Der Gehalt an peNDF der Ration sollte nach MERTENS (1997) bei mindestens 20 % in der Trockenmasse liegen, um bei frühlaktierenden Holsteinkühen einen Milchfettgehalt von 3,4 %, eine Kauaktivität von 27,7 min/kg Trockenmasse und einen mittleren pH-Wert von 6,0 im Pansen aufrecht zu erhalten. Jedoch sollten Rationen mit einem peNDF-Gehalt von 20 % nur über einen kurzen Zeitraum an Kühe verfüttert werden, um den hohen Energieansprüchen einigermaßen gerecht zu werden (MERTENS, 1997). Zur Vermeidung von acidotischen Zuständen und zur Aufrechterhaltung eines Milchfettgehaltes $> 3,6\%$ und eines mittleren pH-Werts von 6,1 sollten Rationen mit mindestens 26 % peNDF verfüttert werden.

Für eine einfache Ermittlung der peNDF schlug MERTENS (1997) vor, die Siebfraktion > 1,18 mm zu bestimmen und mit dem NDF-Gehalt der Ration zu verrechnen. Diese Siebweite bezieht sich auf die so genannte „kritische Partikelgröße“ (POPPI et al., 1980), bei der beim Rind Partikel mit hoher Wahrscheinlichkeit im Reticulorumen retiniert werden. MERTENS (1986 und 1997) geht davon aus, dass Partikel, welche das 1,18 mm Sieb passieren, die Kauaktivität nicht stimulieren. Deshalb sollte der PEF eines Futtermittels gleich dem Anteil der retinierten Partikel auf dem 1,18 mm Sieb sein.

Die Bestimmung der Partikel > 1,18 mm kann mit einer aufwendigen Laborsiebeinheit durchgeführt werden oder auf einfache Weise mit Hilfe des New Penn State Particle Separator (NPSPS, KONONOFF et al., 2003b und KONONOFF und HEINRICHS, 2003e)

Ein grundsätzlicher Vorteil der peNDF ist ihr Bezug auf die NDF und die Berücksichtigung der Partikellänge des Futtermittels, welche in den Strukturbewertungssystemen von HOFFMANN (1990) und DE BRABANDER (1999a und b) nur rudimentär Eingang findet. Andererseits ist die starke Betonung der Partikellänge auch problematisch (BEAUCHEMIN et al., 2003), und ein Nachteil des peNDF-Konzeptes ist, dass Ausmaß und Geschwindigkeit der ruminalen Fermentierbarkeit der Futtermittel nicht berücksichtigt werden. Die peNDF wird ebenfalls als ein Bewertungssystem für die Praxis in der DLG-Information (2/2001) empfohlen. Hier wird deutlich darauf hingewiesen, dass bei diesem System zusätzlich die NFC in die Bewertung einbezogen werden sollte.

Auch LAMMERS et al. (1996) erkannten, dass die Partikellänge des Futters wichtig ist für normale Pansenverhältnisse und entwickelten den „**Penn State Particle Separator**“ (PSPS). Die Partikelverteilung der Ration bzw. Rationskomponenten ist nach MERTENS et al. (1984) ein wichtiger Parameter für die Rationsbeschreibung, da die Verteilung der Partikelgröße einen entscheidenden Einfluss auf die Kauaktivität und Pansenphysiologie hat. Die ASAE (1993) beschrieb eine standardisierte Labormethode (ASAE Standard S424) zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Grundfutter und Ration anhand einer Trockensiebanalyse. Die Trockensiebanalyse ist mit fünf Sieben und einem Auffangbehälter ausgestattet. LAMMERS et al. (1996) entwickelten ein vereinfachtes Modell dieser Laborsiebmethode, bestehend aus zwei Sieben und einer Auffangwanne. Die

Porengröße der Siebe wurde so gewählt, dass die Proben sich in die drei folgenden Fraktionen auftrennen ließen:

- Sieb 1 für retinierte Partikel > 19 mm (Rundlochsieb Ø 19 mm)
- Sieb 2 für retinierte Partikel < 19 mm - > 8 mm (Rundlochsieb Ø 8 mm)
- Auffangbehälter für Partikel < 8 mm.

Anschließend wird das Gewicht der drei Fraktionen ermittelt. Ziel dieser Methode ist es, eine Aussage über die Partikelverteilung (in %) des Futters treffen zu können, welches die Kuh tatsächlich aufnimmt (LAMMERS et al., 1996). Der „Penn State Particle Separator“ kann von Tierernährungsberatern bzw. Landwirten zur Bestimmung der Partikelverteilung der Futterkomponenten, Ration und Futterreste direkt auf den Betrieben eingesetzt werden (HEINRICHS et al., 1999). Weil die Partikelverteilung der Ration bekannt ist, kann diese mit chemischen Parametern (NDF) verknüpft werden. Der Anteil der retinierten Partikel – größer als 8 mm – stellt den strukturierten Anteil des Futters dar. Diese physikalisch effektive NDF wird wie folgt berechnet:

$$\text{peNDF}_L = (\text{retinierte Partikel} > 8 \text{ mm}) \times \text{NDF-Gehalt Ration}$$

Mittlerweile wurde die PSPS von KONONOFF et al. (2003b) und KONONOFF und HEINRICHS (2003e) überarbeitet, da eine genauere Beschreibung der Partikel kleiner als 8 mm erwünscht war. Bei der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von totalen Mischrationen mit Krafffutteranteilen von 50 bis 60 % befand sich ein Großteil (bis zu 50 %) der Partikel in der Auffangwanne. Um diese Fraktion genauer zu charakterisieren, wurde ein weiteres Sieb mit 1,18 mm Porengröße integriert. Damit kann der Vorschlag von MERTENS (1997) umgesetzt werden, die peNDF mit Hilfe der Siebfractionen > 1,18 mm zu berechnen (peNDF_K, > 1,18 mm). Die peNDF_L und peNDF_K (> 1,18 mm) wurden allgemein akzeptiert und werden heute in der internationalen Literatur zur Beschreibung der Struktur von Komponenten und Ration regelmäßig angegeben (KONONOFF und HEINRICHS, 2003e). LAMMERS et al. (1996) bzw. KONONOFF et al. (2003b) und KONONOFF und HEINRICHS (2003e) haben eine Optimalverteilung der Partikelfractionen von Grobfutter und TMR erarbeitet (Tabelle 2.1), machten aber keine Angaben zum idealen peNDF_L bzw. peNDF_K-Gehalt von Rationen. ZEBELI et al. (2008) konnten anhand einer umfangreichen Literaturlauswertung und eigenen Untersuchungen mit Milchkühen in

der ersten Laktationsphase einen optimalen $peNDF_K$ -Gehalt berechnen. Die Autoren geben einen $peNDF_K$ -Gehalt von 30 bis 33 % in der Ration an, um das Risiko einer subakuten Pansenacidose (SARA) zu minimieren, ohne die Leistung von Hochleistungskühen zu beeinträchtigen.

Tabelle 2.1. Optimalverteilung von TMR- und Grundfutterpartikeln in der PSPS¹ (LAMMERS et al., 1996) bzw. der NPSPS² (KONONOFF et al., 2003b) (Mindestanteil in %)

Siebgröße mm	PSPS ¹			Siebgröße mm	NPSPS ²		
	Grassilage	Maissilage	TMR		Grassilage	Maissilage	TMR
> 19,0	15 - 25	2 - 4	5 - 10	> 19,0	10 - 20	3 - 8	3 - 8
19 - 8,0	30 - 40	40 - 50	30 - 50	19 - 8,0	45 - 75	45 - 65	30 - 40
< 8,0	40 - 50	40 - 50	40 - 60	8 - 1,18	20 - 30	30 - 40	30 - 40
				< 1,18	< 5	< 5	< 20

¹ PSPS – Penn State Particle Separator.

² NPSPS – New Penn State Particle Separator.

Im Jahr 1999 führten DE BRABANDER et al. (1999a und b) den **Strukturwert** (SW) in Belgien ein. Dies ist ein System, das die physikalische Struktur einer Milchviehration abschätzen soll. Der Strukturwert wurde aus über 50 Versuchen mit Milchkühen entwickelt. Auf Grund dessen, dass einige Untersuchungen eine enge Beziehung zwischen der physikalischen Struktur und der Kauaktivität feststellten (WESTON und KENNEDY, 1984; NOORGARD et al., 1989; BEAUCHEMIN et al., 1991; ALLEN, 1997), legten DE BOEVER et al. (1993a und b) in 81 Wiederkauversuchen mit Mais- und Grassilagen einen Fress-, Wiederkau- und Kauindex (min/kg TM) für die jeweiligen Grundfutter fest. Für Grassilagen und Heu liegt der Fress-, Wiederkau- und Kauindex bei 26, 47 und 74 Minuten pro kg Trockenmasse (DE BOEVER et al., 1993a) und für Maissilage bei 20, 40 und 59 Minuten pro kg Trockenmasse (DE BOEVER et al., 1993b).

In weiteren Studien untersuchten DE BRABANDER et al. (1999a und b) den kritischen Grundfutteranteil einer Ration. Den Bedarf an Strukturfasern ermittelten die Autoren, indem sie eine Ration mit 60 % Grundfutter an Milchkühe verfütterten und den Grundfutteranteil wöchentlich um 5 % reduzierten, bis Strukturmangelercheinungen auftraten. Dieser Mangel wurde bei den Tieren an Faktoren wie dem Rückgang des Milchfettgehaltes, der Futteraufnahme und der Milchleistung abgelesen. Der Grundfutteranteil, welcher kurz vor Erscheinen von Problemen vorlag, wurde als kritischer Grundfutteranteil bezeichnet. Im Durchschnitt

sank der Milchfettgehalt innerhalb einer Woche um 0,6 % bei einem Unterschreiten des kritischen Grundfutteranteils. Aus den Ergebnissen der Wiederkauversuche und dem kritischen Grundfutteranteil einer Ration ermittelten DE BRABANDER et al. (1999a und b) den Strukturwert. Dieser ist eine dimensionslose Vergleichszahl. Ein SW von 1 pro kg Trockenmasse ist nach den Autoren für die Sicherung der Strukturversorgung einer Milchkuh mit 25 kg Tagesleistung notwendig, d.h. der SW bezieht sich auf die Leistung der Tiere, aber auch auf die Anzahl der Laktationen und die Art der Krafftutternvorlage. In ihren Untersuchungen haben sie für unterschiedliche Futtermittel einen SW ermittelt. Dabei kamen DE BRABANDER et al. (1999b) zu dem Schluss, dass einige Futtermittel wie z.B. Futterrüben, Pressschnitzel oder Biertreber in ihrer Strukturwirksamkeit unterschätzt werden. In diesem System wird neben den Grundfuttermitteln auch dem Krafftutter ein SW zugeordnet. Eine Abschätzung des SW in der Praxis wird durch die in den Versuchen ermittelten Formeln vorgenommen, wobei die Formeln der Grundfuttermittel den XF- bzw. NDF-Gehalt und die Formel des Krafftutters zusätzlich noch die Beständigkeit der Stärke berücksichtigen (siehe Material und Methoden S. 74). Zur Ermittlung des SW einer Ration werden die Strukturwerte der einzelnen Komponenten berechnet und entsprechend ihrem Rationsanteil additiv auf die Ration übertragen (DE BRABANDER et al., 1999a).

Der SW wurde auch in die DLG-Informationen 2/2001 aufgenommen und findet in Deutschland Anwendung. Es liegen jedoch noch relativ wenige Daten aus der Anwendung in der Praxis vor. Bei TMR-Fütterung sollte der SW einen Wert von 1,1 nicht unterschreiten (DLG, 2001). MEYER et al. (2001) führten Experimente mit einer rationierten Grobfuttergabe auf Basis von Grassilage durch. Die Ergebnisse zeigten bei den Tieren ein Defizit an Struktur, obwohl der SW der Ration rechnerisch ausreichend war. Die Autoren folgerten daraus, dass der SW bei Rationen auf Grassilagebasis nicht empfohlen werden kann. In einem Versuchsbericht der staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt Aulendorf (2002) kamen die Versuchsansteller zu dem Schluss, dass der SW zwar zusätzliche Hinweise zur Krafftutterverträglichkeit liefert, auf Grund der gewonnenen Ergebnisse ein SW von 1,2 in der Rationsplanung jedoch nicht unterschritten werden sollte. Von STEINGASS und ZEBELI (2008) wurde vorgeschlagen, den SW anhand der Daten von ZEBELI et al. (2008) zu validieren und gegebenenfalls zu korrigieren.

2.3 Effekte der Partikellänge des Grundfutters auf Futteraufnahme, Leistung und Verdauung von Hochleistungsmilchkühen

2.3.1 Effekte der Partikellänge auf die Futteraufnahme

Die Abnahme der Partikellänge kann abhängig von verschiedenen Fütterungsfaktoren die Futteraufnahme erhöhen, verringern oder kaum verändern (KENNEDY und DOYLE, 1993). Als diese Faktoren sind zu nennen der Zerkleinerungsgrad, die Futterart, die Pflanzenart und die Qualität. Diese wiederum haben einen Einfluss auf die Verdaulichkeit und das spezifische Gewicht, Faktoren, welche unabhängig von der Partikellänge auf die Futteraufnahme einwirken (DULPHY und VAN OS, 1996). Daher schwankt der Effekt der Partikellänge auf die Futteraufnahme in einem sehr großen Bereich von 0 bis 50 % (WESTON und HOGAN, 1967).

Generell ist sowohl bei Silagen als auch bei Raufutter der Effekt der Zerkleinerung auf die Aufnahme erst zu erkennen, wenn die Partikellänge stark verkürzt ist (GALYEAN und GOETSCH, 1993), meist kürzer als 5 bis 7 mm, obwohl eine genauere Schätzung aufgrund unterschiedlich angewandter Messverfahren der Partikelgröße sehr schwierig ist. TAJAJ (1996) kamen zu dem Ergebnis, dass bei Schafen die Wirkung der Partikellänge auf die Futteraufnahme höher ist als bei Milchkühen. WESTON und KENNEDY (1984) berichteten, dass eine starke Partikellängenabnahme des Heus eine Erhöhung der Futteraufnahme von 45 % bei Schafen gegenüber 11 % bei Rindern verursachte. WELCH (1967) stellte in seinen Untersuchungen fest, dass bei Schafen, welche Luzerneheu (Kontrolle) erhielten, sich die Futteraufnahme um 30 % senkte, wenn er zusätzlich zur Luzerneration 7 cm lange inerte Partikel in das Reticulorumen gab. Bei Erhöhung der inerten Partikellänge auf 30 cm verringerte sich die Futteraufnahme um 75 % im Vergleich zur Kontrolle. Wurde dasselbe Gewicht an gemahlten inerten Partikeln durch die Pansenfistel eingegeben, hatte dies keine Wirkung auf die Futteraufnahme. Positive Effekte durch die Reduzierung der Partikellänge wurden in einigen Studien festgestellt, in denen schlechte Grundfutterqualitäten mit hohen Fasergehalten verwendet wurden (PANDITHARANE, 1988; KUSMARTANO et al., 1996; TAJAJ, 1996). Schwierigkeiten in der Interpretation, inwieweit die Partikellänge verantwortlich für die Futteraufnahme

ist, können auch ein Resultat der Wechselwirkung von Faktoren wie Verdaulichkeit, Pansenvolumen, Passagerate, spezifisches Gewicht und tierindividuelle Futteransprüche sein (DULPHY und VAN OS, 1996; KASKE, 1997).

Einige Autoren hatten einen positiven Effekt auf die Futteraufnahme durch die Verringerung der Partikellänge bei Fütterung von Luzernesilage bzw. Luzerneheu an Kühe in der ersten und zweiten Laktationsphase registriert (FISCHER et al., 1994; BEAUCHEMIN et al., 1994; SOITA et al., 2002; KONONOFF und HEINRICHS, 2003c; TEIMOURI-YANSARI et al., 2004; YANG und BEAUCHEMIN, 2007). Im Gegensatz dazu kam PLAIZIER (2004) zu dem Ergebnis, dass eine Reduzierung der mittleren Partikellänge von 4,4 auf 3,7 mm in einer TMR (GF:KF, 40:60) mit Luzernesilage und Luzerneheu als Grundfutterkomponenten zu keiner Steigerung der Futteraufnahme von Milchkühen (mittlerer Laktationstag: 123 d) führte. Zum gleichen Resultat kamen KRAUSE et al. (2002a) bei einer Verringerung der mittleren Partikellänge von 6,3 auf 2,8 mm.

In einigen Studien wurden mit Reduzierung der Partikellänge der Maissilage positive Effekte auf die Futteraufnahme festgestellt (DE BOEVER et al., 1993; STOCKDALE und BEAVIS, 1994; SCHWAB et al., 2002; BHANDARI et al., 2007), in anderen dagegen nicht (CLARK und ARMENTANO, 1999b; BAL et al., 2000; KONONOFF und HEINRICHS, 2003a; FERNANDEZ et al., 2004; SOITA et al., 2005; YANG und BEAUCHEMIN, 2005 und 2006a). ROHR et al. (1986) konnten bei Abnahme der Partikellänge einer Maissilage von 22 auf 5 mm eine geringe Erhöhung der Futteraufnahme um 5 % nachweisen. ONETTI et al. (2003) untersuchten den Einfluss von zwei Maissilage-Gesamtmischrationen verschiedener Partikellänge (19 vs. 32 mm) mit einem Kraftfutteranteil von 50 % auf die Futteraufnahme von Milchkühen (mittlerer Laktationstag: 120 d). Die Autoren stellen nur eine tendenzielle Erhöhung ($P = 0,07$) der Futteraufnahme um 0,7 kg fest. Diese unterschiedlichen Ergebnisse können ein Resultat der Variation der Bearbeitung des Grundfutters und damit verschiedener Partikellänge sein, welche den Vergleich von Untersuchungen erschwert. Von wenigen Autoren wurde berichtet, dass bei Verringerung der Partikellänge von Futtermitteln hoher Qualität die Futteraufnahme zunahm (BEAUCHEMIN, 1997; EINARSON et al., 2004; LEONARDI et al., 2005; BHANDARI et al., 2007), während von den meisten Versuchsanstellern kein positiver Effekt festgestellt wurde (GRANT et al., 1990b; CLARK und ARMENTANO, 1999a; SOITA et al., 2000; YANG et al., 2001a; JOHNSON, 2002b; CLARK und ARMENTANO, 2002;

RUSTOMO et al., 2006; YANG und BEAUCHEMIN, 2006b). Diese Literaturergebnisse scheinen die Hypothese zu unterstützen, dass die Reduzierung der Partikellänge nur bei Grundfutter minderer Qualität einen positiven Effekt auf die Futteraufnahme hat, nicht aber bei Grundfutter hoher Qualität. Dies kann bei „Maissilage-betonten“ Rationen vor allem daran liegen, dass die Menge an leicht fermentierbaren Kohlenhydraten die metabolischen Bedingungen im Pansen bestimmt, welche die Futteraufnahme stärker beeinflussen als die Partikellänge (ALLEN und GRANT, 2000). Dagegen haben Rationen auf Basis von Grassilage eine geringere Energiedichte (NRC, 2001), eine höhere Pufferkapazität (MC BURNEY et al., 1983) und damit eine geringere Wahrscheinlichkeit, negativ auf die Panseneubiose zu wirken. TAF AJ et al. (2007) stellten in einer Literaturlauswertung fest, dass die Verringerung der Partikellänge von Grassilage in Gesamtmischrationen positiv mit der Futteraufnahme korreliert.

WOODFORD und MURPHY (1988), FISCHER et al. (1994) KONONOFF und HEINRICHS (2003c) und TEIMOURI YANSARI et al. (2004) konnten vorrangig bei frühlaktierenden Kühen einen positiven Einfluss reduzierter Partikellänge auf die Futteraufnahme feststellen. Bei Kühen in der zweiten Laktationsphase bestätigte sich dieser Effekt nicht. Die Autoren vermuten, dass Milchkühe im mittleren Laktationsstadium ihren Energiebedarf sowohl aus kurzem, als auch aus grobem Grundfutter decken. Der Effekt der Partikellänge ist auch vom Energieversorgungsstatus der Kuh abhängig (MBANYA et al., 1993). Die Studien von JOHNSON et al. (2003a) bilden eine Ausnahme. Die Autoren berichten, dass Milchkühe mit Reduzierung der Partikellänge (11 vs. 39 mm) einer Maissilage in der zweiten Laktationsphase (mittlerer Laktationstag: 170 d) signifikant mehr TMR aufnahmen.

2.3.2 Effekte der Partikellänge auf Milchfettgehalt und Milchleistung

2.3.2.1 Physiologie der Milchfettsynthese

Vergleichbar mit den meisten Agrarprodukten wird der monetäre Wert der Milch durch ihren Gehalt an Inhaltstoffen wie Fett, Protein, Laktose, Mineralien und Spurenelementen ermittelt (MANFREDINI et al., 1990). Die Bedeutung des Fettgehalts in der Milch ist in den Ländern am bedeutendsten, in denen der Wert der Milch auf Basis des Milchfettanteils ermittelt wird.

Das Milchfett besteht aus über 400 verschiedenen Fettsäuren (COLLOMB et al., 2002). Davon machen jedoch nur 15 bestimmte Fettsäuren (Triglyceride) 95 % am Gesamtanteil aus (COLLIER, 1985). Nach WALSTRA et al. (1984) ist die Milchfettzusammensetzung mit einem hohen Anteil an kurzkettigen Fettsäuren und gesättigten Fettsäuren charakterisiert, ferner durch einen relativ geringen Anteil an mehrfachungesättigten Fettsäuren, der sich auf eine große Anzahl von Fettsäuren mit unterschiedlichen Kettenlängen, Sättigungsgraden und Isomerstrukturen verteilt, sowie das Vorkommen von verzweigtkettigen Fettsäuren.

Die Milchfettsynthese findet auf zwei wesentlichen Wegen statt: Entweder stammen die Fettsäuren des Milchfettes aus den Lipidfraktionen im Blutplasma (ca. 60 %), d. h. sie stammen aus dem Futterfett und aus dem Körperfettabbau (< 10 %), oder sie wurden im Euter *de novo* synthetisiert (ca. 40 %) (CHILLIARD et al., 2000; DOHME, 2005). Während Monogastrier Glukose zur *de novo* Synthese verwenden, nutzen Wiederkäuer in erster Linie Acetat und Butyrat als Kohlenstoffquelle zur *de novo* Synthese. Diese werden im Pansen beim mikrobiellen Abbau von Kohlenhydraten gebildet. Das absorbierte Butyrat wird im Pansenepithel zu β -Hydroxybutyrat umgewandelt und ebenfalls, wie auch Acetat bzw. Acetyl-Coenzym A, aus dem Blut in die Milchdrüse aufgenommen (CHILLIARD et al., 2000; COLLOMB et al., 2002; DOHME, 2005). Mehr als die Hälfte der C_4 -Fettsäuren stammen direkt aus β -Hydroxybutyrat, die andere Hälfte wird im Euter aus C_2 -Einheiten des Acetats neu synthetisiert. Alle Milchfettsäuren von $C_{6:0}$ bis $C_{12:0}$, der größte Anteil an $C_{14:0}$ und über 60 % der $C_{16:0}$ stammen aus der *de novo* Synthese in der Milchdrüse (MOORE und CHRISTIE, 1979, BAUMAN und GRIINARI, 2003). Nach MOORE und CHRISTIE (1979) entstehen diese Milchfettsäuren durch die Bindung von C_2 -Körpern an ein C_4 -Grundgerüst. Die Entstehung der Fettsäuren beruht auf zwei Schlüsselenzymen, Acetyl-CoA-Karboxylase und Fettsäuresynthetase. Diese beiden Enzyme katalysieren die Karboxylierung von Acetat zu Malonyl-CoA und die Kondensation von Malonyl-CoA mit Acetyl-CoA oder Butyryl-CoA (BARBER et al., 1997), die wie schon beschrieben, aus Acetat oder β -Hydroxybutyrat entstehen.

In der Milchdrüse von Wiederkäuern werden nur Fettsäuren bis zu einer Kettenlänge von 16 C-Atomen synthetisiert (JILG et al., 1988). Die Milchdrüse ist nicht in der Lage, aus C_{16} -Körpern durch Kettenverlängerung C_{18} zu erstellen. Ein Rest an C_{14} - und C_{16} -Körpern sowie alle Fettsäuren $\geq C_{18}$ werden direkt aus dem Blutplasma ins Milchfett übernommen (MOORE und CHRISTIE, 1979). Ein im Eutergewebe

vorkommendes Enzym, die Fettsäure-Desaturase, ist in der Lage, gesättigte Fettsäuren in ungesättigte Fettsäuren umzuwandeln. So entstehen in der Milchdrüse aus C₁₄, C₁₆ und C₁₈ die ungesättigten Fettsäuren C_{14:1}, C_{16:1} und C_{18:1} (BAUMGARD et al., 2001; CORL et al., 2001; MOORE und CHRISTIE, 1979). Weiterhin kann aus der Vaccensäure (C_{18:1}, trans-11), die im Pansen gebildet und im Darm absorbiert wird, durch die Desaturase das konjugierte Linolsäureisomer C_{18:2} cis-9, trans-11 entstehen, die so genannte „rumenic acid“ (CHILLIARD et al., 2000; KRAMER et al., 1998). Die mehrfach ungesättigten Fettsäuren können ansonsten nicht synthetisiert werden, sie werden aus dem Futter übernommen (COLLOMB et al., 2002). Daher ist der Gehalt an ungesättigten Fettsäuren im Milchfett abhängig vom Gehalt im Futter. Wobei zu betonen ist, dass ein Großteil der ungesättigten Fettsäuren im Pansen weitgehend hydrogeniert werden, so dass das Fettsäuremuster der Milch wesentlich gesättigter ist als das des entsprechenden Futters (JILG et al., 1988).

2.3.2.2 Effekte der Partikellänge auf den Milchfettgehalt

In einigen Untersuchungen hatte die Reduzierung der Partikellänge keinen Einfluss auf den Milchfettgehalt (DE BRABANER, 1983; SHAVER et al., 1986; PREISSINGER et al., 1997b; BAL et al., 2000; SCHWAB et al., 2002; KONONOFF und HEINRICHS, 2003c; FERNANDEZ et al. 2004; YANG und BEAUCHEMIN, 2005), in anderen wurden Effekte festgestellt (LU, 1987; ARMENTANO et al., 1988; GRANT und WEIDNER, 1992; BEAUCHEMIN 1994; YANG et al., 2001a; JOHNSON et al., 2003; YANG und BEAUCHEMIN, 2007).

JOHNSON et al. (2003) konnten durch Reduzierung der Partikellänge der Maissilage von 40 auf 11 mm eine Abnahme des Milchfettgehalts von 3,8 auf 3,4 % beobachten. Mit einer aus Luzernesilage und 45 % Krafffutter bestehenden TMR zeigten auch GRANT et al. (1990b), dass mit Verringerung der Partikellänge von 9,5 auf 3,5 mm der Milchfettgehalt von 3,8 auf 3,0 % signifikant fiel.

BAL et al. (2000) stellten in einer Studie mit Reduzierung der Partikellänge der Maissilage von 14,5 auf 9,5 mm eine Zunahme des Milchfettgehalts sowie der Milchleistung fest. Der Grund dafür war eine starke Futterselektion auf Nicht-Faser-Kohlenhydrate (NFC) gegen lange Grundfutterpartikel der groben Gesamtmischung und damit auch gegen NDF bei der langen Variante.

BEAUCHEMIN et al. (1994) und MERTENS (1997) kamen zu dem Schluss, dass der Einfluss der Partikellänge auf den Milchfettgehalt erst zu erkennen ist, wenn der NDF-Gehalt unter den Bedarfsempfehlungen des NRC (2001) von 250 g NDF in der Ration bzw. 190 g Grundfutter-NDF pro kg aufgenommener Trockenmasse liegt. In einigen Studien mit NDF-Unterversorgung hatte eine moderate Reduzierung der Partikellänge bzw. Verringerung der peNDF, eine Erhöhung der Futteraufnahme und daraus resultierend, eine erhöhte NDF- bzw. peNDF-Aufnahme (kg/d) zur Folge (CLARK und ARMENTANO, 1999b, KONONOFF und HEINRICHS, 2003c, EINARSON et al., 2004, COOKE und BERNARD, 2005, RUSTOMO et al., 2006, BHANDARI et al., 2007). Dies ist ein Grund dafür, weshalb der Milchfettgehalt nur schwach von der Partikellänge beeinflusst wird (TAF AJ et al., 2007), da eine deutlich über den Bedarfsempfehlungen liegende NDF-Aufnahme die negativen Effekte einer kurzen Partikellänge kompensieren kann (BEAUCHEMIN, 1994). Bei zunehmender Zerkleinerung des Grundfutters kann die reduzierte Speichelproduktion beim Wiederkauen durch die Speichelproduktion beim Fressen ausgeglichen werden (KRAUSE et al., 2002b). Wird die Fermentationssäureproduktion und -absorption nicht ausgeglichen, sinkt der pH-Wert ab, und das Pansenmilieu wird für die fibrolytische Mikroorganismenaktivität ungünstig (GRANT und WEIDNER, 1992; BEAUCHEMIN, 1994). Als Folge davon sinkt die Produktion von Acetat und Butyrat, das Acetat-Propionat-Verhältnis verengt sich. Es stehen nicht mehr ausreichend Acetat und β -Hydroxybutyrat für die *de novo* Synthese in der Milchdrüse zur Verfügung, der Milchfettgehalt sinkt. DE BRABANDER et al. (2002) sprechen bei einer Abnahme des Milchfettgehalts innerhalb einer Woche um 0,6 % von Anzeichen eines Fasermangels bzw. einer Milchfettdepression. MERTENS (1997) und HRISTOV et al. (2004) gehen bei einem Milchfettgehalt von unter 3,4 % (20 % peNDF) von einem Milchfettmangelsyndrom aus. MERTENS (2007) konnte in einer Studie zeigen, dass eine Erhöhung des peNDF-Gehalts von 19 auf 23 % durch Zugabe von 5 % Weizenstroh unzureichend war, um die Milchfettsynthese zu normalisieren (2,7 vs. 3,3 %). SILVEIRA et al. (2007) stellten bei Fütterung einer stärkereichen TMR (60 % Kraftfutteranteil) fest, dass ein peNDF-Gehalt von 29 % nicht ausreichte, um den Milchfettgehalt über 3,4 % zu halten. Des Weiteren wurden der pH-Wert, das Acetat-Propionat-Verhältnis und der Butyrat-Gehalt im Pansen reduziert. Dagegen konnte bei Fütterung einer TMR mit 33 % peNDF und einem stärkereichen Kraftfutter ein Milchfettgehalt von 3,5 % festgestellt werden (SILVEIRA et al., 2007, YANG und

BEAUCHEMIN, 2007). ZEBELI et al. (2008) stellten fest, dass das Verhältnis von pansenabbaubarer Stärke und peNDF nicht enger als 1,5 sein sollte. Ein unausgeglichenes Verhältnis kann die mikrobielle Population und die Biohydrogenierung verändern (CHOUINARD et al., 1998; WEIMER et al., 2007), wobei die Beeinflussung der Biohydrogenierung in der Produktion von Fettsäurezwischenstufen resultiert, welche die *de novo*-Synthese in der Milchdrüse hemmen (KALSCHEUR et al., 1997; BAUMAN und GRIINARI, 2003). BAUMGARD et al. (2000) wiesen nach, dass nur die trans-10, cis-12 Linolsäure (C_{18:2}t10, c12) die Milchfettsynthese hemmt. Von ALZAHAL et al. (2007) wurde berichtet, dass Kühe mit einer subakuten Pansenacidose eine geringere Fettsäuren-*de novo*-Synthese und eine erhöhte trans C_{18:2}-Synthese aufwiesen. Die negative Wirkung von Rationen mit geringem peNDF-Gehalt auf den Milchfettgehalt ist am größten, wenn sie gleichzeitig Fette mit vielen ungesättigten Fettsäuren enthalten (ULBRICH et al., 2004).

2.3.2.3 Effekte der PL auf die Milchleistung und andere Milchhaltsstoffe

Die Ergebnisse aus Untersuchungen zur Milchleistung in Abhängigkeit von der Partikellänge variieren in der Literatur erheblich. Einige Autoren beobachteten, dass durch Reduzierung der Partikellänge eine Steigerung der Milchmenge erzielt wurde (DULPHY und DEMARQUILLY, 1975; SAVOIE et al., 1992; GUTH et al., 1998; LEONARDI et al., 2005). Es ist anzumerken, dass in den meisten Studien, in denen es zu einer Steigerung der Milchleistung kam, auch von einer Futteraufnahmeerhöhung berichtet wurde. Die damit verbesserte Energie- und Proteinversorgung ermöglicht demzufolge eine Steigerung der Milchleistung (MINSON, 1968; PREISSINGER, 1996; TAJAJ, 1996; SCHWARZ, 2000). Andere Autoren beobachteten keinen Einfluss der Partikellänge des Grundfutters auf die Milchleistung (ARMENTANO et al., 1988; GRANT et al., 1990b; SCHWARZ et al., 1990; CLARK und ARMENTANO, 1997; LE LIBOUX und PEYRAUD, 1998 und 1999; KONONOFF et al., 2000; REIS et al., 2001; YANG et al., 2001a; CALLISON et al., 2001; STEINWIDDER und ZEILER, 2003; YANG und BEAUCHEMIN, 2006b; CAO et al., 2007). Ein Rückgang in der Milchleistung mit abnehmender Partikellänge, einhergehend mit einer verminderten Futteraufnahme, wurde nur in wenigen Fällen erwähnt (ORTH und KAUFMANN, 1966; GRANT und WEIDNER, 1992; JENKINS et al., 1998; DEWHURST et al., 2001; JOHNSON et al., 2003a). Es wurde auch von

einem Rückgang der fettkorrigierten Milch (FCM) berichtet (GRANT et al., 1990a und b; YANG et al., 2001b). Bei Maissilagen ist oft von einer deutlichen Milchmengensteigerung mit abnehmender Partikellänge die Rede (PREISSINGER et al., 1997a). Dies ist ein Resultat der erhöhten Stärkeaufnahme, welche sich im Wesentlichen durch die Energieverfügbarkeit zeigt (CLARK und ARMENTANO, 1999b). Die Milchmenge steigt an. Dies ist vor allem bei einer Kornnachzerkleinerung in Verbindung mit hohem Reifegrad zu beobachten (BUCK et al., 1969; JOHNSON et al., 2003a), selten jedoch bei alleiniger Verringerung der Partikellänge (DE BRABANDER et al., 1983).

Der Milcheiweiß- und Laktosegehalt der Milch wird, wie eine Reihe von Versuchen zeigten, von der physikalischen Struktur des Futters nicht (GRANT et al., 1990a; KRAUSE und COMBS, 2003; EUN et al., 2004) oder nur in sehr geringem Umfang beeinflusst (MEYER et al., 1965; SHAVER et al., 1986; GRANT et al., 1990b; KNOWLTON et al., 1998; YANG et al., 2001b). Veränderungen des Eiweißgehaltes sind allenfalls mit einer Verbesserung der duodenalen Rohproteinversorgung oder einer erhöhten mikrobiellen Proteinsynthese in Gegenwart einer verbesserten Energieversorgung zu diskutieren (PREISSINGER et al., 1997b; SOITA et al., 2000; TEIMOURI YANSARI et al., 2004). Auf beides kann sich die Partikellänge indirekt über eine Veränderung der Futteraufnahme auswirken. Ein Einfluss der Fütterung auf den Milchlaktosegehalt gilt allgemein als gering. CASTLE et al. (1979) beobachteten bei einer Partikellängenreduktion von 72 auf 9 mm eine gesteigerte Laktosekonzentration. PREISSINGER (1996) ermittelte bei einer Partikellänge von 40, 22 und 6,5 mm einen Laktosegehalt von 4,7, 4,6 und 4,6 %. Damit war der Laktosegehalt zwar bei 40 mm signifikant erhöht, doch auf Grund der etwas niedrigeren Milchleistung zeigte sich kein Einfluss auf die mit der Milch ausgeschiedene Laktosemenge.

Der Harnstoffgehalt der Milch wird in der Milchviehfütterung als Indikator für den Status der Energie- und Proteinversorgung eingesetzt. Ein Anstieg des Harnstoffgehaltes in der Milch kann sowohl durch eine Proteinübersversorgung als auch durch einen relativ zum Proteinangebot bestehenden Energiemangel ausgelöst werden. Ein Rückgang stellt sich nur bei Proteinmangel ein (ULBRICH et al., 2004). Ein Einfluss der Partikellänge des eingesetzten Futters auf den Harnstoffgehalt der Milch kann somit nur durch die Futteraufnahme oder Nährstofffreisetzung im Pansen erklärt werden. So ist denkbar, dass sich eine Übersversorgung an Protein wegen einer

veränderten Futteraufnahme einstellt, die sich letztlich in veränderten Milchharnstoffgehalten ausdrückt (EKINCI und BRODERICK, 1997; PREISSINGER et al., 1997a).

Ausgewählte Untersuchungen zum Einfluss der Partikellänge von verschiedenen Grundfuttermitteln in einer TMR auf die Futteraufnahme und Milchleistung von Hochleistungsmilchkühen sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

2 Literaturübersicht

Tabelle 2.2. Literaturübersicht über den Einfluss der PL des GF in einer TMR auf die Futteraufnahme, Milchleistung und -inhaltsstoffe (Lsmeans).

Quelle ¹	Grundfutter	GF ² ,	PL ³	TM ⁴	FCM ⁵	Fett ⁶		Protein ⁷
		% i. TM.	mm	kg/d	kg/d	kg/d	%	%
GRANT et al. (1990b)	Luzernesilage	55,0	4,8	22,4	27,5 ^b	0,8 ^b	3,0 ^b	3,0
		55,0	7,2	22,0	30,3 ^a	1,1 ^a	3,6 ^a	3,0
		55,0	9,5	22,2	29,5 ^{ab}	1,1 ^a	3,8 ^a	3,1
BEAUCHEMIN et al. (2003)	Luzernesilage	40,0	4,0	23,9	27,9	1,08	3,78	3,34
		40,0	10,0	23,5	28,3	1,10	3,92	3,26
YANG und BEAUCHEMIN (2007)	Luzernesilage	35,0	7,9	23,8	33,1	1,10	3,33	3,28
		35,0	19,1	23,9	33,4	1,11	3,33	3,31
		60,0	7,9	21,6	30,2	1,13	3,73	3,02
		60,0	19,1	21,9	30,5	1,11	3,64	3,02
ONETTI et al. (2003)	Maissilage	50,0	19,0	26,7	35,5	1,23	2,92	3,21
		50,0	32,0	25,5	34,7	1,23	3,02	3,20
FERNANDZ et al. (2004)	Maissilage	75,0	5,0	22,0	32,2	1,33	3,86	2,98
		75,0	13,0	21,5	31,2	1,31	4,23	3,04
SOITA et al. (2005)	Maissilage	45,0	9,5	26,4	41,3	1,42	3,44	3,04
		45,0	19,1	26,1	41,3	1,39	3,30	3,07
		55,0	9,5	24,9	39,0	1,32	3,54	3,02
		55,0	19,1	24,5	40,7	1,39	3,45	3,09
EINARSON et al. (2004)	Ganzpflanzen-Gerstesilage	42,0	10,0	20,1 ^a	31,1	0,94	3,05	3,24
		42,0	19,0	19,4 ^b	31,4	0,88	2,82	3,29
		60,0	10,0	17,7 ^a	28,7	0,97	3,37	3,10
		60,0	19,0	16,9 ^b	28,7	1,02	3,56	3,11
JOHNSON et al. (2003)	Maissilage + Luzerneheu	40,0	11,1	22,5	27,6	0,94	3,4 ^b	3,2
		40,0	27,8	22,4	26,0	0,91	3,5 ^{ab}	3,2
		40,0	39,7	21,9	27,5	1,05	3,8 ^a	3,2
COOKE und BERNARD (2005)	Maissilage + Luzerneheu	44,0	19,5	22,6	36,8	1,42	3,92	3,09
		44,0	25,4	20,0	38,1	1,50	3,95	3,15
SCHWAB et al. (2002)	Luzernesilage + Maissilage	60,0	13,0	26,6 ^a	41,4	1,41	3,32	3,17
		60,0	19,0	25,5 ^b	41,7	1,43	3,36	3,18
RUSTOMO et al. (2006)	Luzerneheu + Maissilage	50,0	13,0	21,2	26,9	1,05	3,87	3,42
		50,0	19,0	21,1	28,0	1,15	4,19	3,48
BHANDARI et al. (2007)	Luzernesilage + Maissilage	44,0	10,0	23,0 ^a	38,9	0,99	2,56	3,29
		44,0	12,5	22,6 ^b	38,2	0,95	2,57	3,29
		44,0	14,5	23,4 ^a	37,8	0,99	2,63	3,28
		44,0	19,0	21,9 ^b	37,7	1,00	2,72	3,30

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

¹ Nur Untersuchungen mit ad libitum TMR-Fütterung.

² Grundfutteranteil in der Ration.

³ Partikellänge.

⁴ Trockensubstanzaufnahme.

⁵ Fett korrigierte -Milch.

⁶ Milchfettgehalt bzw. Milchfettproduktion.

⁷ Milchproteingehalt.

2.3.3 Kauaktivität, Fress- und Wiederkauverhalten

Die gesamte Kauzeit variiert sehr stark und kann bei Milchkühen mit ad libitum Fütterung und hoher Faseraufnahme bis maximal 14 Stunden andauern (WESTON et al., 1989). Wiederkäuer können 2 bis 9 Stunden pro Tag fressen und 2 bis 10 Stunden pro Tag wiederkauen. Dies ist abhängig vom Fütterungsniveau (BEAUCHEMIN, 1991a), von der Körpermasse (WELCH, 1982; BAE et al., 1983; MAEKAWA et al., 2002), und von der chemischen sowie physikalischen Struktur der Ration (SHAVER et al., 1988; BEAUCHEMIN et al., 1997; MOON et al., 2004; GENCOGLU und TURKMEN, 2006). BEAUCHEMIN (1991a und b) gab eine untere Grenze der normalen Wiederkauzeit bei Milchkühen von 5 Stunden und eine obere von 9 Stunden mit $30 \text{ bis } 50 \times 10^3$ Kauschlägen pro Tag an. PIATKOWSKI (1975) und DESWYSEN et al. (1987a) gingen davon aus, dass das Wiederkauen im Mittel 6 bis 8 Stunden pro Tag in Anspruch nimmt.

Das Verständnis der Fress- und Wiederkauaktivität ist entscheidend, um die physiologischen Abläufe im Reticulorum, den Einfluss auf den Stoffwechsel und die vom Futtermittel ausgehende Wirkung zu verstehen (WELCH, 1982). Wiederkäuer kauen das Futter, um den Verdauungsprozess einzuleiten (PRINZ und LUCAS, 1997). Das Kauen während des Fressens und des Wiederkauens hat die Funktion der Reduzierung der Partikelgröße, des Aufschlusses und der Erhöhung der Partikeloberfläche (POPPI et al., 1980). Nach BEAUCHEMIN (1991a) setzt sich die gesamte Zerkleinerung der Futterpartikel zusammen aus dem Kauen beim Fressen (15 bis 25 %), dem Wiederkauen (20 bis 65 %), dem mikrobiellen Abbau sowie der Reibung während der Mischung und dem Transport der Digesta im Reticulorum (15 - 25 %). Die Futterpartikel werden durch das Kauen beim Fressen mehr in der Länge als in der Breite zerkleinert (WILSON et al., 1989). Die Kutikula wird zerstört, die vaskulären Bündel und andere pflanzliche Gewebe zerquetscht, getrennt und der Zellinhalt freigesetzt (JLYATT et al., 1986; WILSON und KENNEDY, 1996). Diese mechanischen Veränderungen der Futterpartikel dienen der Besiedlung mit fibrolytischen Mikroorganismen und der Exposition der Zellwandbestandteile für mikrobielle Enzyme im Pansen (WESTON und KENNEDY, 1984; MURPHY und KENNEDY, 1993; MCALLISTER et al., 1994). Die Veränderung der physikalischen Eigenschaften erleichtert die Passage der Futterreste aus dem Reticulorum (WELCH, 1986; BERNARD et al., 2000). Da diese Veränderungen aus der

Muskeltätigkeit des Kauens resultieren, wird der Energieaufwand der Kauaktivität zugeordnet (BLAXTER, 1989). Erhält eine Kuh eine Ration bestehend aus rohfaserreicher Grundfutter, so müssen bis zu 35 % der aufgenommenen Energie für die Kauaktivität aufgebracht werden (SUSENBETH et al., 1998). MERTENS et al. (1984) nannten als Limit für das gesamte Kauaktivitätsvermögen bei Milchkühen 15 Stunden, welches durch den Kauenergiebedarf (MERTENS, 1993) festgelegt ist und nicht überschritten werden kann. Die Kauaktivität stimuliert die Speichelsekretion. Dieser enthält hohe Gehalte an Bikarbonat- und Phosphat-Puffern, um den pH-Wert im Pansen für fibrolytische Mikroorganismen in einem optimalen Bereich zu halten (BEAUCHEMIN, 1991a; COOK, 1995).

Das Fressen wird durch Aufnahme, Einspeichelung, Formung und Abschlucken des Futters charakterisiert. Die Futteraufnahme erfolgt, indem Wiederkäuer das Futter im Maul ansammeln (RUTTER et al., 1997). Mit einer kreisenden Bewegung der Zunge sammelt das Tier lange und grobe Partikel auf und befördert diese ins Maul, während kurze oder feine Partikel (z.B. Kraftfutter) auch mit den Lippen in die Maulhöhle manipuliert werden können (BEAUCHEMIN, 1991a). In der Maulhöhle wird das Futter durch Kaubewegungen zerkleinert, um eine abschluckfähige Form zu schaffen. Zeitgleich mit der Kauaktivität wird Speichel sezerniert, um einen zusammenhängenden Futterbolus zu bilden, welcher Pharynx und Ösophagus passieren kann (MURPHY und KENNEDY, 1993; Prinz et al., 1997). Bei *ad libitum* Fütterung ist das tägliche Futteraufnahmeverhalten abhängig von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Futters. Die Futteraufnahme beginnt trotzdem, sobald die Tiere Zugang zur Ration haben. Während des ganzen Tages nehmen Milchkühe mehrere Mahlzeiten zu sich. Es hat sich gezeigt, dass Milchkühe bis zu 20 Mahlzeiten pro Tag zu sich nehmen können, abhängig von Futterzusammensetzung, Verfügbarkeit und vom Bedarf des Tieres (DE BOEVER et al., 1990; BEAUCHEMIN, 1991).

Die primäre Funktion des Wiederkauens ist die Reduzierung der Partikellänge, wodurch die Passage der Digestapartikel aus dem Reticulorum ermöglicht wird (ULYATT et al., 1986). Das Wiederkauen ist teilweise angeboren und besitzt einen reflektorischen Charakter (PIATKOWSKI et al., 1990). Dies konnte durch mechanische Reizung bestimmter Vormagenbezirke, besonders des kranialen Pansensackes und einiger Teile des Reticulums, nachgewiesen werden (VAN SOEST, 1994). Die wechselnde mechanische Reizung und die dadurch ausgelösten

Reflexe sind für die unterschiedliche Frequenz und Dauer der Wiederkauphasen verantwortlich (GÜRTLER, 1989). Ein physiologischer Wiederkauzyklus dauert etwa 50 bis 60 Sekunden (PIATKOWSKI, 1975). Der Beginn eines Wiederkauzyklus wird durch die Regurgitation von Digesta in den unteren Oesophagus eingeleitet. Danach bildet sich in der Mitte des Oesophagus ein Kontraktionszentrum, von dem die Kontraktionswellen in beide Richtungen ausgehen. So gelangt ein Teil (vor allem Flüssigkeit) der in den Oesophagus angesaugten Digesta in das Reticulorum zurück, während der andere Teil in die Maulhöhle gelangt (ULYATT et al., 1986). Für diesen Vorgang ist die Schichtung des Panseninhalts eine Grundvoraussetzung. Etwa eine Sekunde nach der Rejektion des Bissens in die Maulhöhle, als „up Bolus“ bezeichnet, folgt ein Abschlucken des unkaubaren Teils des Bissens, bestehend aus feinen Partikeln und Flüssigkeit. Dieser wird als „tail Bolus“ bezeichnet und enthält etwa 28 % grobe Partikel, während der „up Bolus“ etwa 45 % enthält (KENNEDY, 1985). Nach etwa einer Minute Wiederkauzeit wird der Bissen abgeschluckt („down bolus“). Oft wird ein Teil des Materials auch im Laufe des Wiederkauzyklus abgeschluckt (MURPHY und KENNEDY, 1993). Die mittleren Nassgewichte der „up“, „tail“ und „down Boli“ variieren zwischen 750 - 824 g, 451 - 525 g und 349 - 462 g beträchtlich (KENNEDY, 1985).

Das Zerkleinerungsniveau der gesamten Partikel eines Bissens während eines Wiederkauzyklus ist sehr unterschiedlich und charakterisiert die Wiederkaueffizienz (MURPHY und KENNEDY, 1993). TAF AJ (1996) teilt in diesem Zusammenhang das Wiederkauvermögen in zwei Bereiche: das horizontale und das vertikale Wiederkauvermögen. Ersteres gibt die maximal mögliche Dauer des Wiederkauens und die maximal mögliche Anzahl der Wiederkauschläge während 24 Stunden an. Letzteres nennt die minimale Wiederkauzeit, um die notwendige Größe und Dichte der psalterreifen Partikel zu erreichen. Das Ausmaß der Partikelzerkleinerung eines Bissens in einem Wiederkauzyklus beträgt beim Rind 57 bis 76 % (CHAI et al., 1984). Nach WELCH (1982) ist die Wiederkaueffizienz stark von der Körpermasse abhängig. Daher scheint das Verhältnis zwischen dem horizontalen und dem vertikalen Wiederkauvermögen für die Regulation der Futteraufnahme wichtig zu sein.

Das Wiederkauen von Milchkühen ist bei Nacht ausgeprägter als bei Tag und geschieht zu 70 % im Liegen (GRANT et al., 1990c). Es erfolgen etwa 10 bis 20 Wiederkauphasen pro Tag, wobei eine Phase von einer Minute bis zu zwei Stunden andauern kann (BEAUCHEMIN, 1991). Die Wiederkauaktivität wird durch zahlreiche

Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen tierbedingte Faktoren, Futterart, Partikellänge, Rationszusammensetzung und Fütterungsniveau (TAF AJ et al., 1999 und 2001). Dabei hat die Partikellänge des Futters einen nachhaltigen Einfluss auf das Fress- und Wiederkauverhalten (KASKE und ENGELHARDT, 1987; BUCKMASTER, 2000).

2.3.3.1 Effekte der Partikellänge auf das Fressverhalten

Nach TAF AJ et al. (1999) wird durch das Mahlen von Heu die Fresszeit bei Schafen um 50 % reduziert. Auf Grund der höheren Futteraufnahme ist diese Veränderung bei Milchkühen mit 30 % geringer.

BALCH (1971) beobachtete bei Fütterung von fein gemahlenem Haferstroh eine Reduzierung der Fresszeit um 65 %. Durch das Mahlen oder Pelletieren kam es zu drastischen Veränderungen wichtiger Fressparameter wie Fressdauer, Anzahl der Fresskauschläge pro Tag und Anzahl der Fresskauschläge pro kg Trockenmasse oder NDF (PIATKOWSKI et al., 1990; BEAUCHEMIN et al., 1997a). PIATKOWSKI et al. (1990) wiesen darauf hin, dass die Fressdauer bei alleiniger Fütterung von relativ grob gehäckseltem Heu bei trockenstehenden Kühen, im Vergleich zu nicht gehäckseltem Heu, um 50 % sinkt. DESWYSEN et al. (1978) und DE BOEVER et al. (1993) berichteten, dass auch das relativ grobe Häckseln von Heu eine Verringerung der Fressaktivität von Kalbinnen zeigt. Der Effekt der Partikellänge auf die Parameter des Fressens ist bei getrocknetem Raufutter größer als bei Grünfutter und Silagen (DE BOEVER et al., 1993). Eine mögliche Ursache könnte eine stärkere Vernetzung der Digesta in der Fasermatte im Reticulorum sein, welche die Digesta-Rejektion zu beeinträchtigen scheint (DESWYSEN und EHRLEIN, 1981). So verringerte sich bei MOONEY et al. (1997) die Fresszeit von Luzernesilage bei einer Partikellängenreduktion von 9,5 auf 4,8 mm um 20 %. Tafaj et al. (1999) beobachteten bei Milchkühen einen Rückgang der Fresszeit um 18 %, wenn die Partikellänge von 29 auf 9 mm reduziert wurde.

Tendenzielle Verkürzungen der Fresszeit bei Milchkühen fanden DE BOEVER et al. (1993) bei einer Abnahme der Partikellänge der Grassilage von 71 auf 11 mm. Hingegen beobachteten GRANT et al. (1990b) keine signifikanten Unterschiede der Fressparameter von Milchkühen bei der Verfütterung einer Luzerneheu-TMR mit 45 % Krafffutter. YANG und BEAUCHEMIN (2006a und c) berichteten ebenfalls von keinem Einfluss der veränderten Partikellänge auf die Fresszeit (/d bzw. /kg TM). BERZAGHI

et al. (2001) stellten eine Verlängerung der Fresszeit mit zunehmender Partikellängenreduktion in Gesamtmischrationen fest. Ähnliche Beobachtungen machten auch GUTH et al. (1998), die Fresszeit pro kg Trockenmasse erhöhte sich (24,0 vs. 25,3 min/kg TM) durch die Verfütterung einer TMR bestehend aus Mais- und Gersteganzpflanzensilage mit zwei unterschiedlichen theoretischen Schnittlängen (6,8 vs. 2,8 mm).

2.3.3.2 Effekte der Partikellänge auf das Wiederkauverhalten

Der Einfluss der Zerkleinerung des Futters auf das Wiederkauverhalten ist sehr unterschiedlich und von vielen Faktoren abhängig. Generell ist davon auszugehen, dass eine starke Abnahme der Partikellänge deutliche Unterschiede im Wiederkauverhalten verursacht. Das grobe Häckseln von Raufutter ändert das Wiederkauverhalten kaum, während das Mahlen und Pelletieren von Grundfuttermitteln die Wiederkauaktivität sehr stark vermindern (BALCH und CAMPLING 1962; WILKINS et al., 1972; PIATKOWSKI et al., 1977; ALLEN, 1997; MOONEY et al., 1997; BEAUCHEMIN et al., 1997; GUTH et al., 1998; TAJAJ et al., 1999). Die Stimulation des Wiederkauens durch zerkleinertes getrocknetes Raufutter ist stärker als durch Grünfutter und Silagen (BEAUCHEMIN et al., 1997). Des Weiteren sinkt die Strukturwirkung von Raufutter geringer Qualität über Gräser hin zu Leguminosen (TAJAJ, 1996). Der Schwellenwert des Zerkleinerungsgrades, bei dem noch kein negativer Einfluss auf das Wiederkauverhalten ausgeht, ist unterschiedlich. Das Häckseln auf eine Partikellänge von 6,4 mm bei Luzerneheu (WOODFORD et al., 1986) 10 mm bei Luzernesilage (SANTINI et al., 1983) und 6,0 mm bei Maissilage (BEAUCHEMIN und YANG, 2005) beeinflusste die Wiederkauaktivität bei Milchkühen nicht, wogegen in anderen Untersuchungen eine Reduzierung der Kauaktivität nachgewiesen wurde (GRANT et al., 1990b; ONETTI et al., 2003). Es wird davon ausgegangen, dass Kühe, welche Rationen mit weniger als 7 % langen Partikeln (> 19 mm) erhalten, einem höheren Risiko ausgesetzt sind, an einer subakuten Pansenacidose zu erkranken (GRANT et al., 1990a). BUCKMASER (2000) stellte fest, dass Partikel größer 19 mm doppelt so effektiv sind in der Stimulation der Wiederkauaktivität und in ihrem Beitrag zu einer stabilen Pansenschichtung als Partikel zwischen 8 und 19 mm. Dagegen haben Partikel kleiner als 8 mm ein Fünftel der Effektivität von Partikeln zwischen 8 und 19 mm.

Die Pelletierung von jungem Trockengrünfutter führt bei Kühen zu einer weitgehenden Einstellung des Wiederkauens. Die Gabe von pelletiertem faserreichem Grasheu bedingt eine Reduzierung um etwa 52 bis 65 % (PIATKOWSKI et al., 1977; BEAUCHEMIN et al., 1997). Die Wiederkaudauer sank in Untersuchungen von BEAUCHEMIN et al. (1997) von 6,6 auf 3,2 Stunden pro Tag. Bereits bei dem Austausch von 28 % Heulage durch pelletiertes Heu beobachteten WOODFORD und MURPHY (1988) eine Verkürzung der Wiederkaudauer um 30 %. Ähnlich sind die Ergebnisse von WIESER (1972), der durch das Vermahlen von Heu sowohl eine deutlich herabgesetzte Wiederkaudauer als auch eine verminderte Anzahl der täglichen Kauschläge bei Schafen feststellte.

Bei mehrmaligem Mahlen des Futters stellte WIESER (1972) zudem ein stark gestörtes Wiederkaumuster fest. Beim Verzehr von Rationen mit geringer Mechanorezeptor stimulierender Kapazität, wie dies bei fein gemahlenem Futter der Fall ist, treten so genannte Pseudoruminationen auf. Diese äußern sich in einer Reduzierung der Wiederkauaktivität (5 - 20 Kauschläge/ Bissen) und einem raschen Wiederabschlucken der Nahrung. Die Intervalle können kurz und unregelmäßig sein und dauern kaum länger als 4 bis 48 Sekunden (WIESER, 1972; DESWYSEN et al., 1978; DESWYSEN und EHRLEIN, 1981; DITTRICH et al., 1986; GÜRTLER 1989; ALLEN 1997; TAJAJ et al., 1999). Bei derartigen Pseudoruminationszyklen wird die Rejektion der Digesta erschwert (WESTON und KENNEDY, 1984). Eine deutlich verminderte Wiederkauaktivität lässt sich jedoch durch die Gabe von strukturiertem Futter wieder ausgleichen. WELCH und SMITH (1971a und b) beobachteten sowohl bei Schafen als auch bei Milchkühen, die ausschließlich pelletiertes Grundfutter und Krafffutter vorgelegt bekamen, dass durch Zulage von 5 cm langen inerten Partikeln, die in Form und Struktur Heu entsprachen, eine deutliche Steigerung der Wiederkauaktivität eintrat. Das Einbringen von 30 cm langen inerten Partikeln in den Pansen von Schafen führte demgegenüber durch eine eingeschränkte Regurgitation zu einem gestörten Wiederkauverhalten. GRANT et al. (1990b) stellten bei Milchkühen mit Abnahme der Partikellänge von Luzernesilage (9,5 vs. 3,5 mm) in einer TMR eine signifikante Reduzierung der Wiederkauaktivität (531 vs. 374 min/d) um 30 % pro Tag fest. Um 19 % verringerte sich bei GUTH et al. (1998) die Wiederkauzeit bei einer Partikellängenverkürzung von 6,8 auf 2,8 mm bei Fütterung von Mais- und Gerstenganzpflanzensilage. LE LIBOUX und PEYRAUD (1998) stellten durch eine Partikellängenreduktion von Luzerneheu um 0,7 mm (4,2 vs. 3,5 mm) zwar

eine Verringerung der Wiederkauzeit fest, jedoch blieb die Dauer der Wiederkauperioden unverändert. Zu keiner Verminderung der Wiederkauaktivität kam es bei Gesamtmischrationen mit kurzer Partikellänge (BERZAGHI et al., 2001). Auch FISCHER et al. (1994) fanden bei Vorlage einer fein gehäckselten Luzernesilage (9,7 vs. 3,0 mm) keine negative Wirkung auf die Wiederkauaktivität. DESWYSEN et al. (1978) beobachteten eine kürzere Wiederkauzeit bei langer (53 mm) im Vergleich zu kurzer Silage (18 mm). Die Periode zwischen dem Ende der Hauptfresszeit und der ersten Wiederkauphase war bei langer Silage größer als bei kurzer. SANTINI et al. (1983) fanden eine lineare Beziehung zwischen der Wiederkauzeit und der Partikellänge des Grundfutters in Totalmischrationen. WILKINS et al. (1972), SUDWEEKS et al. (1978) und SHAVER et al. (1986) beobachteten bei Verringerung der Partikellänge neben der verminderten Wiederkauaktivität eine Verkürzung der täglichen Fresszeit und somit eine Verminderung der gesamten Kauaktivität. Verschiedene Versuche zeigten jedoch, dass sich das Kauverhalten über das Fress- und Wiederkauverhalten in der Summe ausgleichen kann. Dies bedeutet: Die Kauaktivität pro kg aufgenommener Trockenmasse bleibt auch bei gesteigerter Futterraufnahme konstant (BALCH, 1971; GRENET, 1989; BROUK und BELYEA, 1993; LE LIBOUX und PEYRAUD, 1998; CLARK und ARMENTANO, 2002; FERNANDEZ et al., 2004; COUDERC et al., 2006).

Ausgewählte Untersuchungen zum Einfluss der Partikellänge verschiedener Grundfuttermittel in einer TMR auf Parameter der Kauaktivität von Hochleistungsmilchkühen sind in Tabelle 2.3 dargestellt.

2 Literaturübersicht

Tabelle 2.3. Literaturübersicht über den Einfluss der PL des GF in einer TMR auf die Kauaktivität und den Kauindex von Milchkühen bezogen auf die Gesamtmischung (Lsmeans).

Quelle ¹	Grundfutter	GF ² , % i. T.	TPL ³ (mm)	Wiederkauen		Fressen	
				/24h ⁴	/kg TM ⁵	/24h	/kg TM
GRANT et al. (1990a)	Luzerneheu	55,0	6,0	381 ^b	17,0 ^b	323 ^b	14,2
		55,0	41,0	484 ^{ab}	21,5 ^a	346 ^{ab}	15,2
		55,0	76,0	496 ^a	22,4 ^a	350 ^a	15,5
KRAUSE et al. (2002b)	Luzernesilage	39,0	9,0	288 ^b	11,7 ^b	241 ^b	9,8
		39,0	19,0	468 ^a	18,5 ^a	300 ^a	11,9
KONONOFF und HEINRICHS (2003c)	Luzernesilage	50,0	4,8	460 ^b	19,9 ^b	262 ^b	11,2 ^b
		50,0	10,6	505 ^a	23,6 ^a	254 ^b	11,5 ^b
		50,0	16,5	478 ^b	23,5 ^a	291 ^a	14,1 ^a
		50,0	22,3	479 ^b	23,5 ^a	298 ^a	14,3 ^a
YANG und BEAUCHEMIN (2007)	Luzernesilage	60,0	7,9	446	23,0	225	11,6
		60,0	19,1	522	28,3	218	11,8
		35,0	7,9	441	21,5	203	9,9
		35,0	19,1	444	21,0	211	10,1
KONONOFF und HEINRICHS (2003a)	Maissilage	57,0	4,8	521 ^a	19,1	252	9,7
		57,0	22,3	461 ^b	19,7	264	10,8
YANG und BEAUCHEMIN (2006a)	Maissilage	46,0	4,8	411 ^b	18,3	232	10,2
		46,0	15,9	463 ^{ab}	19,3	234	9,7
		46,0	28,6	508 ^a	20,6	240	9,7
SOITA et al. (2000)	Ganzpflanzen- Gerstesilage	45,0	4,7	470 ^b	19,3	255 ^b	10,5
		45,0	18,8	543 ^a	22,5	281 ^a	11,7
		55,0	4,7	508 ^b	22,3	264 ^b	11,6
		55,0	18,8	555 ^a	25,7	298 ^a	13,8
YANG und BEAUCHEMIN (2006c)	Ganzpflanzen- Gerstesilage	47,0	4,8	363 ^b	18,8	259	13,6
		47,0	7,2	446 ^a	22,8	272	14,1
		47,0	9,5	440 ^a	23,2	279	14,9
CLARK und ARMENTANO (1999b)	Luzernesilage+ Maissilage	53,0	2,6*	452	19,8	281	12,3
		53,0	4,6*	443	19,4	285	12,5
		53,0	6,5*	477	21,2	286	12,7
CLARK und ARMENTANO (2002)	Luzernesilage+ Maissilage	48,0	4,0	408 ^b	17,7 ^b	227	9,6
		48,0	6,0	420 ^b	18,2 ^{ab}	246	10,6
		48,0	9,4	458 ^a	19,6 ^a	243	10,4
SCHWAB et al. (2002)	Luzernesilage+ Maissilage	60,0	13,0	374	14,6	236	9,2
		60,0	19,0	387	15,6	244	9,8
YANG et al. (2001b)	Luzernesilage+ Gerste-GPS	50,0	6,1*	440	22,3	242 ^b	12,4 ^b
		50,0	7,6*	448	22,2	272 ^a	13,5 ^a

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

^{k.a.} Keine Angabe.

¹ Nur Untersuchungen mit ad libitum TMR-Fütterung.

² Grundfutteranteil in der Ration.

³ theoretische Partikellänge (* mittlere Partikellänge).

⁴ Wiederkauzeit bzw. Fresszeit in min/ 24 Stunden.

⁵ Wiederkauzeit bzw. Fresszeit in min/ kg Trockensubstanz.

2.3.4 Digestaschichtung und die Effekte der Partikellänge

Auf Grund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Futterpartikel (Größe, Form und Dichte) und durch die Vormagenmotorik erfolgt im Reticulorumen von gesunden Wiederkäuern eine ausgeprägte Schichtung der Digesta (KASKE, 2000). Im Pansen sind die Futtermassen wie folgt geschichtet. Von dorsal nach ventral folgen Gasblase, Faserschicht und Flüssigkeit sowie feine Partikel (JEROCH et al., 1999). Die stabile Faserschicht ist als Kern für einen funktionierenden Pansen zu sehen (JEROCH et al., 1999). Die Schichtung der Digesta ist insbesondere zwei bis sechs Stunden nach der Fütterung deutlich ausgeprägt (WEIDNER und GRANT, 1994; KOVÁCS, 1996). Trotz intensiver Durchmischung beim Bewegungsablauf der Kontraktion und Dilatation mit großen Mengen Speichel wird die Digesta im Pansen nicht homogenisiert, sondern es erfolgt eine Trennung bzw. Schichtung in unterschiedliche Phasen vorwiegend nach der Dichte (GÜRTLER, 1989), der Partikellänge (KENNEDY und DOYLE, 1993), nach potenzieller Abbaubarkeit und abpressbarem Wasseranteil der Partikel (BERNARD et al., 2000; HARVATINE et al., 2002; TAJAJ et al., 2004). Somit entstehen je nach Lokalisation und hauptsächlich nach dem Ausprägungsgrad der Schichten die verschiedenen Pools der festen Phase der Digesta innerhalb des Reticulorumens. Es kann zwischen zwei wichtigen Pools der festen Digesta im Reticulorumen unterschieden werden: einem dorsalen und einem ventralen Pool mit unterschiedlichen chemischen und mikrobiologischen Eigenschaften (MARTIN et al., 1999; MICHALET-DOREAU et al., 2001; ÖLSCHLÄGER et al., 2006). Es gibt jedoch Hinweise, dass sich die Partikelverteilung beider Pools bei Kühen angleicht, die ein relativ hohes Fütterungsniveau erhalten (WEIDNER und GRANT, 1994; ALLEN und GRANT, 2000). Bei niederem Fütterungsniveau, bis zum 1,7-fachen des Erhaltungsbedarfes, weist der dorsale Pool einen signifikant höheren Anteil an groben Partikeln verglichen mit dem ventralen Pool auf (OKINE und MATHISON, 1991).

Nach REID (1984) werden frische Futterbissen in Abhängigkeit von der momentanen Phase des Kontraktionszyklus zunächst entweder in der Haube oder oberhalb des kranialen Pfeilers im Pansen abgelegt. Durch die Haubenpansenmotorik wird der Futterbissen nach dorsal geschoben und befindet sich dann in einer dichten Fasermatte von grob strukturierten Futterpartikeln im dorsalen Pansensack. Wiedergekaute Boli werden dagegen im dorsalen Bereich des kranialen Pansensacks

abgesetzt und mit der nächsten Haubenkontraktion über den vorderen Pansenpfeiler befördert (REID, 1984). Im ventralen Pansen oder im kaudodorsalen Blindsack lösen sich frisch aufgenommene Bissen normalerweise nach 5 bis 15 Minuten auf, während wiedergekaute Bissen schneller zerfallen (REID, 1984). Die einzelnen Futterpartikel sind nun den unterschiedlichen Kräften und Einflussfaktoren zugänglich, die ihren Aufenthaltsort im Reticulorumen und die Zeit ihrer Passage bestimmen.

Die Faserschicht im dorsalen Bereich des Pansens wird auch Floß oder Filterbett genannt, da sie aus leichten, frisch aufgenommenen Partikeln gröberer, faseriger Struktur des Raufutters ein schwebendes Netzwerk im Pansen bildet (FAICHNEY, 1993; KENNEDY und DOYLE, 1993). Die frischen Partikel sind groß, und ihre funktionelle spezifische Dichte (FSG) ist bedingt durch luftgefüllte Hohlräume unter 1,0 g/ml (KASKE, 2000). In der Faserschicht befinden sich aber auch kleine Partikel mit einer FSG über 1,0 g/ml. NEEL et al. (1995) fanden in ihren Studien heraus, dass die Faserschicht und der ventrale Pansen gleiche Anteile von Partikeln niedriger FSG < 0.9 g/ml (ca. 10 %) enthalten. Die dorsale Faserschicht enthält jedoch nach NEEL et al. (1995) mehr Partikel mit einer FSG zwischen 0,9 und 1,2 g/ml im Gegensatz zum ventralen Pansen, welcher einen höheren Anteil von Partikeln mit einer FSG > 1,2 g/ml enthält. Die Durchmischung der Futterpartikel mit Speichel und anderen Flüssigkeiten im Pansen kann die Schwimmfähigkeit, infolge der Hydrierung der Partikel, für eine bestimmte Zeit reduzieren (HOOPER et al., 1985, SUTHERLAND; 1988). Danach wird die Flotation, besonders der groben Partikel, durch die Füllung der Hohlräume mit Fermentationsgasen wieder gefördert (VAN SOEST, 1994).

Partikel mit hoher FSG sinken ab in einen Bereich, der von WELCH (1982) als intermediäre Schicht bezeichnet wird. Er konnte mit Hilfe von Gewichten diese Schicht zwischen der Fasermatte (Hardpack) dorsal und der flüssigen Schicht ventral feststellen. In der intermediären Schicht befinden sich kleine und große Partikel, welche noch abbaubare Zellwandbestandteile enthalten, aber auch kleine Partikel, die bis auf ihre unverdaulichen Reste abgebaut sind und auf den Pansengrund absinken. Die zuerst genannten Partikel können diese Schicht wieder nach dorsal in die Fasermatte verlassen (HOOPER et al., 1985; WATTIAUX, 1992). Jedoch soll der intermediäre Pool nur kurz nach der Fütterung ausgeprägt sein. TAJAJ et al. (2004) untersuchten den intermediären Pool der Digesta, etwa 30 cm unterhalb der dorsalen Gasblase, bei Milchkühen eine Stunde vor und an drei Zeitpunkten nach der

Morgenfütterung und stellten dabei fest, dass keine systematischen Unterschiede im intermediären Pool gegenüber den dorsalen und ventralen Pools hinsichtlich der Fermentation und Partikelgrößenzusammensetzung vorlagen. Es konnte ein solcher intermediärer Pool nicht eindeutig vom dorsalen oder ventralen Pool abgegrenzt werden. Der intermediäre Pool stellt einen flexiblen Pool innerhalb der Digesta dar, der sowohl Eigenschaften des dorsalen als auch des ventralen Pools innehaben kann. Dies weist wiederum auf die ausgeprägte Dynamik der Pools der festen Digesta hin, neue Partikel dringen in Form von Bissen oder Einzelpartikeln ein, und andere verändern sich ständig zeitabhängig und werden ausgetauscht. Daher kann auch die relative Größe der Pools sehr variabel sein, wobei Fütterungszeit und Fütterungsregime eine entscheidende Rolle spielen (WEIDNER und GRANT, 1994; BERNARD et al., 2000; POPPI et al., 2001).

Neuere Untersuchungen bei *ad libitum* gefütterten Hochleistungsmilchkühen ergaben, dass die geschichteten Futtermassen als Frischmasse 75 bis 92 % des gesamten Pansenvolumens in Anspruch nehmen können (ROBINSON et al., 1987; OBA und ALLEN, 2000, HARVATINE et al., 2002; ZEBELI et al., 2005b). Die von der Fasermatte sich lösenden Partikel sedimentieren und bilden den ventralen Pool der festen Phase im ventralen Bereich des Reticulorumens (POPPI et al., 2001; LUND et al., 2006). Im ventralen Pool befinden sich hauptsächlich feine, weitgehend abgebaute, aber auch relativ grobe, noch abbaubare Partikel (ALLEN UND GRANT, 2000). Die Partikel im ventralen Pool weisen jedoch generell eine höhere Wahrscheinlichkeit zum Abfluss auf als die Partikel, die in der Faserschicht integriert sind (POPPI et al., 2001). FAICHNEY (1986 und 2006) vertritt die Auffassung, dass sich die feinen Partikel nicht nur im ventralen, sondern auch im dorsalen Pool des Reticulorumens in Abhängigkeit von der Konsistenz der Faserschicht befinden können und somit zwei unterschiedliche Gruppen feiner Partikel im Reticulorumens zu erkennen sind. Der Autor geht davon aus, dass die ventrale Gruppe der feinen Partikel schnell aus dem Reticulorumens abfließen kann. Dies bestätigte auch KASKE (2000), der den feinen Partikeln im ventralen Pool mit einer FSG zwischen 1,2 und 1,4 g/ml eine höhere Wahrscheinlichkeit der Passage zuspricht. Eine weitere relativ große Gruppe der kleinen, potenziell passagefähigen Partikel ist an größere Partikel im dorsalen Pool assoziiert und kann daher nicht in den ventralen Pool sedimentieren (Filterbetteffekt). Dies zeigt, dass die Qualität und Konsistenz der Faserschicht die

Zeit für die Verdauung von feinen, sonst passagefähigen Partikeln im Reticulorumen mit Hilfe des Filterbett-Effekts erhöht.

Die Flüssigkeit im Pansen stellt das Transportmedium für Nährstoffe, flüchtige Fettsäuren und kleine Partikel dar (VAN SOEST, 1994). Der Flüssigkeitsgehalt der Digesta nimmt von dorsal nach ventral zu (KOVÁCS, 1996). Die Fasermatte im dorsalen Bereich wird nur während der Kontraktionsphase des Pansens mit Flüssigkeit durchspült (JEROCH et al., 1999). Dabei wird zum einen die Vernetzung der Partikel im Filterbett unterstützt, zum anderen werden kleine Partikel mit geringen Fermentationsgasanhaftungen herausgespült (SUTHERLAND, 1988).

Die gesamte Flüssigkeit im Reticulorumen kann in die freie ruminale Flüssigkeit (FRL) und die an Partikel assoziierte Flüssigkeit (PARL) differenziert werden, die als locker gebundene bzw. als interstitielle Flüssigkeit auftritt (TAF AJ et al., 2004). Nach BERNARD et al. (2000) kommt der PARL eine wichtige Rolle bei der Bewegung von Partikeln innerhalb des Reticulorumens und bei ihrer anschließenden Schichtung in verschiedene Horizonte zu. Die FRL ist der Hauptbestandteil der flüssigen Phase. Mehrere Autoren (JEROCH et al., 1999; LYND et al., 2002) bezeichneten den FRL-Anteil als sehr wichtig für die ständige Pufferung der festen Phase, die Förderung der Fermentation durch die Umspülung der Partikel und die Ausbildung eines so genannten Mikroorganismen-Enzym-Zellulose-Komplexes. Die FRL zusammen mit kleinen flotierenden Futterpartikeln, die von den geschichteten Futtermassen im Reticulorumen abgetrennt werden, bezeichneten ROBINSON et al. (1987) bei manueller Pansenentleerung als schöpfbare Flüssigkeit („bailable liquid“). Es gibt jedoch einen starken Einfluss des Fütterungsniveaus auf die Menge an schöpfbarer Flüssigkeit. So berichteten ROBINSON et al. (1987) von einem sehr geringen Anteil an schöpfbarer Flüssigkeit von 3,8 % im Pansen, wenn das Fütterungsniveau von 6 auf 24 kg Trockenmasse anstieg. KOVÁCS et al. (1996) beobachteten eine Abnahme der schöpfbaren Flüssigkeit von 30 über 23,6 auf 12,5 kg, wenn die Futtermenge bei Ochsen von 6,2 über 9 auf 12 kg erhöht wurde. Des Weiteren stellten die Autoren fest, dass mit zunehmendem Fütterungsniveau der Trockenmassegehalt in der schöpfbaren Flüssigkeit um 1,1 % zunahm. Darüber hinaus berichteten LE LIBOUX und PEYRAUD (1999), dass ein Mahlen von Luzerneheu auf 4 mm die Viskosität der flüssigen Phase erhöhte und dadurch die Passagerate der flüssigen Phase um 1 % pro Stunde erniedrigte. Die Menge der PARL ist von der Wasserbindungskapazität der Partikel im Pansen abhängig. Nach FROETSCHEL und AMOS (1991) stellt die

Wasserbindungskapazität eine physikalische Eigenschaft der Faser dar. TEIMOURI YANSARI et al. (2004) berichteten, dass die Abnahme der Partikellänge bei einem Luzerneheu von 19 über 10 auf 2 mm dessen Wasserbindungskapazität von 2,9 über 2,8 auf 2,7 g Wasser/g Trockenmasse verringerte. Ferner fanden die Autoren eine deutlich höhere Wasserbindungskapazität für Maissilage (3,85 g Wasser/g TM) im Vergleich zu Luzerneheu.

Die Erfassung der Mächtigkeit bzw. die Charakterisierung der Konsistenz der Faserschicht ist im Vergleich zu anderen Parametern der Pansenphysiologie schwer durchführbar. Die ersten Schritte zur Charakterisierung des Ausmaßes und der Konsistenz der Faserschicht wurden von WELCH (1982) gemacht, indem er eine Methode bei Milchkühen mit großer Pansenfistel vorstellte. Diese Methode verwendet ein Gewicht bzw. einen Körper, der zunächst in den ventralen Pansen gelegt wird. Danach wird er mit Hilfe eines Gegengewichts aus dem Pansen herausgezogen. Die Aufstiegsrate (cm/min) oder die Aufstiegszeit (min), die dieser Körper angesichts des Widerstands durch die Faserschicht bis zur Fistelöffnung benötigt, wird als Kenngröße für die Konsistenz der Faserschicht definiert. Je langsamer die Aufstiegsrate ist, desto fester ist die Faserschicht.

Einflussfaktoren auf die Ausbildung und Aufrechterhaltung der Schichtung im Pansen sind neben dem Gehalt an Zellwandbestandteilen und der Partikelgröße (TAF AJ, 1996) die Pflanzenart (WILSON, 1993; KENNEDY, 2006), das Blatt-Stängel-Verhältnis von Futterpflanzen (SUTHERLAND, 1988) und das Fütterungsniveau (KENNEDY und DOYLE, 1993, KOVÁCS, 1996). Ein hoher Krafffutteranteil beeinflusst die Ausbildung der Faserschicht im Pansen negativ, da es zu keiner deutlichen Trennung der festen und flüssigen Phase mehr kommt. Darüber hinaus erhöht sich durch hohe Krafffuttergaben die Viskosität der Digesta, wodurch sich die Separationseffekte im Pansen verschlechtern (VAN SOEST, 1994).

In mehreren Untersuchungen wurde bestätigt, dass bei Fütterung von fein gemahlenem Raufutter die stabile Faserschicht im Pansen nicht aufgebaut werden kann (WESTON und KENNEDY, 1984; WESTON et al., 1989; KENNEDY und DOYLE, 1993). ALLEN und GRANT (2000) berichteten, dass die Zugabe von 19 % eines lang gehäckselten Luzerneheus in einer auf kurz gehäckselter Luzernesilage basierenden Gesamtmischung bei Milchkühen die Aufstiegsrate nach WELCH (1982) des Körpers 3 Stunden nach der Morgenfütterung signifikant von 12 auf 7 cm/min erniedrigte, was auf eine festere Faserschicht hinwies. WEIDNER und

GRANT (1994) konnten zeigen, dass durch die Zugabe von 20 % eines grob gehäckselten Luzerneheus zu einer Ration mit 25 % Sojaschalen die Konsistenz der Faserschicht verbessert wurde (7,6 vs. 9,9 cm/min). BAL et al. (2000) untersuchten den Einfluss der Partikellänge einer Maissilage mit Körnernachzerkleinerung bei frühlaktierenden Milchkühen. Die Messung der Konsistenz der Faserschicht 5 Stunden nach der Morgenfütterung zeigte, dass mit Reduzierung der Partikellänge von 19 über 14,5 auf 9,5 mm die Festigkeit der Faserschicht signifikant abnahm (Aufstiegszeit: 11,1 vs. 8,2 vs. 6,4 min). Die Autoren vermuteten, dass der Rückgang grober Partikel in der Digesta ein Grund dafür gewesen sein könnte. In einer Untersuchung an Milchkühen ermittelten ZEBELI et al. (2005b), dass die Aufstiegsrate des Körpers durch die Schichten im Pansen negativ mit der NDF-Aufnahme, insbesondere mit der NDF des Heus und der peNDF, korrelierte. Es gab jedoch eine positive Korrelation zwischen der Aufstiegsrate und der Turnover-Rate der Trockenmasse der festen Phase des Panseninhalts, was auf eine Steigerung der Turnover-Rate der festen Digesta bei verminderter Stabilität der Faserschicht hinweist.

Die Wirkungsweise der Pansenmatte ist trotz aller Bemühungen noch nicht gänzlich geklärt. ZEBELI et al. (2006a) stellten in einer Meta-Analyse von 6 verschiedenen Studien fest, dass mit der Erhöhung der NDF-Aufnahme aus dem Grundfutter die Aufstiegsrate des Körpers linear zurückgeht, was auf eine festere Konsistenz der Faserschicht hinweist. Die Autoren konnten 44 % der Streuung mit der Versorgung der Kühe mit Strukturfutter erklären. Der Rest der ungeklärten Streuung (56 %) kann höchstwahrscheinlich mit Effekten der Partikellänge und der variierenden ruminalen Fermentierbarkeit des Grundfutters erklärt werden (ZEBELI et al., 2006a).

2.3.5 Effekte der Partikellänge auf die Pansenfermentation

Nach TERRY et al. (1969) und PFEIL et al. (2003) ist für die zellulolytische Aktivität der Mikroorganismen ein pH-Wert im Reticulorumen von 6,5 – 7,0 als optimal anzusehen. Um dem Risiko einer subakuten Pansenacidose vorzubeugen, sollte der mittlere pH-Wert nicht unter 6,16 liegen. Außerdem darf der Zeitraum mit einem pH-Wert unter 5,8 nicht länger als 5,24 Stunden sein. Diese Vorgaben können mit einem peNDF_K-Gehalt von etwa 31,2 % TM in der Ration erzielt werden (ZEBELI et al.,

2008). MOURINO et al. (2001) berichteten aus *in vitro*-Untersuchungen, dass die mikrobielle zellulolytische Aktivität unter einem pH-Wert von 6,0 deutlich gestört und die Faserverdauung reduziert wurde. PITT und PELL (1996) gehen von einem Schwellenwert von 6,1 aus.

Eine akute Acidose bei der Hochleistungsmilchkuh wird mit einem pH-Wert von 5,0 bis 5,2 definiert, eine subakute Pansenacidose dagegen mit einem pH-Wert von 5,2 bis 5,6 (OWENS et al., 1998). GARRETT et al. (1999) schlagen vor, dass eine Hochleistungsmilchkuhgruppe als SARA-gefährdet gilt, wenn mehr als 25 % der Kühe 90% der Zeit einen pH-Wert unter 5,5 haben, wogegen BEAUCHEMIN et al. (2003) bei einem mittleren pH-Wert von unter 5,8 von SARA-Bedingungen ausgehen.

Wiederkäuer besitzen ein gut entwickeltes System, um über Futteraufnahme, Produktion endogener Puffer, Anpassung der Mikrobiotika und Absorption von flüchtigen Fettsäuren den pH-Wert im Pansen in einem physiologischen Bereich zu halten (KRAUSE und OETZEL, 2006). Hierzu ist ein bestimmter Gehalt an Faser notwendig (FIRKINS et al., 2001). Die beiden wichtigsten Faktoren, um den pH-Wert im Pansen zu regulieren, sind die Höhe des Speichelflusses und die Absorptionsrate der flüchtigen Fettsäuren (KAUFMANN et al., 1973; KRAUSE et al., 2002b; MAEKAWA, 2002). Es wird davon ausgegangen, dass die Puffer im Speichel 40 % der Fermentationssäuren neutralisieren können (ALLEN, 1997). Übersteigt die Fermentationssäureproduktion die Pufferkapazität und Absorptionsrate, so ist eine Kompensation nicht möglich (KRAUSE und OETZEL, 2006). Dies kann durch hohe Krafffuttermengen (SAUVANT et al., 1999), die Krafffutterart, den Fasergehalt (DE BRABANER 1999a und b) oder durch eine hohe Futteraufnahme (STONE, 2004) ausgelöst werden. Die unterschiedliche Absorptionsgeschwindigkeit der flüchtigen Fettsäuren ist zu berücksichtigen, undissoziierte Säuren werden schneller absorbiert als dissoziierte (STRYER, 1999).

KAUFMANN und ORTH (1966) stellten beim Einsatz von pelletiertem Heu gegenüber unzerkleinertem eine signifikant verminderte Speichelsekretion und damit verbunden einen deutlich tieferen pH-Wert im Pansen fest. In einer ähnlichen Versuchsanstellung stellten VOIGT et al. (1978) eine temporär erhöhte Bildung an flüchtigen Fettsäuren fest, im Reticulorumen entstand eine hohe Azidität.

Wie aus der Literatur hervorgeht, führte eine intensive Zerkleinerung des Grundfutters in der Regel zu einer deutlichen pH-Wert-Absenkung im Pansen (ALWASH und THOMAS, 1971; CHENG und HIRONAKA, 1973; LESSARD und

FISHER, 1980; SHAVER et al., 1986; WOODFORD und MURPHY, 1988; GRANT et al., 1990a; BOURQUIN et al., 1994; KUEHN et al., 1997; LE LIBOUX und PEYRAUD, 1999; TAF AJ et al., 1999; SOITA et al., 2000). Der pH-Wert bleibt länger unter 6, die täglichen pH-Wert-Schwankungen im Reticulorumen werden größer (CHENG und HIRONAKA, 1973; KNOWLTON et al., 1996; CALSAMIGLIA et al., 2002; BEAUCHEMIN et al., 2003). LE LIBOUX und PEYRAUD (1999) beobachteten einen längeren Zeitraum, in dem der pH-Wert unter 6 lag (12,4 vs. 8,0 h/d). Vor allem in den ersten Stunden nach der Fütterung wird ein pH-Wert-Tief erreicht (EMMANUEL et al., 1969; TAF AJ et al., 1999; YANG et al., 2001a; RUSTOMO et al., 2006). Der pH-Wert im Pansen ist von der Partikellänge, aber auch von anderen Faktoren wie der Pflanzenart (STENSING und ROBINSON, 1997), der Konservierungsform des Grundfutters (TELLER et al., 1990), der Aufbereitungsform des Krafftutters (MERTENS, 1997) und der Fütterungsfrequenz (PITT und PELL, 1997) abhängig. Die pH-Wert-Schwankungen waren ausgeprägter (1,30 vs. 0,83), wenn das zerkleinerte Futter nur zweimal anstatt mehrmals vorgelegt wurde (LE LIBOUX und PEYRAUD, 1999).

Demgegenüber ist der Einfluss des Häckselns von Raufutter auf den pH-Wert im Pansen gering (RODE und SATTER, 1988; SUSMEL et al., 1991; LEWIS et al., 1999; YANG et al., 2002; ONETTI et al., 2003; PLAIZIER, 2004). LU (1987) stellte beim Einsatz von Grassilage unterschiedlicher mittlerer Partikellänge (2,38 vs. 3,87 mm) keinen Einfluss auf den pH-Wert im Pansen fest. FISCHER et al. (1994) konnten bei TMR-Fütterung mit unterschiedlicher Partikellänge der Luzernesilage (4,6 vs. 9,5 mm) keine Veränderung des pH-Wertes im Pansen feststellen. Einen signifikanten Rückgang des pH-Werts (6,0 vs. 5,9 vs. 5,3) im Pansen beobachteten GRANT et al. (1990b) bei sinkender Partikellänge (9,5 vs. 7,2 vs. 4,8 mm) einer Luzernesilage in einer Gesamtmischung. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen TEIMOURI YANSARI et al. (2004): ein rückläufiger pH-Wert (6,6 vs. 6,1) bei Zerkleinerung von Luzerneheu und Gersteganzpflanzensilage in einer TMR (10,0 vs. 2,0 mm).

Durch das Mahlen bzw. Pelletieren des Grundfutters zeigte sich eine Verschiebung des Fettsäuremusters zugunsten der Propionsäure (PIATKOWSKI et al., 1974; MURDOCH und HODGSON, 1977; SANTINI et al., 1983; GRANT et al. 1990a, KNOWLTON et al 1996; LE LIBOUX und PEYRAUD, 1998; KRAUSE 2002a; RUSTOMO et al., 2006). Dies drückt sich in einem engeren Acetat-Propionat-

Verhältnis (C_2/C_3) aus. Keinen Einfluss des Mahlens auf die Fettsäurezusammensetzung beobachteten CALLISON et al. (2001). Durch das Häckseln von Raufutter wurde eine Verschiebung der flüchtigen Fettsäuren zugunsten von Propionat erst bei Partikellängen unter 5 mm nachgewiesen (SANTINI et al. 1983; GRANT et al., 1990b; SUSMEL et al., 1991; LEONARDI et al., 2005), darüber war kein Effekt festzustellen (YANG et al., 2001a; SCHWAB et al., 2002; KONONOFF und HEINRICHS, 2003c; YANG und BEAUCHEMIN, 2006c; BHANDARI et al., 2007). Das Verhältnis von Acetat zu Propionat lag bei Untersuchungen von KNOWLTON et al. (1996) in einem Bereich von 2,1 bzw. 2,4. Ähnliche Ergebnisse erzielten LE LIBOUX und PEYRAUD (1999): Bei Fütterung einer Totalmischration mit Knaulgras und Maissilage als Grundfutterkomponenten (31 % KF-Anteil) kam es bei Verringerung der Partikellänge des Grundfutters von 12,0 auf 4,2 mm zu einer Reduzierung des C_2/C_3 -Verhältnis (3,7 vs. 2,7). CLARK und ARMENTANO (1997) ermittelten bei Abnahme der mittleren Partikellänge von Luzerneheu (6,5 vs. 2,6 mm) den gleichen Trend (C_2/C_3 : 2,9 vs. 2,1). Mit Erhöhung der Partikellänge von Maissilage (4,8 vs. 10,6 vs. 16,5 vs. 22,3 mm) in einer Gesamtmischration mit 40 % Krafffutteranteil beobachteten KONONOFF und HEINRICHS (2003d) keine Veränderung des C_2/C_3 -Verhältnis ($\pm 2,6$) und des pH-Werts ($\pm 6,4$).

2.3.6 Effekte der Partikellänge auf die Passage

Die Wahrscheinlichkeit der Passage von Teilchen aus dem Pansen ist umgekehrt proportional zu ihrer Größe (POPPI et al., 1980). Selbst die kleinsten Teilchen weisen im Allgemeinen jedoch niedrigere Passageraten auf als die Pansenflüssigkeit (FAICHNEY, 1986), was vermutlich auf dem Filterbetteffekt beruht. Nach MURPHY und KENNEDY (1993) lässt sich die Partikelpassage aus dem Reticulorumen durch das Verhältnis des natürlichen Logarithmus der Passagerate zu der Siebweite, die die Partikel bei der Siebung noch passieren können, beschreiben. Ähnliche exponentielle Beziehungen zwischen Passagerate und Partikellänge beobachtete WESTON (1983). Keine exponentielle Beziehung ermittelten dagegen DIXON und MILLIGAN (1985). Sie beobachteten jeweils gleiche Passageraten bei kleinen und mittleren Partikeln. POPPI et al. (1980) führten den Begriff der kritischen Partikelgröße ein. Die kritische Partikelgröße ist ein Schwellenwert, von dem die

Wahrscheinlichkeit der Passage abgeleitet werden kann. Partikel über diesem Schwellenwert sollen eine geringe, solche darunter eine hohe Wahrscheinlichkeit der Passage aufweisen. Sie soll bei Rindern und Schafen bei 1,18 mm liegen (POPPI et al., 1980 und 1985). FAICHNEY (1993) schloss jedoch aus eigenen Ergebnissen und aus Daten von POND et al. (1984), dass die kritische Partikelgröße bei Rindern etwas darüber, bei Schafen etwas darunter liegt. Nach mehreren Untersuchungen bei Rindern und Schafen wies VAN SOEST (1994) jedoch darauf hin, dass die kritische Partikelgröße nicht konstant ist, sondern sich in Abhängigkeit von der Ration bzw. dem Fütterungsniveau ändern kann, was auch den Ergebnissen von TAJAJ et al. (2004 und 2005) entspricht. Die Regulation der Passage nach der Größe kann dadurch aber kaum erklärt werden, denn die Größe der Hauben-Psalter-Öffnung erlaubt sogar die Passage von Teilchen über 1 cm Durchmesser, was auch in etwa der maximalen Länge der im Kot beobachteten Teilchen entspricht (KENNEDY und DOYLE, 1993). Nach dem Konzept von SUTHERLAND (1988) ist die funktionelle spezifische Dichte (FSG) in Form der Sedimentations- und Flotationseigenschaften der Partikel entscheidend, um den Partikeln eine günstigere Position im Reticulorumen für die Passage durch die Psalteröffnung zu ermöglichen. Der Autor vertritt die Auffassung, dass mit fortschreitender Verdauung die Dichte und Sedimentationsfähigkeit der Partikel zunimmt, während die Auftriebskraft abnimmt, was für die Passage entscheidend ist. Die Wirkung der Partikelgröße auf die Passage aus dem Reticulorumen ist in Zusammenhang mit der Dichte (FSG) der Partikel zu sehen. WELCH (1986) fand in Versuchen mit Plastikteilchen heraus, dass Partikel mit Werten zwischen 1,2 und 1,4 g/cm³ maximale Passageraten aufweisen. Leichtere Partikel sedimentieren kaum in die ventrale Pansenregion, aus der der Weitertransport in die Haube erfolgt, bzw. in den ventralen Bereich der Haube ab, aus dem der Abfluss in das Omasum erfolgt. Aber auch Teilchen, die zu schwer sind (1,4 - 1,7 g/cm³), weisen eine verzögerte Passage auf, da sie längere Zeit in den ventralen Bereichen liegen bleiben, ohne weitergegeben zu werden. Die FSG von Futterpartikeln ist im Gegensatz zu den Plastikteilchen, mit denen viele Versuche durchgeführt wurden, keine statische Größe, sondern verändert sich während ihrer Verweilzeit im Reticulorumen.

Da sowohl die Partikelzusammensetzung als auch deren physikalische Eigenschaften (Größe und Dichte) im dorsalen und ventralen Pool im Reticulorumen gleich sind (WEIDNER und GRANT, 1994; ALLEN und GRANT, 2000; TAJAJ et al.,

2004), scheint das Konzept von SUTHERLAND (1988) für Hochleistungskühe nicht ausreichend zu sein.

POPPI et al. (2001) stellten dagegen ein „raft“-Modell mit zwei Partikelpools vor, einem dorsalen Pool bzw. der Faserschicht und einem ventralen Pool. Dieses Modell berücksichtigt den zeitabhängigen reversiblen Fluss der Partikel vom ventralen Pool zum Filterbett, wobei Grundfutter von guter Qualität auf Grund einer höheren Wahrscheinlichkeit zum reversiblen Fluss in das Filterbett vorteilhafter ist (TAF AJ et al., 2004). Nach POPPI et al. (2001) bildet die Faserschicht einen relativ starren Pool aus. Für Partikel, die sich in dieser Faserschicht befinden, ist es schwer, sich herauszulösen. Sind sie jedoch einmal in den ventralen Bereich des Pansens abgesunken, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass sie das Reticulorum verlassen, und die Wahrscheinlichkeit gering, dass sie wieder ein Bestandteil der Faserschicht werden. Die Funktion der Faserschicht bei der Kontrolle und Regulation der Passage besteht hauptsächlich in einer selektiven Retention der Partikel (LUND et al., 2006). Der Abfluss der Partikel, auch derer kleiner als 1,18 mm, die noch abbaubares Substrat enthalten, wird durch die Integration in die Faserschicht verhindert. Durch eine längere Retentionszeit in der Faserschicht werden die Partikel intensiver abgebaut, was mit einer höheren Fermentationsintensität und Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen in der Faserschicht begründet wird (MARTIN et al., 1999, TAF AJ et al., 2004; ÖLSCHLÄGER et al., 2006). Je fester die Konsistenz der Faserschicht ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Partikel ins Omasum abfließen, und desto höher ist ihre Wahrscheinlichkeit zum reversiblen Fluss in die Faserplatte (POPPI et al., 2001). Insbesondere Partikel, welche noch abbaubare Zellwandbestandteile enthalten, können diese Schicht durch Änderung der FSG wieder nach dorsal in die Faserplatte verlassen, da cellulolytische Mikroorganismen beim Abbau der Faser Fermentationsgase bilden. Diese Fermentationsgase lagern sich an die Partikel oder reichern sich in deren Hohlräumen an und verleihen ihnen Auftrieb (HOOPER et al. 1985; WATTIAUX, 1992). Eine Abnahme der Stabilität der Faserschicht führt zu einem schnelleren Abfluss der Futterpartikel zum Omasum, deren potenziell abbaubares Substrat nur unvollständig im Reticulorum abgebaut wurde (LUND et al., 2006).

Eine Untersuchung mit Milchkühen von TEIMOURI YANSARI et al. (2004) zeigte, dass mit Reduzierung der Partikellänge (19 bzw. 10 vs. 2 mm) von Luzernesilage in einer Gesamtmischung die ruminale Passagerate (2,9 bzw. 3,0 vs.

3,3 %/h) signifikant zunahm und die ruminale Verweilzeit (34,1 bzw. 33,4 vs. 30,7 h) abnahm, während die postruminale Passagerate (15,8 h) nicht beeinflusst wurde. CAO et al. (2007) stellten fest, dass sich mit Verringerung der mittleren Partikellänge (6,0 vs. 4,9 mm) von Luzerne- und Maissilage in einer TMR die fraktionelle ruminale Passagerate der Flüssigkeit reduzierte (12,0 vs. 10,9 %/h).

Im Gegensatz dazu konnten BEAUCHEMIN und YANG (2005) bei Untersuchungen mit Milchkühen keinen Einfluss der Partikellänge auf die fraktionelle Passagerate von Flüssigkeit und Partikeln aus dem Reticulorumen bei abnehmender Partikellänge (19,1 vs. 11,0 vs. 6,0 mm) feststellen. Die mittlere fraktionelle Passagerate von Flüssigkeit und Partikeln betrug 10,9 und 3,1 % pro Stunde. Die postruminale Transitzeit war für die Partikellänge 19,1 mm tendenziell kürzer im Vergleich zu 11,0 bzw. 6,0 mm (9,2 vs. 10,3 bzw. 11,2 h). Dies ist im Einklang mit den Ergebnissen von TAJAJ et al. (2001b). Die Autoren stellten bei abnehmender Partikellänge eine Erhöhung der postruminalen Passagerate fest, während die ruminale Passagerate nicht beeinflusst wurde. BEAUCHEMIN und YANG (2005) erklärten den mangelnden Effekt der Partikellänge auf die ruminale Passagerate mit einer Erhöhung der Kauaktivität mit zunehmender Partikellänge. Von FERNANDEZ et al. (2004) wurde berichtet, dass eine größere Partikellänge zu einer höheren Effizienz der Partikelzerkleinerung beim Fressen führt als eine kleine Partikellänge. Die Autoren fütterten eine auf Maissilage basierende TMR mit zwei verschiedenen Partikellängen (5 vs. 13 mm) und mit einem Krafftfutteranteil von 25 % an Milchkühe. Der Vergleich der Partikelgrößenverteilung der frisch abgeschluckten Futterbissen zeigte keinen Unterschied zwischen den Behandlungen. Hinsichtlich der Effizienz der Partikelzerkleinerung konnten die Autoren feststellen, dass die Kautätigkeit und die Mikroorganismenaktivität im Pansen ergänzend wirken, wodurch die Futterpartikel letztlich eine psalterreife Größe erhalten.

Ausgewählte Untersuchungen der letzten Jahre zum Einfluss der Partikellänge von verschiedenen Grundfuttermitteln in einer TMR auf Parameter der Partikel- und Flüssigkeitspassage sind in Tabelle 2.4 dargestellt.

2 Literaturübersicht

Tabelle 2.4. Literaturübersicht über den Einfluss der PL des Grundfutters in einer TMR auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage (Lsmeans).

Quelle ¹	Grundfutter	GF ² , % i. T.	TPL ³ (mm)	Flüssigkeit		Partikel	
				k _s ⁴	TMRT ⁵	k _s	TMRT
KRAUSE et al. (2002a)	Luzernesilage	39,0	9,0	11,4	k.a.	4,1	50,6
		39,0	19,0	14,2	k.a.	4,3	43,3
KONONOFF und HEINRICHS (2003c)	Luzernesilage	50,0	4,8	16,5	k.a.	4,1	k.a.
		50,0	10,6	16,2	k.a.	4,4	k.a.
		50,0	16,5	17,2	k.a.	4,0	k.a.
		50,0	22,3	15,7	k.a.	4,1	k.a.
YANG et al. (2002)	Luzernesilage+	40,0	4,0	8,8	k.a.	4,0	37,3
	Luzerneheu	40,0	10,0	9,0	k.a.	4,1	42,7
BEAUCHEMIN und YANG (2005)	Maissilage	42,0	6,0	11,6	24,9	3,6	56,1
		42,0	11,0	10,9	24,0	2,7	57,7
		42,0	19,1	10,3	23,0	3,1	52,0
YANG und BEAUCHEMIN (2006b)	Ganzpflanzen- Gerstesilage	47,0	4,8	9,5	25,3	3,9	44,0
		47,0	7,2	9,0	24,3	3,8	40,7
		47,0	9,5	10,0	24,7	4,5	37,1
BAL et al. (2000)	Luzernesilage+	50,0	9,5	k.a.	k.a.	6,6	k.a.
	Maissilage	50,0	14,5	k.a.	k.a.	5,8	k.a.
		50,0	19,5	k.a.	k.a.	5,9	k.a.
CAO et al. (2007)	Luzernesilage+	61,0	4,9*	10,9 ^b	k.a.	6,9	k.a.
	Maissilage	61,0	6,0*	12,0 ^a	k.a.	5,8	k.a.
TEIMOURI - YANSARI et al. (2004)	Luzerneheu +	40,0	2,0	k.a.	k.a.	3,3	52,1 ^b
	Maissilage	40,0	10,0	k.a.	k.a.	3,0	55,6 ^b
		40,0	19,0	k.a.	k.a.	2,9	62,3 ^a
LEONARDI et al. (2005)	Maissilage +	50,0	4,35*	10,3	k.a.	4,1	k.a.
	Ganzpflanzen-	50,0	4,46*	10,1	k.a.	4,0	k.a.
	Hafersilage	50,0	5,19*	10,8	k.a.	4,6	k.a.
		50,0	5,39*	9,9	k.a.	3,9	k.a.
		50,0	6,68*	9,7	k.a.	4,5	k.a.

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

k.a. Keine Angabe.

¹ Nur Untersuchungen mit ad libitum TMR-Fütterung.

² Grundfutteranteil in der Ration.

³ theoretische Partikellänge (* mittlere Partikellänge).

⁴ Fraktionelle Passage aus dem Reticulorumen (%/h).

⁵ TMRT = Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt (h).

3. Material und Methoden

3.1 Grassilage-Versuch

3.1.1 Versuchsschema

In diesem Versuch wurden drei Stufen der theoretischen Partikellängen (PL) (Kontrolle lang ca. 25 mm, kurz 11 mm und fein 5,5 mm) einer Grassilage (GS) in einem randomisierten Block-Versuch (randomized block design) sequentiell geprüft, so dass alle Tiere dieselbe Behandlung (PL) innerhalb eines Versuchsabschnittes (Periode) bekamen. Die Sequenz des Behandlungsangebots wurde randomisiert. Aus technischen Gründen konnte in einer Periode immer nur eine Variante der Grassilage an die Kühe verfüttert werden. Da mit pansenfistulierten Tieren nur begrenzte Stichprobenumfänge möglich sind, wurden für die Untersuchungen der Parameter der Partikelkinetik im Reticulorumen für alle Parameter Messungen an zwei Tagen vorgenommen, die bei der statistischen Auswertung als wiederholte Messungen betrachtet wurden. Das Versuchsschema ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1. Versuchsschema

Versuchsabschnitt	I	II	III
Anzahl der Tiere mit/ ohne Pansenfistel	4/9	4/9	4/9
PL der GS	25 mm	5,5 mm	8,1 mm

Die Versuchstiere wurden 11 Tage an die jeweilige Ration adaptiert. Daraufhin folgte die 18-tägige Messphase, in der bei allen Tieren Futteraufnahme und Milchleistung erfasst wurden. Bei den vier pansenfistulierten Milchkühen wurden Kauaktivität und Passagerate in den ersten 7 Tagen erfasst. Danach wurden Partikelgrößenverteilung und funktionelle spezifische Dichte der Digesta an drei pansenfistulierten Kühen an vier aufeinander folgenden Tagen gemessen. Um eine eventuelle Störung der Pansenfunktion aufgrund der häufigen Probenahme zu vermeiden, wurde ein Zeitintervall zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen von mindestens acht Stunden eingeplant. An die Messungen der Partikelkinetik schloss sich die zweimalige Bestimmung des Pansenvolumens im Abstand von vier

Tagen an. Die Futteraufnahme und die Milchleistung der Kühe im Liegeboxenlaufstall wurden täglich über die gesamte Messperiode erfasst. Der Ablauf jedes Versuchsabschnitts ist Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tabelle 3.2. Versuchsablauf

	Dauer in Tagen	von - bis Tage
Anfütterung	11	1. – 11.
Markergabe für Passage	1*Dosis	11.
Kotprobenahme für Passage	7	11. – 17.
Kauaktivität	7	11. – 17.
Partikelkinetik	4	18. – 21.
Pansenvolumen	2	22. und 28.
Milchleistung	12	11. – 23.
Futteraufnahme	18	10. – 28.

In diesem Forschungsvorhaben wurden parallel eine Reihe anderer Parameter (scheinbare Verdaulichkeit, Fermentationsparameter, Anzahl der Protozoen, Thiamingehalt und die bakterielle Masse im Pansen) erfasst, die in der Dissertation von Zebeli (2006c) publiziert wurden.

3.1.2 Versuchstiere und Haltungsform

Für die Untersuchung standen insgesamt 13 Milchkühe der Rasse Deutsch-Holstein zur Verfügung. Die Kühe befanden sich zu Versuchsbeginn in der ersten Laktationsphase (mittlerer Laktationstag, 51 Tage) und wiesen eine Milchleistung von etwa 36 kg pro Tag auf. Die durchschnittliche Lebendmasse der Kühe betrug 639 kg.

Neun Tiere wurden im Versuchsstall der Versuchsstation für Nutztierbiologie „Meiereihof“ der Universität Hohenheim während der gesamten Versuchsperiode gehalten. Die Kühe wurden im Versuchsstall, einem Liegeboxenlaufstall mit Spaltenboden und 21 Kuhplätzen aufgestellt. Die Liegeboxen waren als Hochboxen mit gepressten Moosgummimatrasen und einer modifizierten Glöcknerabtrennung ausgeführt. Der gummibeschichtete Spaltenboden im Laufbereich wurde zweimal täglich gereinigt. Die Fütterung der TMR erfolgte aus Kunststofftrögen mit respondergesteuerter Zugangsberechtigung und individueller Erfassung der Futteraufnahme. Wasser stand den Kühen durch zwei große Edelstahltrögselbsttränken *ad libitum* zur Verfügung. Die Kühe wurden zweimal täglich

in einem 2 x 3 Auto-Tandemmelkstand gemolken, die Wiegung der Tiere erfolgte zweimal täglich automatisch nach dem Melken.

Vier weitere Kühe mit permanenter Kunststoff-Pansenfistel wurden in der Versuchsanlage des Instituts für Tierernährung der Universität Hohenheim gehalten. Davon besaßen drei Kühe eine große permanente Pansenfistel (Kanüle: Ø 100 mm, Bar Diamond, Parma ID). Während der Anfütterungsphase standen die Tiere in Einzelboxen auf Holzspänen. Um eine genaue Ermittlung der Kauaktivität und der Futteraufnahme zu ermöglichen sowie eine zusätzliche Faseraufnahme aus Einstreu auszuschließen, wurden die Kühe in der Versuchsphase in Anbindung auf Gummimatten aufgestellt. Wasser stand den Tieren *ad libitum* (10 % Futterreste) zur Verfügung. Zu Beginn jeder Woche eines Versuchsabschnitts erfolgte vor der Morgenfütterung die Wiegung der Tiere. Die Kühe wurden zweimal täglich um 7.00 und um 15.30 Uhr gemolken.

Alle Vorgehensweisen am Tier wurden vom Tierschutzausschuss des Landes Baden-Württemberg (Regierungsbezirk Stuttgart) genehmigt.

3.1.3 Futter und Fütterung

Es stand eine weidelgrasbetonte Grassilage aus dem ersten Schnitt zur Verfügung, die zu Beginn des Ähren- und Rispenschiebens (Nutzungsstadium 3) geerntet wurde. Sie wurde beim Pressen grob geschnitten (theoretische Schnittlänge 24 cm) und als Rundballensilage konserviert.

Die Kontrollvariante 25 mm entsprach einer üblichen TMR, d.h. sie wurde mit einem Zweischneckenhorizontalfuttermischwagen mit Entnahmefräse (Seko-Samurai III) zerkleinert und homogenisiert. Zwei weitere PL-Stufen wurden mittels einer täglichen Nachzerkleinerung mit einem selbstfahrenden Exaktfeldhäcksler (Claas-Jaguar 675) auf 5,5 mm und 11 mm PL direkt in den Futtermischwagen hergestellt. Die Gärqualität und Partikelgrößenverteilung der Grassilage sind Tabelle 3.3. zu entnehmen. Die chemische Zusammensetzung und die Abbaucharakteristika der TMR-Komponenten sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.3. Gärparameter¹ (n = 1), Gärqualität und Partikelgrößenverteilung² (n = 9) der Grassilage

Parameter	PL der GS		
	25 mm	11 mm	5,5 mm
Essigsäure, %TM	1,88	2,03	2,05
Milchsäure, % TM	7,95	7,54	8,29
pH-Wert	4,29	4,30	4,38
Gärqualität ³ , Note	1,5	1,5	1,5
Partikelgrößenverteilung ³ (g/kg TM retiniert auf Sieb)			
> 19 mm	581,9	294,6	141,1
> 8 – < 19 mm	261,7	507,7	519,5
< 8 mm	156,4	197,7	339,4
MPL ⁴ , mm	15,9	11,7	8,5

¹ Buttersäure und Propionsäure lagen unter der Nachweisgrenze.

² Anhand der Penn State Schüttelbox (PSPS) ermittelt nach LAMMERS et al. (1996).

³ Gärqualität bestimmt nach WEISSBACH und HONIG (1992).

⁴ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion, nach FISHER et al. (1988).

Tabelle 3.4. Chemische Zusammensetzung der TMR-Komponenten (Mittelwerte)

	Rationskomponenten		
	GS (n=12)	KF (n=3)	Heu (n=3)
Anteil an der TMR, g/kg TM	450	500	50
Chemische Zusammensetzung			
TM, g/kg	313,2	887,7	901,4
Rohasche, g/kg TM	123,7	62,7	87,2
Rohprotein, g/kg TM	131,8	187,3	74,0
Rohfett, g/kg TM	29,9	46,4	10,8
Rohfaser, g/kg TM	260,7	47,6	336,1
NDF, g/kg TM	464,5	193,5	640,6
ADF, g/kg TM	324,3	64,8	394,7
ADL, g/kg TM	24,6	10,5	34,2
NFC ¹ , g/kg TM	250,1	510,1	187,3
NEL ² , MJ/kg TM	6,1	8,3	5,0
k _d ³ , %/h	8,7	12,7	n.a. ⁴

¹ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).

² Im HFT ermittelt nach MENKE und STEINGASS (1988).

³ Gasbildungsrate nach KHAZAAL et al. (1993).

⁴ Nicht analysiert.

Die TMR setzte sich aus 45 % GS, 5 % Heu und 50 % Kraftfutter (KF) (Zusammensetzung: 34 % Weizen, 25 % Mais, 21 % Sojaextraktionsschrot, 8 % Gerste, 8 % Sonnenblumenkerne, 1 % Melasseschnitzel und 3 % Mineralfutter) zusammen und wurde täglich mit Hilfe eines Futtermischwagens (Seko-Samurai III) hergestellt und anschließend einmal pro Tag den Tieren um 8.00 Uhr *ad libitum* (10 % Futterreste) (den pansenfistulierten Kühen zweimal täglich, um 8.00 und 16.00 Uhr)

vorgelegt. Die chemische Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung und Strukturbewertung der TMR sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Tabelle 3.5. Tierdaten, Komponenten, chemische Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung und Strukturbewertung der Rationen (Mittelwerte).

	PL der GS-TMR		
	25mm	11mm	5,5mm
Mittlere Lebendmasse, kg	639	656	656
Mittlerer Laktationstag, d	51	107	82
Chemische Zusammensetzung (n = 4)			
TM, g/kg	466,1	450,9	460,6
Rohasche, g/kg TM	94,0	93,3	95,2
Rohprotein, g/kg TM	147,9	151,9	152,8
Rohfett, g/kg TM	43,6	37,5	39,4
Rohfaser, g/kg TM	166,9	161,0	158,0
NDF, g/kg TM	343,1	350,0	357,2
ADF, g/kg TM	209,8	207,8	204,2
ADL, g/kg TM	19,9	17,7	18,5
NFC ¹ , g/kg TM	371,4	365,7	357,6
NEL ² , MJ/kg TM	6,92	6,85	6,98
k _d ³ , %/h	10,3	10,4	10,9
Partikelgrößenverteilung ⁴ (n = 14)			
g/kg TM retiniert auf Sieb			
> 19 mm	441,6	181,4	101,7
> 8 – 19 mm <	146,3	337,6	335,1
< 8 mm	412,1	481,0	563,2
MPL ⁵ , mm	9,4	6,1	4,5
Strukturbewertung			
Strukturwert ⁶ , /kg TM	1,63	1,63	1,63
Strukt. Faser ⁷ , g/100kg LM	390,3	421,2	415,1
peNDF _L ⁸ , g/kg TM	201,6	182,1	156,2
peNDF _M ⁹ , g/kg TM	265,3	260,5	249,8

¹ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).

² Im HFT ermittelt nach MENKE und STEINGASS (1988).

³ Gasbildungsrate (nach KHAZAAL et al., 1993).

⁴ Anhand der Penn State Schüttelbox (PSPS) ermittelt nach LAMMERS et al. (1996).

⁵ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

⁶ Strukturwert SW nach DE BRABANDER et al. (2002).

⁷ Strukturwirksame Faser nach HOFFMANN (1990).

⁸ Physikalisch Effektive Faser nach LAMMERS et al. (1996).

⁹ Physikalisch Effektive Faser nach MERTENS (2000).

3.1.4 Futtermittelanalytik

Die Futterreste wurden täglich vor der Morgenfütterung erfasst und zurückgewogen. Täglich wurden Proben von GS, TMR und Futterresten entnommen. Eine Teilprobe wurde luftgetrocknet (60°C über 48 h) und für die tägliche Bestimmung

des TM-Gehaltes (103°C über 4 h) weiterverwendet. Darüber hinaus wurde jeden zweiten Tag eine Teilprobe zur Untersuchung der Struktureigenschaften (Partikelgrößenverteilung, nach LAMMERS et al., 1996) von GS und TMR verwendet. Des Weiteren wurden täglich Proben von GS, TMR und Futterresten in einer Sammelprobe im Kühlraum (4°C) aufbewahrt. In einem Versuchsabschnitt wurden insgesamt vier Sammelproben, bestehend aus 7 Einzelproben, erfasst und für die Nasssieb- und Rohnährstoffanalyse weiterverwendet. Um die Gärqualität der GS zu charakterisieren, wurde in jedem Versuchsabschnitt eine GS-Sammelprobe bei -21°C gelagert und für die Analytik nach NAUMANN und BASSLER (1997) und WEISSBACH und HONIG (1992) verwendet. Die Untersuchung der Gärparameter der GS wurde an der Staatlichen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg durchgeführt.

3.1.4.1 Durchführung der Rohnährstoffanalyse

Die Proben von GS, Heu, KF und TMR wurden vor der Analyse drei Tage bei 60°C getrocknet und anschließend in einer Schneidmühle mit einer Siebweite von 0,7 mm gemahlen. Die Rohnährstoffanalyse der Futtermittel- und TMR (TM, XA, XP, XF, XL) erfolgte nach NAUMANN und BASSLER (1997), während die NDF- und ADF-Gehalte nach VAN SOEST (1991) bestimmt wurden. Die Energiegehalte der Futtermittel wurden anhand des Hohenheimer Futterwert Tests (HFT) nach MENKE und STEINGASS (1988) ermittelt, und die Abbaucharakteristika der TMR und Futtermittel wurden nach einer 72-stündigen *in vitro* Inkubation (MENKE und STEINGASS, 1988) ermittelt, wodurch sich die Gasbildungsrate nach der Anpassung der Gasbildungskurve gemäß einer exponentiellen Funktion (KHAZAAL et al., 1993) ergab.

3.1.5 Statistische Auswertung

Die Versuchsergebnisse wurden als randomisierter Block-Versuch anhand der Mixed Procedure (PROC MIXED, SAS 8.2) analysiert. Der Block-Effekt des Tieres, PL der GS, Digestaschicht (P) und Zeitpunkt der Probenahme (Zp) wurden als feste Effekte ins Modell einbezogen. Um den Versuchsfehler in Verbindung mit der Laktationsphase zu betrachten, wurde der Laktationstag als Kovariable in der

Kovarianzanalyse (ANCOVA) miteinbezogen. Da ANCOVA auf der Parallelitätsannahme beruht, wurde diese mit dem „lack of fit“ Test geprüft. Wenn das „lack of fit“ signifikant ($P < 0,05$) (Parallelitätsannahme verletzt) war, wurde der Laktationstag aus der Analyse ausgeschlossen. Der Tag der Probenahme wurde als zufällige Variable in der Analyse betrachtet.

Die Ergebnisse der Partikelkinetik im Reticulorumen wurden als wiederholte Messungen betrachtet. Um die Kovarianz der wiederholten Messungen an demselben Tier und derselben Behandlung (Subjekt) in verschiedenen Digestaschichten (dorsal und ventral) (räumliche Dimension der Wiederholung, *spatial repeated measures*) und zu verschiedenen Zeitpunkten (Z_p , -1, 7 und 11 h; zeitliche Abhängigkeit) (zeitliche Dimension der Wiederholung, *time repeated measures*) zu betrachten, wurde die Option „repeated“ für zweifach wiederholte Messungen mit einer unstrukturierten und autoregressiven [type = un@ar (1)] Varianz-Kovarianz-Matrix-Struktur angewendet. Nach LITTELL et al. (1998) ist eine Eigenschaft dieser Struktur, dass die Beobachtungen an einem Subjekt aus der gleichen Digestaschicht bzw. vom gleichen Zeitpunkt eine höhere Kovarianz aufweisen als diejenige, die aus verschiedenen Digestaschichten bzw. zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst wurden, und dass zeitlich aufeinander folgende Messungen bei demselben Subjekt enger korreliert sind [$\text{cov}(e^{ijk}, e^{ij'k}) = \sigma^2 \rho^{|j-j'|}$, wobei $0 \leq \rho \leq 1$]. Zur Auswertung der Leistungsparameter an mehreren Tagen wurde der Faktor Tag als wiederholte Messung betrachtet.

Die Lsmeans und entsprechenden Standardfehler (SEM) wurden berechnet, wobei die Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen mittels der Option „PDIFF“ geprüft wurden. Da die Unterschiede zwischen den P und Z_p oft sehr groß sind, wurden die Lsmeans innerhalb der Z_p und P zwischen den verschiedenen PL-Stufen verglichen. Die Effekte der P und Z_p werden jedoch für jeden untersuchten Parameter besprochen. Die polynomischen Kontraste wurden angewendet, um einen eventuellen linearen oder quadratischen Effekt der PL auf die Parameter zu prüfen. Die Freiheitsgrade wurden nach der Methode von Kenward-Rogers (ddfm=kr) geschätzt. Das Signifikanzniveau wurde für $P < 0,05$ erklärt, Tendenzen wurden bis zu $P < 0,10$ diskutiert.

3.2 Maissilage-Versuch

3.2.1 Versuchsschema

In einem randomisierten Block-Versuch (randomized block design) wurden drei theoretische PL (Kontrolle lang 14 mm, kurz 8,1 mm und fein 5,5 mm) der MS untersucht und sequenziell geprüft. Die Tiere bekamen dieselbe Behandlung (PL) innerhalb eines Versuchsabschnitts (Periode). Die Sequenz des Behandlungsangebots wurde randomisiert. Aus technischen und lagerungsbedingten Gründen konnte in einer Periode immer nur eine Variante der MS den Kühen verfüttert werden. Um den Periodeneffekt bestmöglich zu berücksichtigen, wurde die Kontrollvariante (14 mm) im ersten und im letzten (vierten) Versuchsabschnitt geprüft. Das Schema dieses einfaktoriellen Versuchs ist in Tabelle 3.6 aufgeführt.

Tabelle 3.6. Versuchsschema

Versuchsabschnitt	I	II	III	IV
Anzahl der Tiere mit/ ohne Pansenfistel	4/8	4/8	4/8	3/8
PL der MS	14 mm	5,5 mm	8,1 mm	14 mm

Die Adaptionphase der Versuchstiere an die TMR war in allen Perioden 11 Tage lang. Daraufhin folgte die 11-tägige Messphase, in der die Leistungsparameter (Futteraufnahme, Gewichtsentwicklung, Milchleistung) und Kauaktivität über die gesamte Messperiode aufgezeichnet wurden. In den ersten 7 Tagen wurde die Passagerate erfasst, danach wurde die Partikelkinetik an zwei aufeinander folgenden Tagen untersucht. Um eventuelle Störungen der Pansenfunktion aufgrund der häufigen Probenahme und großen Probenmenge vorzubeugen, wurde ein Zeitintervall zwischen den zwei aufeinander folgenden Messungen von mindestens acht Stunden eingeplant. In Tabelle 3.7 ist der Versuchsablauf dargestellt.

In diesem Forschungsvorhaben wurden parallel eine Reihe anderer Messparameter (scheinbare Verdaulichkeit, Fermentationsparameter, Anzahl der Protozoen, Thiamingehalt und die bakterielle Masse im Pansen) erfasst, die im Rahmen der Doktorarbeiten von Zebeli (2006c) und Ölschläger (2007) erarbeitet wurden. Die scheinbare Verdaulichkeit, die Fermentationsparameter und Enzymaktivität im Reticulorumen wurden in der Dissertation von Zebeli (2006c)

publiziert, während die Population zellulolytischer Bakterien im Pansen von Ölschläger (2007) mit Hilfe der Methode der Hybridisierung mit spezifischen 16S rRNA Oligonukleotidsonden untersucht wurde.

Tabelle 3.7. Versuchsablauf

	Dauer in Tagen	Von - bis Tage
Anfütterung	11	1. – 11.
Markergabe für Passage	1*Dosis	12.
Kotprobenahme für Passage	7	12. – 17.
Wiederkaumessung	11	12. – 22.
Partikelkinetik	2	18. – 19.
Milchleistung	12	11. – 22.
Futteraufnahme	12	11. – 22.

3.2.2 Versuchtiere und Haltungsform

Für die Untersuchungen standen 12 Milchkühe der Rasse Deutsche Holstein zur Verfügung, davon besaßen vier Tiere eine permanente Pansenfistel (Kanüle: Ø 100 mm, Bar Diamond, Parma ID), an denen die Parameter Passagerate und Partikelkinetik geprüft wurden. Die Wiederkauaktivität und die Leistungsparameter wurden an allen Tieren geprüft. Die mittlere Lebendmasse der Tiere betrug am Anfang des Versuchs 624 ± 50 kg (Mittelwert \pm Standardabweichung), und der mittlere Laktationstag war 60 ± 8 d, während die mittlere Milchleistung $38,4 \pm 3,3$ kg/d betrug. Im vierten Versuchsabschnitt wurde ein Tier wegen Erkrankung aus dem Versuch ausgeschlossen.

Alle Kühe wurden im Versuchsstall der Versuchsstation für Nutztierbiologie „Meiereihof“ der Universität Hohenheim während der gesamten Versuchsperiode (Adaptationsphase und Messperiode) gehalten. Die Tiere wurden im Versuchsstall, einem Liegeboxenlaufstall mit Spaltenboden und 21 Kuhplätzen aufgestellt. Die Liegeboxen waren als Hochboxen mit gepressten Moosgummimatrasen und einer modifizierten Glöcknerabtrennung ausgeführt. Der gummibeschichtete Spaltenboden im Laufbereich wurde zweimal täglich gereinigt. Die Fütterung der TMR erfolgte aus Kunststofftrögen mit respondergesteuerter Zugangsberechtigung und individueller Erfassung der Futteraufnahme. Wasser stand den Kühen durch zwei große Edelstahltrögselbsttränken *ad libitum* (10 % Futterreste) zur Verfügung. Die Kühe wurden zweimal täglich in einem 2 x 3 Auto-Tandemmelkstand gemolken, die

Wiegung der Tiere erfolgte zweimal täglich mit einer elektronischen Waage automatisch nach dem Melken.

Alle Vorgehensweisen am Tier waren vom Tierschutzausschuss des Landes Baden-Württemberg (Regierungs-Bezirk Stuttgart) genehmigt.

3.2.3 Silagebereitung

Die ganze Maispflanze der Sorte Benicia (Silomais FAO 280, Reifegruppe Mittelspät) wurde am Ende der Teigreife, mit Normalschnitt, mit einem selbstfahrenden Exaktfeldhäcksler (CLAAS Jaguar 675) in drei verschiedenen PL (Kontrolle lang 14 mm, kurz 8,1 mm und fein 5,5 mm) von einem Schlag geerntet (Ernte 2003). Die Spaltweite der Kornnachzerkleinerung wurde auf 2 mm eingestellt. Die einzelnen Silomais-PL-Varianten wurden zu je 13 to Frischmasse mit Hilfe einer Siloschlauchpresse (Eberhardt, Typ 401) in Siloschläuche (AG-bag, Ø 2,5 m) einsiliert. Während der Einsilierung wurden repräsentative Silomaisproben zur Rohnährstoffbestimmung entnommen, die chemische Zusammensetzung ist Tabelle 3.8 zu entnehmen.

Tabelle 3.8 Chemische Zusammensetzung der gehäckselten Maispflanze (n = 4, Mittelwert)

	TM, g	in g/kg TM			NDF	NEL ¹
		Rohasche	Rohprotein	Rohfaser		MJ/kg TM
Silomais	362,7	44,3	74,7	249,5	519,4	6,51

¹ Im HFT ermittelt (MENKE und STEINGASS, 1988).

3.2.4 Futter und Fütterung

Das Futter wurde den Tieren als TMR vorgelegt, die aus 40 % MS, 10 % Heu (PL: 30 mm) und 50 % KF (Zusammensetzung: 30,5 % Weizen, 32 % Sojaextraktionsschrot, 15 % Gerste, 14 % Mais, 6,5 % Sonnenblumenkörner und 3 % Mineralfutter) bestand. Die TMR wurde täglich in einem Zweischneckenhorizontalfuttermischwagen (Seko-Samurai III) hergestellt. Sie wurde anschließend einmal pro Tag den Tieren um 8.00 Uhr *ad libitum* (10 % Futterreste) vorgelegt. Die chemische Zusammensetzung der TMR-Komponenten und der TMR sind in Tabelle 3.9 aufgeführt.

Tabelle 3.9. Tierdaten, chemische Zusammensetzung der TMR-Varianten und Komponenten.

Parameter	PL der MS-TMR			TMR-Komponenten		
	14mm	8,1mm	5,5mm			
Mittlere Lebendmasse, kg	657	653	637			
Mittlerer Laktationstag, kg	98	108	87			
Komponenten, g/kg TM						
Maissilage (MS)	400	400	400			
Heu	100	100	100			
Krafftutter (KF)	500	500	500			
Chem. Zusammensetzung (n ³ = 4)				MS	KF	Heu
TM, g/kg	449,2	440,2	451,3	413,7	901,9	931,7
Rohasche, g/kg TM	67,5	63,6	67,2	44,6	37,4	63,1
Rohprotein, g/kg TM	150,4	153,2	147,5	76,9	259,4	58,9
Rohfett, g/kg TM	31,2	31,6	30,8	23,2	54,7	12,5
Rohfaser, g/kg TM	160,4	158,5	160,9	231,1	47,2	350,1
NDF, g/kg TM	346,9	360,3	345,7	505,7	159,6	678,2
ADF, g/kg TM	198,1	198,7	192,5	266,5	70,3	404,2
ADL, g/kg TM	20,8	20,1	22,4	25,4	10,2	44,8
NFC ¹ , g/kg TM	404,0	391,4	408,9	349,7	489,0	187,3
NEL ² , MJ/kg TM	6,87	6,99	7,02	6,29	8,92	5,05
Partikelgrößenverteilung ⁴ (n ⁵ = 8)						
g/kg TM retiniert auf Sieb						
> 19 mm	41,1	34,1	25,7			
> 8 – < 19 mm	377,7	339,2	243,5			
> 1,18 – < 8 mm	414,1	485,0	564,5			
< 1,18 mm	167,1	141,7	166,2			
MPL ⁶ , mm	5,2	4,4	3,1			

¹ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).² Im HFT ermittelt nach MENKE und STEINGASS (1988).³ Für die PL-Stufe 14 mm, n = 8.⁴ Anhand der Penn State Schüttelbox (NPSPS) ermittelt nach KONONOFF et al. (1996).⁵ Für die PL-Stufe 14 mm, n = 16.⁶ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

3.2.5 Futtermittelanalytik

In jedem Versuchsabschnitt wurden einmal wöchentlich eine Krafftutter- und eine Heuprobe gezogen, drei Teilproben ergaben eine Sammelprobe pro Periode. Proben von TMR, Futterresten (elektronische Mengenerfassung) und MS wurden täglich entnommen, die täglichen Futterrestmengen wurden elektronisch erfasst. Sie wurden danach luftgetrocknet (60°C über 48 h) und für die Bestimmung des TM-Gehaltes (103°C über 4 h) weiterverwendet. Darüber hinaus wurden täglich Proben von TMR, Futterresten und MS in einer Sammelprobe im Kühlraum (4°C) aufbewahrt. Ein Teil wurde für die Nasssiebanalyse nach LECHNER-DOLL (1986) verwendet, und

ein Teil wurde luftgetrocknet (60°C über 48 h), anschließend gemahlen (0,7 mm Sieb) und für die Rohnährstoffanalyse nach NAUMANN und BASSLER (1997) verwendet. In einem Versuchsabschnitt wurden 4 Sammelproben, bestehend aus je vier Einzelproben, erfasst.

Jeden zweiten Tag wurde ein Teil der täglich frischen Probe von TMR, MS und Futterreste für die Untersuchung der Struktureigenschaften mittels der New Penn State Schüttelbox (NPSPS) (neues Modell, KONONOFF et al., 2003b) weiterverwendet.

Um die Gärqualität der MS zu charakterisieren, wurden in jedem Versuchsabschnitt vier MS-Sammelproben bei -21°C gelagert und für die Analytik der Gärqualität nach NAUMANN und BASSLER (1997) und WEISSBACH und HONIG (1992) bereitgehalten. Die Untersuchung der Gärparameter der MS wurde an der Staatlichen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg durchgeführt.

3.2.6 Statistische Auswertung

Die Versuchsergebnisse wurden als randomisierter Block-Versuch anhand der Mixed Procedure (PROC MIXED, SAS 8.2) analysiert. Der Block-Effekt des Tieres, PL der MS, Digestaschicht (P) und Zeitpunkt der Probenahme (Zp) wurden als feste Effekte ins Modell einbezogen. Um den Versuchsfehler in Verbindung mit der Laktationsphase zu betrachten, wurde der Laktationstag als Kovariable in der Kovarianzanalyse (ANCOVA) miteinbezogen. Da ANCOVA auf der Parallelitätsannahme beruht, wurde diese mit dem „lack of fit“ Test geprüft. Wenn das „lack of fit“ signifikant ($P < 0,05$) (Parallelitätsannahme verletzt) war, wurde der Laktationstag aus der Analyse ausgeschlossen.

Die Periode wurde als zufällige Variable in der Analyse betrachtet. Um die Kovarianz der wiederholten Messungen an demselben Tier und derselben Behandlung (Subjekt) in verschiedenen Digestaschichten (dorsal und ventral) und zu verschiedenen Zeitpunkten (Zp, -1, 2, 7 und 10 h; zeitliche Abhängigkeit) zu betrachten, wurde die Option „repeated“ für zweifach wiederholte Messungen mit einer unstrukturierten und autoregressiven [type = un@ar (1)] Varianz-Kovarianz-Matrix-Struktur angewendet. Die Eigenschaft dieser Struktur ist, dass die Beobachtungen an einem Subjekt aus der gleichen Digestaschicht bzw. vom gleichen

Zeitpunkt eine höhere Kovarianz aufweisen als diejenige, die aus verschiedenen Digestaschichten bzw. zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst wurden, und dass zeitlich aufeinander folgende Messungen bei demselben Subjekt enger korreliert sind [$\text{cov}(e^{ijk}, e^{i'jk}) = \sigma^2 \rho^{|j-j'|}$, wobei $0 \leq \rho \leq 1$] (LITTELL et al., 1998).

Die Lsmeans und entsprechenden Standardfehler (Pooled SEM) wurden berechnet, wobei die Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen mittels der Option „PDIFF“ geprüft wurden. Da die Unterschiede zwischen den P und Zp oft sehr groß waren, wurden die Lsmeans innerhalb der Zp und P zwischen den verschiedenen PL-Stufen verglichen. Die Effekte der P und Zp werden jedoch für jeden untersuchten Parameter besprochen. Die polynomischen Kontraste wurden angewendet, um einen eventuellen linearen oder quadratischen Effekt der PL auf die Parameter zu prüfen. Die Freiheitsgrade wurden nach der Methode von Kenward-Rogers (ddfm = kr) geschätzt. Das Signifikanzniveau wurde für $P < 0,05$ erklärt, Tendenzen wurden bis zu $P < 0,10$ diskutiert.

3.3 Untersuchungsmethoden

In der Beschreibung der Untersuchungsmethoden wird darauf hingewiesen, wenn für die Untersuchung der Parameter im GS- bzw. MS-Versuch verschiedene Methoden verwendet wurden.

3.3.1 Datenerfassung

Die Daten zur Futteraufnahme, zur Milchleistung und der Tiergewichte wurden mit Hilfe von Halsbandrespondern und entsprechenden Sende-Empfangseinheiten im Melkstand, an der Tierwaage und an den Futtertrögen erhoben. Die Erfassung und Steuerung der Systeme erfolgte über zwei separate Rechner. Einer steuerte die Wiegetröge, der zweite, welcher mit dem Herdenmanagement-System Dairyplan, DP 5 (Fa. Westfalia) arbeitete, steuerte den Melkstand und die Tierwaage.

3.3.2 Futteraufnahme

Die Futteraufnahme der vier pansenfistulierten Kühe im GS-Versuch, welche im Versuchsstall des Instituts für Tierernährung aufgestellt wurden, wurde tierindividuell bestimmt. Über die Dauer von 8 Tagen wurde in jedem Versuchsabschnitt durch die Differenz zwischen der angebotenen TM-Menge der TMR und der Futterreste die Futteraufnahme bestimmt.

Die Futteraufnahme der Versuchstiere, sowohl im GS- als auch im MS-Versuch, welche im Versuchsstall der Versuchsstation für Nutztierbiologie „Meiereihof“ der Universität Hohenheim gehalten wurden, wurde täglich tierindividuell auf Basis der Einzelfressplatzbesuche elektronisch erfasst. Die 8 Kunststofftröge standen auf elektronischen Wiegebolzen. Eine Sende- und Empfangseinheit gewährte nur zugangsberechtigten Tieren die Futteraufnahme. Am Futtertrog wurden die Kuhnummer, die Trognummer, die Trogmasse und die Uhrzeit zu Beginn und Ende jedes Fressbesuchs erfasst. Die Frischsubstanz-Aufnahme und die Fressdauer pro Tag wurden daraus entsprechend berechnet.

3.3.2.1 Futteraufnahme- und Futterselektionsverhalten

Im MS-Versuch wurde das Futteraufnahmeverhalten genauer untersucht, Dazu wurden die Daten von Anfangs- und Endzeiten eines Besuchs auf eine Sekunde, das Troggewicht auf 0,05 kg gerundet. Aus den Aufzeichnungen wurde die Pausenzeit (meal criteria) zwischen zwei Mahlzeiten definiert. Dies ist die minimale Zeit, die eine Kuh dem Futtertrog fernbleiben musste, damit ein Mahl als beendet erklärt wurde (MELIN et al., 2005). Anschließend wurden die Anzahl der Mahlzeiten, die Dauer einer Mahlzeit, die Anzahl der Besuche pro Mahlzeit und die Futteraufnahme je Besuch berechnet. Auf Basis der Futterrestmenge und der chemischen Zusammensetzung von TMR und Futterresten konnten Futterselektionsindices für einzelne Nährstoffe, physikalisch effektive Faser und Siebfraktionen (SILVERA et al., 2007) berechnet werden. Ein Futterselektionsindex von 1 bedeutet keine Selektion, während ein Selektionsindex < 1 eine Selektion gegen und ein Selektionsindex > 1 eine Selektion dafür bedeutet.

3.3.3 Milchparameter

Die Milchmengenerfassung im Melkstand wurde elektronisch gesteuert mit anschließender Datenspeicherung im Rechner. In jeder Versuchsperiode wurden 6 Milchproben gezogen und vom Milchprüfing Baden-Württemberg mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie auf Fett-, Eiweiß-, Harnstoff-, Laktosegehalt und zusätzlich die Zellzahl untersucht. Die Menge an Fett-Eiweiß-korrigierter Milch (FECM) wurde anhand der Formel nach MEYER et al. (1993) berechnet:

$$\text{FECM (kg)} = [0,37 \times \text{Fett (\%)} + 0,21 \times \text{Eiweiß (\%)} + 0,95] / 3,1 \times \text{Milchmenge (kg)}$$

3.3.4 Erfassung der Kauaktivität

3.3.4.1 Grassilage-Versuch

Im GS-Versuch wurde die Kauaktivität mittels eines stationären Kauaktivitätsmessungssystems an allen vier pansenfistulierten Kühen ermittelt. Die Untersuchungen wurden mit jeweils zwei Tieren parallel an drei aufeinander folgenden Tagen durchgeführt. Die Datenerhebung und das Auswertungsprogramm basierten auf der am Hohenheimer Institut entwickelten Technik von SUSENBETH et al. (1998, 2004). Die Messung erfolgte über einen geschlossenen Luftschlauch aus weichem Silikon, der an einem flexiblen Nylonhalter befestigt wurde. Der Schlauch verlief unterhalb des Tiermaules über den gesamten Unterkieferriemen entlang einer Seite bis zum Genickriemen. Oberhalb des Genickriemens wurde der Luftschlauch in ein Kupplungsstück mit Drehgelenk geführt, ein Abknicken wurde dadurch verhindert.

Der durch die Kaubewegungen des Tiermauls erzeugte Luftwiderstand wurde als Impuls über den Silikonschlauch an die Messeinheit weitergeleitet und gespeichert. Ein Computer zeichnete jeden Kauschlag auf, so dass sowohl die Kauzeit als auch die Kauschläge erfasst wurden. Die so erfassten Daten wurden anschließend mit einem speziell dafür entwickelten Programm ausgewertet, welches mit den folgenden Bedingungen arbeitete:

- Die Kauzeit wurde als eine Zeitspanne zwischen zwei Impulsen definiert, die weniger als 10 sec beträgt.

- Für die Kauschläge wurde eine Zeitspanne von 4 sec definiert, in der mindestens zwei Impulse erfolgen.
- Ein Bissen ergab sich aus mehr als 10 Kauschlägen.
- Eine Pause zwischen den Bissen wurde definiert, wenn innerhalb von 4 sec kein Bissen erfolgt.
- Wiederkauperioden können durch Darstellung aller Impulse auf dem Bildschirm des Computers erkannt werden, da sich diese als regelmäßig wiederkehrende Serien von Kauschlägen kennzeichnen lassen.

Die folgenden Parameter zur Charakterisierung des Kauverhaltens konnten somit bestimmt werden:

Kauzeit, Wiederkauzeit, Anzahl der Wiederkauschläge, Anzahl der Wiederkauperioden, Anzahl der Bissen während einer Wiederkauperiode sowie Kauschläge pro Bissen.

3.3.4.2 Maissilage-Versuch

Im MS-Versuch wurde die Kauaktivität mittels eines mobilen Kauaktivitätsmessungssystems an sechs Tieren je Versuchsabschnitt parallel ermittelt. Für die Auswertung wurden mindestens drei vollständig aufgezeichnete Tage pro Tier und Versuchsperiode verwendet.

Das Kauverhalten der Kühe wurde anhand eines speziell dafür konstruierten Halfters dokumentiert, welches den Tieren 24 Stunden lang angelegt wurde. Die Kühe konnten sich damit im Laufstall frei bewegen. Zwei Tage vor Beginn der Messperiode wurden die Tiere an das Tragen der Halfter gewöhnt.

Die Messtechnik basiert auf der Methode von SUSENBETH et al. (1998), welche in Hohenheim entwickelt wurde und inzwischen am Institut für Tierernährung in Hohenheim weiterentwickelt wurde. Die Kaubewegungen der Kühe konnten durch einen einseitig geschlossenen Silikonschlauch, der am Unterkieferriemen bis hin zum Genickstück des Halfters befestigt wurde und mit einem Druckluftschalter verbunden war, erfasst werden. Der Druckluftschalter wurde mit einem Datenlogger (Gemini Tinytag Plus Data Logger), welcher ebenfalls am Genickstück angebracht wurde, verkabelt. Durch die Kaubewegungen wurde im Silikonschlauch ein Luftstrom erzeugt, der im Schalter zwei Kontaktfedern aneinanderdrückte und damit einen elektrischen Impuls auslöste. Dieser wurde im Datenlogger gespeichert. Vor jeder Messung wurde der Druckluftschalter mit einem Voltmeter geeicht.

Die im Datenlogger abgespeicherten Daten wurden mit dem Programm Gemini Logger Manager (GLM, Version 2.2) ausgelesen und die Kauaktivität über 24 Stunden graphisch dargestellt. Die charakteristische Impulsfolge der Wiederkaubewegungen wurde visuell ermittelt und die Daten anschließend mit dem Auswertungsprogramm RAP (SCHÄFER, 2003, Rumination Analysis Program, Version 1003) ausgewertet. Das Programm arbeitete mit folgenden Grundeinstellungen:

- Länge des Messintervalls 6 sec.
- „Count Limit“, Höchstzahl der Kauschläge in einem Messintervall 9
- Mindestanzahl der Kauschläge pro Bolus 15
- „Pause Threshold“, Zeit zwischen Abschlucken eines Bolus und Rejektion 6 sec.

Als auszuwertende Parameter wurden gesamte Kauzeit, Fresszeit, Wiederkauzeit, Anzahl der Wiederkauschläge, Anzahl der Wiederkauperioden, Anzahl der Bissen während einer Wiederkauperiode, Wiederkauschläge pro Sekunde, Anzahl der Boli pro Wiederkauperiode sowie Wiederkauschläge pro Bissen erfasst.

3.3.5 Bestimmung von NDF- und TM-Abbau der TMR und von deren Komponenten mittels Nylon bag Technik

Im MS-Versuch wurden *in situ* Untersuchungen zum NDF- und TM-Abbau durchgeführt. Um mögliche Effekte der PL auf das Pansenmilieu bzw. das ruminale Abbauverhalten feststellen zu können, wurden in jedem Versuchsabschnitt an vier pansenfistulierten Kühen der NDF- und TM-Abbau von Heu MS, TMR und KF über eine Dauer von 24 Stunden *in situ* ermittelt (HUNTINGTON und GIVENS, 1995). Die *in situ* Messung der zu prüfenden PL wurde jeweils durchgeführt, während die Tiere die entsprechende PL als TMR vorgelegt bekamen. Bei dieser *in situ* Messung sollte nicht der Einfluss der PL der Probe auf die Verdaulichkeit der Probe betrachtet werden, sondern der Einfluss der PL der TMR auf den Pansenfermentationsstatus. Die Änderung des Abbauverhaltens ist somit ein Resultat des veränderten Pansenmilieus.

Zu Versuchsbeginn wurde eine Probe von etwa 3 kg Frischsubstanz aus dem Heu und etwa 0,5 kg aus dem KF entnommen und auf TM- und NDF-Gehalt nach NAUMANN und BASSLER (1997) untersucht. Das Probenmaterial von Heu und KF

wurde in allen vier Versuchsabschnitten verwendet. In jedem Versuchsabschnitt wurden einen Tag vor der *in situ* Messung Proben von je etwa 5 kg FM TMR und MS entnommen, ein Teil davon wurde zur TM- und NDF-Bestimmung weiterverwendet. Während das Heu mit einer Schere auf 10 mm PL zerkleinert wurde, wurden frische MS und TMR in unveränderter (original) PL inkubiert. Die *in situ*-Beutel waren aus Polyester-Monofilament mit einer thermisch versiegelten Naht gefertigt (Ankom rumen sampling bags, Bar Diamond). Die Größe der Beutel betrug $10,5 \times 15 \text{ cm}$ (315 cm^2), und deren Porengröße lag bei etwa $53 \mu\text{m}$. Für jedes Substrat wurden 3 Parallelen mit jeweils 12 mg TM/cm^2 Nylonbeutel (Einwaage pro Beutel FM: MS 10 g, TMR 8,5 g, Heu 4 g, KF 5 g) eingewogen. Die *in situ*-Beutel wurden eine Stunde vor der Morgenfütterung an einem Gewicht in den ventralen Pansen gegeben. Die Inkubationszeit betrug 24 Stunden. Nach der Entnahme aus dem Pansen wurden die Beutel sofort auf Eis gelagert und umgehend eingefroren, um die Fermentationsvorgänge zu stoppen. Nach zwei Tagen wurden die Beutel aufgetaut und unter fließendem Wasser gereinigt. Darauf folgend wurden die Proben in einer Waschmaschine $3 \times 12 \text{ min}$ mit kaltem Wasser gewaschen. Die Ermittlung der TM-Verluste erfolgte durch 48-stündiges Trocknen in einem Umlufttrockenschrank bei 60°C und anschließendes Zurückwiegen. Die in den Beuteln verbliebenen Probenreste der Substrate wurden auf ihren NDF-Gehalt analysiert (VAN SOEST, 1991). Der Prozentsatz der verschwundenen TM und NDF wurde durch Berücksichtigung des nach der Inkubation noch in den Beuteln verbleibenden Anteils berechnet.

3.3.6 Bestimmung der Partikel- und Flüssigkeitspassage

Die Passage der festen Phase wurde mit Hilfe von markierten Heupartikeln, mit Yb als Yb-NDF, bestimmt. Für die Herstellung des Yb-NDF wurde das im Versuch verwendete Heu auf 2 mm gemahlen und die Partikel zwischen 1 - 2 mm ausgesiebt und für die nachfolgende Markierung mit Yb verwendet. Die Bestimmung der Flüssigkeitspassage erfolgte mit $\text{LiCo-EDTA} \times 3\text{H}_2\text{O}$. Die Vorbereitung der Marker wurde nach UDEN et al. (1980) und MAMBRINI & PEYRAUD (1993) durchgeführt.

145 g Yb-NDF und 15 g LiCo-EDTA wurden als „Pulse Dose“ am 11. Tag jedes Versuchsabschnitts vor der Morgenfütterung den Tieren direkt durch die Pansenfistel in den Pansen verabreicht. Der vorher verflüssigte LiCo-EDTA Marker konnte mit Hilfe

eines Schlauches zentral in die Faserschicht fließen, während das Yb-NDF manuell auf die kraniale Fasermatte im Pansen gelegt wurde. Zur Bestimmung des Nullpunktes und als Matrix für die Standardvorbereitung der Yb- und Co-Analyse wurde vor Verabreichung der Marker eine Kotprobe rektal entnommen (MOORE et al., 1992). Die Entnahme der Kotproben (ca. 200 g) begann 4 Stunden nach der Markerverabreichung und erfolgte 7 Tage lang zu folgenden Zeitpunkten (in Stunden nach der Markerverabreichung): 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 48, 52, 56, 60, 72, 84, 96, 104, 108, 120, 128, 132 und 144 Stunden. Die Proben wurden 72 Stunden lang bei 60°C getrocknet und anschließend auf 1 mm gemahlen.

Zur Analyse der Yb- und Co-Konzentration im Kot wurden 0,5 g des getrockneten Materials in 50 ml PTFE-Auflösungsgefäße eingewogen und nach Zugabe von 5 ml konzentrierter Salpetersäure (65 % suprapur, Fa. Merck) bei 180°C über 265 Minuten in einer Druckauflösungsapparatur nach TÖLG aufgeschlossen. Nach dem Aufschluss wurden die Gefäße geöffnet und etwa 30 Minuten auf einer Heizplatte bei 50°C abgeraucht, um die beim Aufschluss entstandenen nitrosen Gase zu entfernen. Die Aufschlusslösungen wurden in 50 ml Messkolben überführt und mit 1 ml einer 10 %-igen KCl (p.a. Fa. Merck) versetzt und anschließend bis zur Markierung mit bidestilliertem Wasser aufgefüllt. Nach Durchmischen der Proben wurden diese über einen Trichter mit Faltenfilter (Fa. Macherey & Nagel, Ø 15 cm, No 615 ¼) in 50 ml Plastikgefäße zur Aufbewahrung filtriert. Die Messung der Yb- und Co-Konzentration erfolgte am Atomabsorptions-Spektrometer (Spectra AA, Varian, 220 FS) durch eine oxidierende Luft-Acetylen-Flamme gegen Standard mit Kotmatrix (Yb = 398,8 nm, Co = 240,7 nm) (Tafaj et al., 2001a).

Die Passageparameter wurden mit dem Statistikprogramm SAS (2001) mit der Option PROC NLIN (Iterative Marquardt Methode) analysiert und nach einem Modell von MOORE et al. (1992) berechnet. Das Modell beinhaltet folgende Parameter:

- k_s : fraktionelle Passagerate im ersten Kompartiment mit langsamer Passage (Pansen, Haube)
- k_f : fraktionelle Passagerate im zweiten Kompartiment mit rascher Passage (post ruminal)
- TD: Zeitverzögerung, Zeit zwischen der Markereingabe und erstem Auftreten des Markers im Kot.
- RMRT: mittlere Verweilzeit im Pansen, = $1/k_s$.
- FMRT: mittlere Verweilzeit im postruminalen Verdauungstrakt, = $1/k_f$.

- TMRT: mittlere Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt,
= RMRT + FMRT + TD.

3.3.7 Erfassung des Pansenvolumens

Im GS-Versuch wurde den drei fistulierten Kühen der Panseninhalt über die Pansenfistel manuell ausgeräumt und während der Entleerung in einem isolierten und auf 38°C vorgewärmten Kunststofffass gesammelt. Der gesamte Panseninhalt, der Anteil der festen Digesta und der schöpfbaren Flüssigkeit wurde nach der Pansenentleerung erfasst (ROBINSON et al., 1987). Während der Entnahme wurden repräsentative Teilproben entnommen, zu einer Sammelprobe zusammengeführt und für die Nasssiebung bei - 21°C gelagert.

3.3.8 Messung der Partikelgrößenverteilung und Kinetik der Digesta

Die Kinetik der Partikel im Reticulorumen wurde definiert als der zeitliche Ablauf der Digestazusammensetzung unter Einwirkung wichtiger Einflussfaktoren (Zerkleinerungsrate, Wasserbindungskapazität, Viskosität, funktionelle spezifische Dichte, Integration in der Matte, mikrobieller Abbau und Passagerate).

Die Digestaprobe wurden den Kühen im GS-Versuch eine Stunde vor (-1 h) sowie sieben Stunden (7 h) und 11 Stunden (11 h) nach der Morgenfütterung bzw. im MS-Versuch eine Stunde vor (- 1 h), zwei Stunden (2 h), sieben Stunden (7 h) und 10 Stunden (10 h) nach der Morgenfütterung entnommen.

Die Probenahmetechnik erfolgte nach der Methode von TAJAJ et al. (2001) in zwei Digestaschichten, im dorsalen und im ventralen Bereich des Pansens (5 bis 10 cm unterhalb der Oberfläche der Fasermatte bzw. 5 bis 10 cm über dem Pansengrund). Da die entnommene Digestaprobe keine freie Flüssigkeit enthalten sollte, wurde die Probe direkt nach der Probenahme in einen Büchner-Trichter ($\varnothing = 200$ mm, Porenweite 0,064 mm) gegeben. Dieser wurde an eine Vakuumpumpe (Saugleistung 4 m³/h) angeschlossen und die freie Flüssigkeit für 10 min abgesaugt. Zunächst wurde ein Teil der Digestaprobe (ca. 120 g FM) für die TM-Bestimmung verwendet. Ein anderer Teil der Digestaprobe (ca. 150 g) wurde für die später folgende Bestimmung der Partikelgrößenverteilung bei - 21°C eingefroren. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in der festen Phase des Panseninhaltes als auch im Kot erfolgte mittels Nasssiebmethode nach LECHNER-DOLL (1986). Das

Probenmaterial wurde über eine Siebkaskade von 7 Sieben mit abnehmender Porengröße gesiebt. Hierzu stand eine Laborsiebeeinheit mit Nasssiebeeinrichtung (Analytical Sieve Shakers, Fa. Kurt Retsch GmbH & Co KG, Haan, Typ AS 200 Digit) zur Verfügung. Die Siebe hatten einen Durchmesser von 200 mm und eine Höhe von 50 mm. Die Siebporen waren quadratisch angeordnet mit einer Kantenlänge von 6,0; 4,0; 2,0; 1,18; 0,5; 0,125 und 0,063 mm. Von den aufgetauten Proben wurden pro Doppelbestimmung genau 40 g pro Parallele abgewogen, mit 400 ml destilliertem Wasser versetzt und eine Stunde eingeweicht. Nach dem Einweichen wurde jede Probe auf das oberste Sieb gebracht und für 12 Minuten, bei einem Wasserdurchlauf von ca. 2,9 l/min und einer Schwingungsamplitude von zwei, nass gesiebt. Eine standardisierte Sprüheinheit besprühte dabei das oberste Sieb mit Wasser, um eine gleichmäßige Wasserverteilung zu gewährleisten. Anschließend wurden die einzelnen Siebrückstände mit Hilfe von destilliertem Wasser in Faltenfilter (No 595 ½, Schleicher und Schuell, Dassel, Deutschland) überspült, deren Tara-Gewicht zuvor bestimmt wurde. Die Faltenfilter wurden für 24 Stunden bei 80°C getrocknet und nach einer Abkühlzeit von 12 Stunden zurückgewogen.

Die prozentuale Verteilung der retinierten Partikel auf den einzelnen Siebböden berechnete sich durch Division der retinierten Trockenmasse auf den einzelnen Sieben durch die Trockenmasse der Siebeeinwaage. Ein Mittelwert wurde aus den beiden Teilproben bestimmt. Die Masse der retinierten Trockensubstanz aller Siebböden, zusammen in Prozent der Trockenmasse der Siebeeinwaage ausgedrückt, als Differenz von 100, ergab den Anteil der löslichen Fraktion (< 0,063 mm) in Prozent. Des Weiteren erfolgte eine Zusammenfassung der retinierten Masse von bestimmten Siebfraktionen:

- Grob: retinierte Partikel auf Sieb 6,0; 4,0; 2,0 und 1,18 mm (> 1,18 mm).
- Fein: retinierte Partikel auf Sieb 0,5; 0,125 und 0,063 mm (> 0,063 – < 1,18 mm).
- Lösliche Fraktion: Flüssigkeit und feinste Stoffe, die das Sieb 0,063 mm passieren (< 0,063 mm).

Die mittlere Partikellänge (MPL) wurde nach der Gleichung von FISHER et al. (1988) mit Hilfe der NLIN-Prozedur des SAS-Programms (Version 8.2) (ohne lösliche Fraktion; 0 mm = 100 %) folgendermaßen berechnet:

$$R = 100 e^{-k(s-w)}$$

- R: Gewichtanteil größer als jedes gegebene s.
- s: Siebporengröße von auf dem Sieb retinierten Partikeln.
- w: kleinste schätzbare Partikelgröße (0,063 mm).
- k: der konstante Abfall der exponentiellen Kurve.

3.3.8.1 Erfassung der funktionellen spezifischen Dichte der Digesta

Im GS-Versuch wurde die funktionelle spezifische Dichte (FSG) der festen Phase der Digesta direkt nach den Probenahmen nach der Volumenverdrängungsmethode von STAMM (1964) und WILFONG (1966), modifiziert von HOPPER und WELCH (1985), ermittelt. Eine weitere Modifizierung wurde von den Versuchsanstellern dieser Arbeit vorgenommen, um eine exakte Parallelbestimmung von abgepressten Digestapartikeln (feste Phase) zu erhalten.

Von dem zu analysierenden Material wurden Doppelbestimmungen angefertigt. Das Tara von 37°C warmen 50 ml Pycnometern nach HUBART musste zu Beginn bestimmt werden. Anschließend wurden 3,0 g frische Digesta auf 10 mg genau in die Pycnometer eingewogen und mit einer Lösung aus bidestilliertem Wasser, 0,5 g/l Natriumazid und 0,4 ml/l Veracin-Compositum (A. Albrecht, Aulendorf, 1 ml enthält 80.000 IE. Benzathin-Benzylpenicillin, 120.000 IE. Procain-Penicillin G und 200.000 IE. Dihydrostreptomycinsulfat) aufgefüllt, um jegliche mikrobielle Aktivität zu unterdrücken. Im Anschluss wurden die Pycnometer für eine Stunde in ein 37°C warmes Wasserbad gestellt, um das Probenmaterial vollständig einzuweichen. Um mögliche Gasbläschen (Luftbläschen) von den Partikeln zu lösen, wurden die Pycnometer 5 min bei 37°C und 134 × g zentrifugiert, mit der Lösung wieder bis zur Eichmarke aufgefüllt und ein weiteres Mal unter denselben Bedingungen zentrifugiert. Als nächster Schritt standen sie nochmals für eine halbe Stunde in einem 37°C warmen Wasserbad und konnten danach zurückgewogen werden. Nachdem sie gewogen und entleert waren, wurden sie erneut mit 37°C warmer Lösung befüllt gewogen. Die Berechnung der funktionellen spezifischen Dichte (FSG) erfolgte nach

der Formel von WILFONG (1966) und wurde nur ausgewertet, wenn die Abweichung der Doppelbestimmung kleiner als 10 % war (SICILIANO-JONES und MURPHY, 1991):

$$\text{Dichte (g TM/ml)} = (W_d \times \rho) / [(W_o - (W_1 - W_d))]$$

- W_d : Trockensubstanz-Probe (g TM)
- W_o : Pycnometer mit Lösung – Pycnometer Tara
- W_1 : Gewicht der Probe mit Lösung
- ρ : Dichte der Lösung, sie betrug 0,99 g/ml und wurde gleich 1 gesetzt

3.3.9 Messung der Partikelgrößenverteilung in den Komponenten und der TMR

Die Beurteilung der Partikelgrößenverteilung des Grundfutters erfolgte für die Grassilage, die Maissilage und die entsprechenden Gesamtmischrationen über eine Trocken- und eine Nasssiebmethode.

3.3.9.1 Trockensiebung mit dem Penn State Particle Separator (PSPS)

Im GS-Versuch wurde die Trockensiebung mit dem ersten Modell der PSPS nach LAMMERS et al. (1996) durchgeführt. Diese Schüttelbox besteht aus einer Kaskade von zwei Rundlochsieben (Siebporendurchmesser 19 und 8 mm) und einer Sammelbox, welche die Partikel < 8 mm aufnimmt. Im MS-Versuch wurde das neue Modell der NPSPS nach KONONOFF et al. (2003b) verwendet. Dieses unterscheidet sich vom ersten PSPS-Modell dadurch, dass in der Siebkaskade über der Sammelbox noch ein Quadratlochsieb mit Porenweite 1,18 mm eingefügt ist. In der Handhabung gibt es keine Unterschiede zwischen den beiden Modellen.

Es wurden drei Parallelen je Probe gesiebt und ein Mittelwert gebildet. Eine Probe von 250 g FM wurde locker auf das oberste Sieb geschüttet. Die Schüttelbox wurde auf einer ebenen und glatten Fläche platziert und kräftig 5 Mal hin und her bewegt. Nach dem 5-maligen Schütteln wurde die Box um eine Vierteldrehung rotiert und der Prozess 7 Mal wiederholt, sodass die Box 8 Mal gedreht bzw. die Probe 40 Mal durch die Siebe geschüttelt wurde. Anschließend wurden die einzelnen Fraktionen (Siebe und Siebboden) gewogen und die prozentuale Verteilung bestimmt.

3.3.9.2 Nasssiebanalyse

Die Nasssiebanalyse der TMR-Komponenten und der TMR erfolgte nach der Methode von LECHNER-DOLL (1986), wie unter Punkt 3.3.8 beschrieben, durchgeführt. Es wurden aus jeder GS-, MS- und TMR-Probe je drei repräsentative Teilproben für die Analyse entnommen. Zur Bestimmung der Partikelverteilung wurde das Probenmaterial über eine Kaskade von acht Sieben (10,0; 6,0; 4,0; 2,0; 1,18; 0,5; 0,125 und 0,063 mm) abnehmender Porengröße nass gesiebt und anschließend wie unter Punkt 3.3.8 ausgewertet.

3.3.10 Bewertung der Struktureigenschaften der TMR

Die TMR wurde nach verschiedenen aktuell in der Literatur diskutierten Methoden (HOFFMANN, 1990; LAMMERS, 1996; MERTENS, 1997; DE BRABANDER 1999) bewertet.

3.3.10.1 Strukturwirksame Rohfaser nach HOFFMANN (1990)

Als Faktor (f) für die Strukturwirksamkeit der Rohfaser der Maissilage wurde 0,9 unterstellt. Dieser Faktor wurde bei der Grassilage nach Angaben von HOFFMANN (1990) mit Hilfe einer Regressionsgleichung unter Berücksichtigung des Gehaltes an Rohfaser (XF, g/kg TM) und an Trockenmasse (TM, g/kg) berechnet.

- Heu: $f = 1,0$
- Maissilage: $f = 0,9$
- Grassilage: $f = - 0,0903 + 0,000079 \times TM + 0,00356 \times XF$

Der Bedarf einer laktierenden Kuh liegt nach HOFFMANN (1990) bei 400 g strukturwirksamer Rohfaser pro 100 kg Lebendmasse

3.3.10.2 Strukturwert nach DE BRABANDER (1999)

Der Strukturwert (SW) wurde entsprechend den Angaben von DE BRABANDER et al. (1999a und b) berechnet (Nährstoffgehalte in g/kg TM):

- Heu: $SW = (0,0125 \times XF - 0,2) \times 1,06$
- Grassilage: $SW = (0,0125 \times XF) - 0,2$
- Maissilage: $SW = (0,0090 \times XF) - 0,1$

- Krafffutter: $SW = (0,321 + (0,00098 \times XF) + (0,00025 \times bXS) - [0,00112 \times (XZ + a \times (XS - bXS))])$
 $a = 0,9 - (1,3 \times XS - \text{Beständigkeit})$

Der SW der Maissilage gilt nur für eine Häcksellänge von 6 mm. Deshalb wurden die von DE BRABANDER empfohlenen Korrekturen verwendet, das heißt bei Reduzierung der PL um 1 mm wurde ein Abschlag bzw. bei Erhöhung der PL wurde ein Zuschlag von 2 % auf den SW vorgenommen. Des Weiteren wurden folgende Korrekturen zur Berechnung des Mindeststrukturwerts entsprechend der Leistung der Tiere durchgeführt:

- > 25 kg Milch/ Tag: SW + 0,01/kg Milch
- < 25 kg Milch/ Tag: SW + 0,01/kg Milch
- < 44 g Milchfett/ kg: SW + 0,005/g Milchfett
- > 44 g Milchfett/ kg: SW - 0,005/g Milchfett

Nach DE BRABANDER et al. (1999a und b) sollte ein Mindeststrukturwert von $\geq 1,0$ je kg Trockenmasse zusätzlich der angeführten Korrekturen angestrebt werden. Dies bedeutet für die Grassilage-TMR ein SW von mindestens 1,15 bzw. für die Maissilage-TMR 1,17.

3.3.10.3 Physikalisch effektive NDF (peNDF_M) nach MERTENS (1997)

Die peNDF_M wurde nach den Empfehlungen von MERTENS (1997) mit Hilfe der NDF-Aufnahme (kg/d) und den Faktoren der physikalischen Effektivität (PEF) der einzelnen TMR-Komponenten berechnet:

- Heu: PEF = 1,0
- Grassilage:
 - PL 25 mm: PEF = 0,95
 - PL 11 mm: PEF = 0,90
 - PL 5,5 mm: PEF = 0,85

- Maissilage:
 - PL 14 mm: PEF = 0,90
 - PL 8,1 mm: PEF = 0,85
 - PL 5,5 mm: PEF = 0,80
- Krafftutter: PEF = 0,40

Der Anteil der $peNDF_M$ an der gesamten TM-Aufnahme pro Tag sollte nach MERTENS (1997) mindestens bei 22 % liegen.

3.3.10.4 Physikalisch effektive NDF ($peNDF_L$, $peNDF_K$) nach LAMMERS (1996) und KONONOFF (2003)

Die $peNDF_L$ wurde entsprechend der Angaben von LAMMERS et al. (1996) ermittelt. Hierzu wurde das Ergebnis der Messung der Partikelgrößenverteilung nach der PSPS und der NDF-Aufnahme (kg/d) verwendet. Der $peNDF_L$ -Gehalt ist ein Resultat des NDF-Gehalts der TMR multipliziert mit dem prozentualen Anteil der TM retiniert auf den Sieben > 8 mm. Im MS-Versuch konnte auf Grund der Verwendung des New Penn State Partikel Separators (NPSPS) auch die $peNDF_K$ nach KONONOFF et al. (2003b) ermittelt werden. Dabei wurde bei der Berechnung so vorgegangen wie bei der Bestimmung der $peNDF_L$, es wurde jedoch der prozentuale Anteil der TM retiniert auf den Sieben > 1,18 mm verwendet.

Von LAMMERS et al. (1996) bzw. KONONOFF et al. (2003b) wurden keine Angaben zum Mindestgehalt von $peNDF_L$ bzw. $peNDF_K$ gemacht, sondern nur eine Aussage zur Optimalverteilung des PSPS- bzw. NPSPS-Ergebnisses. Daher wurden die Empfehlungen von MERTENS (1997) mit mindestens 22 % der TM-Aufnahme für $peNDF_L$ angenommen.

4 Ergebnisse

4.1 Grassilage-Versuch

4.1.1 Einfluss der Partikellänge auf die Leistungsparameter

Die Ergebnisse der Futteraufnahme, Faseraufnahme, Energieaufnahme sowie Milchleistung und -inhaltsstoffe sind für alle Behandlungen in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Futteraufnahme, Faseraufnahme, Energieaufnahme, Milchleistung und Milchinhaltsstoffe (Lsmeans \pm SEM, n = 13)

Parameter	PL der GS-TMR			SEM	$P^1 < 0,05$
	25 mm	11 mm	5,5 mm		
Mittlerer Laktationstag	51	107	82		
TM-Aufnahme, kg/d	19,6 ^b	22,1 ^a	21,8 ^a	0,33	PL
TM-Aufnahme, g/kg LM ^{0,75}	159,3 ^b	176,1 ^a	172,4 ^a	4,71	PL
NDF, kg/d	6,9 ^b	8,2 ^a	8,0 ^a	0,30	PL
peNDF _L ² , kg/d	4,1 ^a	4,2 ^a	3,5 ^b	0,13	PL
NEL, MJ/d	139,8 ^b	162,6 ^a	156,2 ^a	5,83	PL
NFC ⁴ , kg/d	7,4 ^b	8,5 ^a	8,0 ^a	0,22	PL
FECM ³ , kg/d	40,5	41,3	40,5	2,54	n.s.
Milchfett, %	3,81 ^b	4,21 ^a	3,84 ^b	0,12	PL, LD
Milchfett, kg/d	1,59	1,68	1,60	0,13	n.s.
Milcheiweiß, %	3,01 ^b	3,55 ^a	3,25 ^b	0,11	PL
Milcheiweiß, kg/d	1,25	1,41	1,34	0,06	n.s.
Laktose, %	4,79	4,86	4,85	0,05	n.s.

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, LD = Laktationstag.

² Physikalisch Effektive Faser nach LAMMERS et al. (1996).

³ Fett-Eiweiß-Korrigierte-Milch.

⁴ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).

Mit der Abnahme der PL von 25 auf 11 bzw. 5,5 mm erhöhte sich die TM-Aufnahme von 19,6 auf 22,1 bzw. 21,8 kg sowie die TM-Aufnahme pro kg metabolische Lebendmasse signifikant. Resultierend daraus nahm die Aufnahme an NDF, NEL und NFC für diese Behandlung signifikant zu. Während sich die peNDF_L-Aufnahme der Behandlungen 25 und 11 mm nicht unterschied, wurde diese bei Verringerung der PL von 11 auf 5,5 mm von 4,2 auf 3,5 kg pro Tag statistisch abgesichert reduziert.

Der Faktor PL hatte keine Wirkung auf die tägliche Fett-Eiweiß-korrigierte-Milchleistung. Der Milchfettgehalt wurde primär von der Laktationsphase ($P < 0,001$) beeinflusst, während der Milcheiweißgehalt in erster Linie von der PL beeinflusst wurde. Bei Verringerung der PL der Grassilage von 25 auf 11 mm stieg der Milchfett- (3,81 vs. 4,21 %) bzw. Milcheiweißgehalt (3,01 vs. 3,55 %) signifikant an, wobei eine weitere Reduzierung der PL auf 5,5 mm den Gehalt wieder statistisch abgesichert senkte. Auf den Laktosegehalt der Milch konnte keine Wirkung der PL festgestellt werden.

4.1.2 Parameter der Kauaktivität

Die wichtigsten Parameter zur Kauaktivität sind in den Tabellen 4.2 und 4.3 zusammengefasst. In Tabelle 4.2 ist die tatsächlich gemessene Kauaktivität (min/d) der Kühe dargestellt. Die Kauparameter auf TM- und Faseraufnahme bezogenen sind in Tabelle 4.3 angegeben.

Tabelle 4.2. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Kauaktivität von Milchkühen (Lsmmeans \pm SEM, $n = 4$)

Parameter	PL der GS-TMR			SEM	$P^1 < 0,05$
	25 mm	11 mm	5,5 mm		
Kauzeit (min/ 24h)	922	928	884	22,52	n.s.
Fresszeit (min/ 24h)	403	369	345	29,42	n.s.
Wiederkauzeit (min/ 24h)	472	491	498	21,78	n.s.
Kauschläge/ 24h	59256	59904	58002	1826	n.s.
Kauschläge/ min	64,3	64,5	65,6	1,55	n.s.
Wiederkauschläge/ 24h	36554	35580	35804	1901	n.s.
Wiederkauschläge/ min	77,1	73,7	71,7	3,37	n.s.
Wiederkauperioden/ 24h	13,8	14,2	14,6	0,67	n.s.
Wiederkauperiode (min)	34,2	35,1	34,5	1,91	n.s.
Zahl der Bissen/ 24h	541,3	534,2	510,1	37,16	n.s.
Wiederkauschläge/ Bissen	61,1 ^b	66,3 ^a	69,9 ^a	1,99	PL

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, A = Tier.

Die kürzeste Kau- und Fresszeit (884 und 345 min/d) wurde bei der Behandlung 5,5 mm beobachtet. Nahezu identische Kauzeiten (922 bzw. 928 min

min/d) konnten bei den Behandlungen 25 und 11 mm festgestellt werden, während die Behandlung 25 mm die tendenziell längste Fresszeit aufwies. Statistisch abgesicherte Unterschiede wurden jedoch in der Kau-, Fress-, und Wiederkauzeit nicht festgestellt. Ebenso wurde die Gesamtzahl an Kau- und Wiederkauschlägen vom Faktor PL nicht signifikant beeinflusst. Bei den Wiederkauschlägen wurde die Tendenz beobachtet, dass mit Reduzierung der PL die Anzahl der Wiederkauschläge pro Minute (77,1 vs. 71,7) abnahm. Im Gegensatz dazu hatte der Faktor PL einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Wiederkauschläge pro Bissen. Diese wurde von 61,1 auf 66,3 Wiederkauschläge pro Bissen bei Reduzierung der PL von 25 auf 11 mm erhöht, wobei eine weitere Zerkleinerung der PL auf 5,5 mm (69,9 Wiederkauschläge pro Bissen) keinen Einfluss mehr zeigte.

Tabelle 4.3. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Kauindices von Milchkühen, bezogen auf die Gesamtmischung (Lsmeans \pm SEM, n = 4).

Parameter	PL der GS-TMR			SEM	$P^1 < 0,05$
	25 mm	11 mm	5,5 mm		
<i>Kauen</i>					
Kauzeit (min/ kg TM)	46,6	42,2	42,5	3,09	n.s.
Kauzeit (min/ kg NDF)	135,8	120,6	119,2	8,93	n.s.
Kauzeit (min/ kg peNDF _L ²)	231,0 ^b	231,8 ^b	272,0 ^a	16,05	PL
<i>Fressen</i>					
Fresszeit (min/ kg TM)	20,7	16,7	16,4	2,02	n.s.
Fresszeit (min/ kg NDF)	60,3	47,9	46,1	5,83	n.s.
Fresszeit (min/ kg peNDF _L)	102,6	91,9	105,2	10,54	n.s.
<i>Wiederkauen</i>					
Wdkauzeit (min/ kg TM)	23,6	22,2	24,1	1,47	n.s.
Wdkauzeit (min/ kg NDF)	68,7	63,5	67,4	4,17	n.s.
Wdkauzeit (min/ kg peNDF _L)	117,0 ^b	122,1 ^b	154,0 ^a	8,42	PL
<i>Kauschläge</i>					
Kauschläge/ g TM	3,0	2,7	2,8	0,22	n.s.
Kauschläge/ g NDF	8,7	7,8	7,8	0,64	n.s.
Kauschläge/ g peNDF _L	14,8 ^b	15,0 ^b	17,9 ^a	1,20	PL

^{abc} Kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² Physikalisch effektive Faser nach LAMMERS et al. (1996).

Bei Betrachtung der Kauindices in Tabelle 4.3 konnte gezeigt werden, dass der Faktor PL die Kauzeit und die Wiederkauzeit (min/ kg peNDF_L) sowie die Kauschläge pro g physikalisch effektive NDF_L statistisch abgesichert beeinflusste. Die Kauzeit in Minuten pro kg TM bzw. pro kg NDF nahm mit Reduzierung der PL numerisch ab. Im Gegensatz dazu erhöhte sich die Kauzeit in Minuten pro kg peNDF_L signifikant bei

Verringerung der PL von 25 bzw. 11 auf 5,5 mm (231,0 bzw. 231,8 vs. 272,0 min/kg peNDF_L). Die Fresszeit in Minuten pro kg TM bzw. pro kg NDF wurde mit abnehmender PL numerisch verringert. Mit Reduzierung der PL von 11 auf 5,5 mm nahmen sowohl die Wiederkauzeit von 122,1 auf 154,0 min pro kg peNDF_L als auch die Kauschläge von 15,0 auf 17,9 pro g peNDF_L signifikant zu, wobei eine Erhöhung der PL von 11 auf 25 mm keine Veränderung zeigte.

4.1.3 Einfluss der Partikellänge auf die Partikelkinetik

4.1.3.1 Einfluss der Partikellänge auf die Partikelgrößenverteilung von TMR, Digesta und Kot

Die Ergebnisse der Kovarianzanalyse der Partikelgrößenverteilung (Nasssiebanalyse) von TMR, Digesta und Kot werden in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (retinierte TM in %) von TMR, Digesta und Kot (Lsmeans ± SEM, n = 4).

	PL der GS-TMR			SEM	P ¹ <0,05
	25 mm	11 mm	5,5 mm		
TMR					
r.P. ⁴ > 1,18 mm	45,5 ^a	43,4 ^{ab}	40,4 ^b	1,62	PL
r.P. > 0,063 – < 1,18 mm	15,6	17,9	17,3	1,10	n.s.
Lösliche Fraktion ²	38,9	38,6	42,3	2,22	n.s.
MPL ³ , mm	5,7 ^a	4,0 ^b	3,0 ^c	0,32	PL
Digesta (Pansen)					
r.P. > 1,18 mm	44,0 ^{ab}	41,9 ^b	45,3 ^a	0,86	PL
r.P. > 0,063 – < 1,18 mm	29,4 ^b	33,0 ^a	32,3 ^a	0,55	PL
Lösliche Fraktion	26,7 ^a	25,1 ^a	22,4 ^b	0,76	PL
MPL, mm	3,6 ^a	3,1 ^b	3,3 ^{ab}	0,16	PL
Kot					
r.P. > 1,18 mm	6,2 ^{ab}	5,3 ^b	7,8 ^a	0,95	PL
r.P. > 0,063 – < 1,18 mm	36,8	35,2	37,4	1,15	n.s.
Lösliche Fraktion	56,9 ^{ab}	59,5 ^a	54,6 ^b	1,28	PL
MPL, mm	0,13 ^a	0,11 ^b	0,15 ^a	0,01	PL

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² Flüssigkeit und feinste Stoffe, die das Sieb 0,063 mm passieren.

³ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

⁴ Retinierte Partikel.

Die Siebfraktion grob (> 1,18 mm) und die mittlere Partikellänge (MPL) der TMR wurden signifikant vom Faktor PL beeinflusst. Mit Reduzierung der PL der Grassilage von 25 auf 5,5 mm nahm die Siebfraktion grob (retinierte Partikel

> 1,18 mm) statistisch abgesichert ab, während sich die Behandlung 11 mm nicht von den anderen Behandlungen unterschied. Die MPL der TMR reduzierte sich mit abnehmender PL von 25 über 11 auf 5,5 mm signifikant (5,7 vs. 4,0 vs. 3,0 mm).

Der Faktor PL hatte auf alle drei Siebfractionen (grob, fein und lösliche Fraktion) der Digesta sowie die MPL einen statistisch abgesicherten Einfluss. Mit Verringerung der PL der Grassilage von 25 auf 11 mm nahm der Anteil der Siebfraction grob tendenziell ab, während eine weitere Zerkleinerung von 11 auf 5,5 mm (41,9 vs. 45,3 %) zu einer signifikanten Zunahme führte. Die Behandlungen 11 und 5,5 mm wiesen die meisten feinen Partikel (> 0,063 - < 1,18 mm) auf, des Weiteren hatte die Behandlung 5,5 mm den geringsten Anteil an löslicher Fraktion. Auf Grund dieser Partikelgrößenverteilung konnte bei der Behandlung 11 mm die kürzeste MPL von 3,1 mm festgestellt werden.

Der Anteil der groben Partikel, die lösliche Fraktion und die MPL im Kot wurden von dem Faktor PL signifikant beeinflusst. Die Behandlung 11 mm hatte im Vergleich zur Behandlung 5,5 mm den signifikant geringsten Anteil an groben Partikeln und den höchsten Anteil an der löslichen Fraktion, während sich die PL 25 mm nur numerisch von beiden unterschied. Hierin spiegelte sich die MPL wider: Mit Reduzierung der PL der GS von 25 auf 11 mm verringerte sich die MPL von 0,13 auf 0,11 mm im Kot signifikant, wobei eine weitere Zerkleinerung auf 5,5 mm wieder zu einer deutlichen Zunahme der MPL auf 0,15 mm führte.

Bei vertikaler Betrachtung der Tabelle 4.4 kann die Partikeldynamik beobachtet werden. Der Anteil der groben Partikel wurde von TMR über Digesta zum Kot deutlich reduziert, während der Anteil der feinen und löslichen Fraktion zunahm.

4.1.3.2 Einfluss der Partikellänge auf die Partikelgrößenverteilung der Digesta

Die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung der Digesta im dorsalen und ventralen Reticulorum eine Stunde vor, 2 und 11 Stunden nach der Morgenfütterung, bestimmt anhand einer Nasssiebanalyse, werden in Tabelle 4.5 vorgestellt. Die MPL, die lösliche Fraktion sowie die Siebfractionen grob und fein wurden von den Faktoren PL und Digestaschicht (P) signifikant beeinflusst. Des Weiteren war eine statistisch abgesicherte zweifache Wechselwirkung von PL und Zeitpunkt (Zp) bei den groben Partikeln und der löslichen Fraktion festzustellen.

4 Ergebnisse

Dagegen wirkte sich die zweifache Wechselwirkung von P und Zp signifikant auf die feinen Partikel und die MPL aus.

Tabelle 4.5. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (retinierte TM in %) und die MPL (mm) der Digesta im dorsalen und ventralen Reticulorum eine Stunde vor, 2 und 11 Stunden nach der Morgenfütterung (Lsmeans \pm SEM, n = 4).

Zp ⁴	Dorsal			Ventral			SEM	P ¹ <0,05
	25mm	11mm	5,5mm	25mm	11mm	5,5mm		
r.P. ² >1,18 mm								
-1h	42,5	47,2	45,7	35,4 ^b	38,0 ^{ab}	41,9 ^a	1,77	PL, P,
2h	48,0	43,5	46,2	46,9 ^a	38,0 ^b	46,8 ^a	1,77	ZP,
11h	44,4	44,0	45,6	46,7 ^a	40,6 ^b	45,6 ^a	1,77	PL•ZP
r.P. >0,063 – <1,18 mm								
-1h	27,6 ^b	31,8 ^a	31,7 ^a	32,6 ^b	35,0 ^{ab}	36,5 ^a	1,22	PL, P,
2h	28,5 ^b	31,6 ^{ab}	32,2 ^a	30,8 ^b	35,9 ^a	31,4 ^b	1,22	ZP,
11h	28,8 ^b	33,3 ^a	32,0 ^{ab}	27,9	30,2	30,2	1,22	P•ZP
Lösliche Fraktion								
-1h	29,9 ^a	20,9 ^b	22,5 ^b	32,0 ^a	27,0 ^b	21,7 ^c	1,72	PL, P, PL•ZP
2h	23,5	24,9	21,6	22,3	26,1	21,7	1,72	
11h	26,8	22,7	22,3	25,3 ^b	29,2 ^a	24,2 ^b	1,72	
MPL ³ , mm								
-1h	3,7	4,0	3,5	2,3	2,4	2,6	0,32	PL, P, P•ZP
2h	4,3	3,5	3,5	3,8 ^a	2,4 ^b	3,6 ^a	0,32	
11h	3,5	3,5	3,3	4,1 ^a	2,8 ^b	3,2 ^b	0,32	

^{abc} Kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, P = Digestaschicht, Zp = Zeitpunkt und deren Wechselwirkung.

² Retinierte Partikel.

³ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

⁴ Zeit der Probenahme: 1 h vor, 2 und 10 h nach der Morgenfütterung.

Die Behandlung 11 mm wies ventral 2 und 11 h nach der Morgenfütterung den geringsten Anteil an groben Partikeln (> 1,18 mm) auf, während 1 h vor der Morgenfütterung der Anteil der groben Partikel mit abnehmender PL von 25 mm über 11 mm auf 5,5 mm signifikant stieg. Der Anteil der groben Partikel der Behandlungen 11 und 5,5 mm veränderte sich kaum über den Tag. Im Gegensatz dazu erhöhte sich bei der Behandlung 25 mm der Anteil der groben Partikel von 1 h vor der Morgenfütterung bis 2 h danach signifikant, im weiteren Verlauf blieb er konstant.

Im dorsalen Reticulorum nahm der Anteil der feinen Partikel (> 0,063 - < 1,18 mm) mit Verringerung der PL von 25 auf 11 bzw. 5,5 mm zu allen Zeitpunkten signifikant zu, ventral war dies nur 1 h vor der Morgenfütterung zutreffend, während der feine Partikelanteil 2 h nach der Morgenfütterung für die Behandlung 11 mm am höchsten war. Im Zeitverlauf wurden dorsal keine Veränderungen festgestellt,

dagegen reduzierte sich ventral der Anteil an feinen Partikeln mit der Zeit nach der Morgenfütterung.

Mit Abnahme der PL von 25 auf 11 mm verringerte sich 1 h vor der Morgenfütterung die lösliche Fraktion dorsal und ventral signifikant. Die Behandlung 11 mm verzeichnete 2 und 10 h nach der Morgenfütterung die numerisch bzw. statistisch abgesicherten höchsten Werte an löslicher Fraktion. Im Zeitverlauf verhielten sich die Behandlungen 11 und 5,5 mm konstant, während sich der Anteil der löslichen Fraktion bei Behandlung 25 mm bis 2 h nach der Morgenfütterung deutlich reduzierte.

Die MPL nahm ventral 2 und 10 h nach der Morgenfütterung mit Verringerung der PL von 25 auf 11 mm (3,8 vs. 2,4 bzw. 4,1 vs. 2,8 mm) signifikant ab, während 2 h nach der Morgenfütterung eine weitere Zerkleinerung auf 5,5 mm wieder zu einer statistisch abgesicherten Zunahme führte. Die Veränderung der MPL wurde dorsal im Tagesverlauf mit abnehmender PL von 25 über 11 auf 5,5 mm geringer, dagegen hatte im ventralen Reticulorum die Behandlung 11 mm die größte Konstanz der MPL.

4.1.3.3 Einfluss der Partikellänge auf die funktionelle spezifische Dichte der Digesta

In Tabelle 4.6 ist der Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die funktionelle spezifische Dichte der Digesta in unterschiedlichen Digestaschichten (D) des Pansens eine Stunde vor, 2 und 11 Stunden nach der Fütterung dargestellt.

Tabelle 4.6. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die funktionelle spezifische Dichte der Digesta in unterschiedlichen Digestaschichten (D) des Pansens an drei verschiedenen Zeitpunkten (Lsmeans \pm SEM, $n = 6^2$).

Zp ³	Dorsal			Ventral			SEM	P ¹ <0,05
	25 mm	11 mm	5,5 mm	25 mm	11 mm	5,5 mm		
-1 h	1,36 ^b	1,50 ^a	1,42 ^{ab}	1,42	1,51	1,41	0,043	PL
2 h	1,34 ^b	1,44 ^a	1,39 ^{ab}	1,40 ^{ab}	1,46 ^a	1,38 ^b	0,025	PL
11 h	1,43	1,45	1,45	1,46	1,44	1,46	0,031	n.s.

^{abc} Kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen innerhalb der D und den Zp.

^{n.s.} Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, P = Digestaschicht und PL•P = Wechselwirkung zwischen der PL und P.

² Signifikanzniveau für Zeitpunkt der Probenahme (Zp), getestet anhand eines Modells für zweifach wiederholte Messungen ($P < 0,05$).

³ Zeit der Probenahme; eine Stunde vor, 2 und 11 Stunden nach der Fütterung.

Sowohl 1 h vor als auch 2 h nach der Fütterung wirkt sich der Faktor PL signifikant auf die funktionelle spezifische Dichte aus. In der dorsalen Digestaschicht erhöhte sich mit Verringerung der PL von 25 auf 11 bzw. 5,5 mm die funktionelle spezifische Dichte signifikant bzw. numerisch. Ventral zeigte sich ein ähnliches Bild, die Behandlung 11 mm hatte 1 h vor bzw. 2 h nach der Fütterung, die tendenziell bzw. signifikant höchste funktionelle spezifische Dichte. Sowohl dorsal als auch ventral war 11 h nach der Fütterung kein Unterschied zwischen den PL festzustellen.

4.1.3.4 Einfluss der Partikellänge auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage sowie das Pansenvolumen

Der Einfluss der PL der Grassilage auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage sowie das Pansenvolumen sind Tabelle 4.7 zu entnehmen.

Tabelle 4.7. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage sowie das Pansenvolumen (Lsmeans \pm SEM, n = 4).

Parameter	PL der GS-TMR			SEM	$P^1 < 0,05$
	25 mm	11 mm	5,5 mm		
Partikelpassage					
k_s^2 (/h)	0,02 ^b	0,03 ^a	0,03 ^a	0,002	PL.
k_f^3 (/h)	0,16	0,14	0,15	0,03	n.s.
TD ⁴ , h	9,5 ^a	7,0 ^{ab}	6,6 ^b	1,03	PL
RMRT ⁵ , h	45,2	36,6	40,1	3,51	n.s.
FMRT ⁶ , h	6,6	7,7	8,7	0,79	n.s.
TMRT ⁷ , h	61,3 ^a	51,3 ^b	55,5 ^{ab}	2,96	PL
Flüssigkeitspassage					
k_s (/h)	0,09	0,11	0,10	0,01	n.s.
k_f (/h)	0,66	1,66	2,64	0,91	n.s.
TD, h	6,5	6,2	5,1	1,27	n.s.
RMRT, h	11,0	9,3	10,9	0,91	n.s.
FMRT, h	4,8	2,4	3,0	1,33	n.s.
TMRT, h	22,3 ^a	17,9 ^b	19,0 ^b	1,37	PL
Pansenvolumen					
Panseninhalt, kg/ 100 kg LM	18,1	19,5	17,6	2,10	n.s.
davon: „bailable liquids“ ⁸ , %	2,77 ^b	7,33 ^a	5,85 ^{ab}	3,78	PL

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² k_s = fraktionelle Passage aus dem Reticulorumen.

³ k_f = fraktionelle post ruminale Passage.

⁴ TD = Time Delay (Zeitverzögerung).

⁵ RMRT = ruminale Verweilzeit, ($1/k_s$).

⁶ FMRT = Verweilzeit im postruminalen Verdauungstrakt, ($1/k_f$).

⁷ TMRT = Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt (TD+RMRT+FMRT).

⁸ „schöpfbare Pansenflüssigkeit“.

Die Passagerate aus dem Reticulorumen, Time Delay und die Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt der Partikelpassage wurden vom Faktor PL signifikant beeinflusst. Mit Reduzierung der PL von 25 auf 11 bzw. 5,5 mm nahm die Partikelpassagerate (0,02 vs. 0,03) aus dem Reticulorumen signifikant zu. Die Abnahme der PL von 25 über 11 auf 5,5 mm führte zu einer signifikant geringeren Zeitverzögerung (TD) zwischen Markereingabe und erstem Auftreten des Yb-Markers im Kot. Auf Grund der hohen Passagerate aus dem Reticulorumen und der daraus folgenden kürzeren Verweilzeit im Reticulorumen hatte die Behandlung 11 mm die statistisch abgesichert kürzeste Verweilzeit von 51,3 Stunden der Partikel im gesamten Verdauungstrakt. Im Gegensatz dazu wies die Variante 25 mm die längste Verweilzeit auf (61,3 h).

Bei den Parametern der Flüssigkeitspassage wurde nur die Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt von der PL signifikant beeinflusst. Die Behandlung 11 mm hatte die numerisch kürzeste Verweilzeit im Reticulorumen sowie im postruminalen Verdauungstrakt. Daraus ergab sich, dass mit Verringerung der PL der Grassilage von 25 auf 11 mm die Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt signifikant abnahm, während eine weitere Zerkleinerung der PL auf 5,5 mm zu keiner weiteren Reduzierung der Verweilzeit führte.

Der Anteil der „schöpfbaren Flüssigkeit“ („bailable liquids“) wurden von der PL signifikant beeinflusst. Mit Abnahme der PL von 25 auf 11 mm wurde der Anteil der schöpfbaren Flüssigkeit von 2,77 % auf 7,33 % erhöht, während eine weitere Reduzierung der PL auf 5,5 mm wieder zu einer Verringerung der schöpfbaren Flüssigkeit auf 5,85 % führte. Eine Reduzierung der PL der Grassilage von 25 auf 11 mm führte zu einer numerischen Zunahme des Panseninhalts (18,1 vs. 19,5 kg/ 100 kg LM) (Tabelle 4.6), während eine weitere Zerkleinerung auf 5,5 mm eine Verringerung des Panseninhalts (17,6 kg/ 100 kg LM) bewirkte.

4.2 Maissilage-Versuch

4.2.1 Qualität und Strukturwirksamkeit von Maissilage- und TMR-Varianten

Die Ergebnisse der chemischen Zusammensetzung, der Gärparameter, der Partikelgrößenverteilung und der Strukturbewertung anhand verschiedener Systeme der Maissilagevarianten sind in Tabelle 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.8. Daten der Nährstoffanalyse, Gärparameter und Partikelgrößenverteilung der verschiedenen PL der MS (Lsmeans).

Parameter	PL der MS		
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm
Chem. Zusammensetzung (n = 4)			
TM, g/kg	415,9	406,2	422,0
Rohprotein, g/kg TM	78,4	76,9	77,3
NDF, g/kg TM	531,1	510,0	501,4
ADF, g/kg TM	274,3	271,1	265,7
NFC ¹ , g/kg TM	322,3	342,8	357,6
NEL ² , MJ/kg TM	6,3	6,3	6,3
k _d ³ , %/h	8,2	7,8	8,1
Gärparameter ⁴ (n = 4)			
pH-Wert	4,0	4,0	4,1
Milchsäure, % TM	4,0	3,7	4,7
Essigsäure, % TM	0,8	0,5	1,2
Gärqualität ⁵ , Note	1,5	1,5	1,5
Partikelgrößenverteilung ⁶ (n = 8)			
g/kg T retiniert auf Sieb			
> 19 mm	46,3	31,1	15,2
> 8 – < 19 mm	564,4	489,1	296,7
> 1,18 – < 8 mm	340,0	429,9	618,9
< 1,18 mm	69,1	49,8	49,2
MPL ⁷ , mm	10,3	7,3	5,2
peNDF _L ⁸ , g/kg TM	375,5	283,1	184,7
peNDF _K ⁹ , g/kg TM	504,5	461,5	400,6

¹ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).

² Im HFT ermittelt nach MENKE und STEINGASS (1988).

³ Gasbildungsrate nach KHAZAAL et al. (1993).

⁴ Buttersäure und Propionsäure lagen unter der Nachweisgrenze.

⁵ Gärqualität bestimmt nach WEISSBACH und HONIG (1992).

⁶ Anhand der New Penn State Schüttelbox (NPSPS) ermittelt nach KONONOFF et al. (2003b).

⁷ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

⁸ Physikalisch Effektive NDF nach LAMMERS et al. (1996) (Mindest.: TMR 220 g/kg TM).

⁹ Physikalisch Effektive NDF nach KONONOFF et al. (2003b).

Die verschiedenen PL-Behandlungen hatten keinen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung, den Energiegehalt und die *in vitro* Abbaucharakteristika der Maissilage. Die Gärparameter pH-Wert und Milchsäure lagen dem TM-Gehalt entsprechend auf angestrebtem Niveau, Essigsäure war in geringer Konzentration vorhanden, die weiteren flüchtigen Fettsäuren (Propion- und Buttersäure) lagen unter der Nachweisgrenze. Alle drei Maissilagevarianten wurden damit gleich bewertet, mit der Note 1,5. Wie erwünscht, unterschieden sich die drei Maissilagen nur in der Partikelgrößenverteilung. Mit abnehmender PL der Maissilage nahm der Anteil der sehr groben Partikel, retiniert auf dem 19 und 8 mm Sieb signifikant ab und der Anteil der feinen Partikel (> 1,18 mm und < 8 mm) signifikant zu. Dies wurde durch die signifikante Abnahme der MPL bestätigt. Der Anteil der groben Partikel (> 8 mm) nahm bei Reduzierung der PL von 14 auf 5,5 mm ab. Dies führte zu einer deutlichen Verringerung um 51 % der physikalisch effektiven NDF_L ($peNDF_L$) (375,5 vs. 184,7 g/kg TM). Ebenfalls nahm die $peNDF_K$ von 504,6 auf 400,6 g/kg TM um 21 % ab, bei Reduzierung der PL von 14 auf 5,5 mm.

Tabelle 4.9. Daten der Partikelgrößenverteilung und der Strukturbewertung der TMR-Varianten (Lsmeans).

Parameter	PL der MS-TMR		
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm
Partikelgrößenverteilung ¹ (n = 8) g/kg TM retiniert auf Sieb			
> 19 mm	41,1	34,1	25,7
> 8 – 19 mm <	377,7	339,2	243,5
> 1,18 – 8 mm <	414,1	485,0	564,5
< 1,18 mm	167,1	141,7	166,2
MPL ² , mm	5,2	4,4	3,1
Strukturbewertung			
Strukturwert ³ , /kg TM	1,47	1,32	1,26
Strukt. Faser ⁴ , g/ 100 kg LM	368,2	370,8	394,5
$peNDF_L$ ⁵ , g/kg TM	145,2	134,5	93,1
$peNDF_K$ ⁶ , g/kg TM	295,6	309,2	288,2
$peNDF_M$ ⁷ , g/kg TM	289,3	254,1	260,4

¹ Anhand der New Penn State Schüttelbox (NPSPS) ermittelt nach KONONOFF et al. (2003b).

² MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

³ Strukturwert SW nach DE BRABANDER et al. (2002) (Mindest SW: TMR 1,12).

⁴ Strukturwirksame Faser nach HOFFMANN (1990) (Mindest.: TMR stXF 400g/100kg LM).

⁵ Physikalisch Effektive NDF nach LAMMERS et al. (1996) (Mindest.: TMR 220 g/kg TM).

⁶ Physikalisch Effektive NDF nach KONONOFF et al. (2002).

⁷ Physikalisch Effektive NDF nach MERTENS (2000) (Mindest.: TMR 220 g/kg TM).

Die Daten der Partikelgrößenverteilung und der Strukturbewertung der TMR-Varianten sind in Tabelle 4.9 dargestellt. Der Anteil der langen Partikel, retiniert auf

dem 19 und 8 mm Sieb, nahm auch bei den TMR-Varianten mit abnehmender PL ab, was sich in der Abnahme der MPL zeigte, wobei sich der Anteil der groben Partikel, retiniert auf den 19, 8 und 1,18 mm Sieben zwischen den TMR-Varianten nicht unterschied. Dies wurde auch durch die $peNDF_K$ und die $peNDF_M$ bestätigt, welche sich bei abnehmender PL kaum veränderten, während die $peNDF_L$ deutlich reduziert wurde mit Verringerung der PL von 14 auf 5,5 mm. Der Strukturwert nahm von Behandlung 14 mm auf Behandlung 5,5 mm von 1,47 auf 1,26 ab. Im Gegensatz dazu veränderte sich der Anteil der strukturwirksamen Faser nur unwesentlich.

4.2.2 Einfluss der Partikellänge auf die Leistungsparameter

In Tabelle 4.10 ist der Einfluss der PL der Maissilage in einer TMR auf Futteraufnahme, Faseraufnahme, Energieaufnahme, Milchleistung und -inhaltsstoffe aufgeführt.

Tabelle 4.10. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Futteraufnahme, Faseraufnahme, Energieaufnahme, Milchleistung und Milchinhaltsstoffe (Lsmeans \pm SEM, $n^6 = 12$)

Parameter	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
Mittlerer Laktationstag	98	108	87		
TM-Aufnahme, kg/d	19,7 ^b	21,8 ^a	21,1 ^a	0,32	PL
TM-Aufnahme, g/kg LM ^{0,75}	159,0 ^b	160,6 ^{ab}	167,7 ^a	3,66	PL
NDF, kg/d	6,94 ^b	7,38 ^a	7,73 ^a	0,18	PL
$peNDF_L^2$, kg/d	4,23 ^a	3,61 ^b	2,79 ^c	0,04	PL
$peNDF_K^3$, kg/d	5,75	6,11	6,59	0,11	n.s.
NEL, MJ/d	142 ^b	153 ^a	155 ^a	0,12	PL
NFC ⁴ , kg/d	8,48 ^b	8,99 ^a	8,72 ^a	2,75	PL
FECM ⁵ , kg/d	32,0	32,7	33,0	0,61	LD
Milchfett, %	3,69 ^b	3,66 ^b	3,88 ^a	0,06	LD
Milchfett, kg/d	1,22	1,23	1,28	0,02	LD
Milcheiweiß, %	3,31 ^b	3,41 ^a	3,40 ^{ab}	0,05	PL
Milcheiweiß, kg/d	1,08 ^b	1,14 ^a	1,12 ^{ab}	0,02	LD
Laktose, %	4,75	4,79	4,77	0,02	n.s.

^{abc} Kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, LD = Laktationstag.

² Physikalisch Effektive NDF nach LAMMERS et al. (1996).

³ Physikalisch Effektive NDF nach KONONOFF et al. (2003b).

⁴ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).

⁵ Fett-Eiweiß-Korrigierte-Milch.

⁶ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 24$.

Die Parameter der Futter- und Faseraufnahme wurden signifikant von der PL beeinflusst. Mit Reduzierung der PL von 14 auf 8,1 mm nahm die TM-Aufnahme (19,7 vs. 21,8 kg/d) signifikant zu, während eine weitere Reduzierung der PL auf 5,5 mm zu keiner weiteren Erhöhung führte. Resultierend aus der TM-Aufnahme Erhöhung stieg auch die Aufnahme von NDF, NFC und NEL mit abnehmender PL von 14 auf 8,1 mm signifikant an. Jedoch verringerte sich die $peNDF_L$ -Aufnahme mit abnehmender PL signifikant.

Die Milchleistungsparameter wurden in erster Linie von der Laktationsphase beeinflusst, nur der Milcheiweißgehalt wurde primär von der PL beeinflusst. Die FECM wurde durch die Abnahme der PL tendenziell erhöht. Mit Verringerung der PL steigerten sich der Eiweißgehalt und der Fettgehalt in der Milch, jedoch war kein Einfluss auf den Laktosegehalt festzustellen. Der Milcheiweißgehalt war für die Behandlung 8,1 mm mit 3,41 % signifikant am höchsten, was sich auch in der hohen Eiweißproduktion (kg/d) zeigte.

4.2.3 Einfluss der Partikellänge auf Futteraufnahmeverhalten und Futterselektion

4.2.3.1 Einfluss der Partikellänge auf das Futteraufnahmeverhalten

In Tabelle 4.11 ist der Einfluss der PL in einer TMR auf das Futteraufnahmeverhalten dargestellt. Bei abnehmender PL nahmen die Futteraufnahme sowie die Dauer der letzten Mahlzeit am Tag signifikant zu. Tendenziell erhöhte sich mit Abnahme der PL die Zahl der Mahlzeiten pro Tag, die Zahl der Besuche je Mahlzeit und die Futteraufnahme pro Mahl.

Der Beginn der ersten Mahlzeit am Tag wurde durch Reduzierung der PL signifikant verzögert, wobei die durchschnittliche Mahldauer ebenso wie die Futteraufnahme nicht beeinflusst wurden. Insgesamt dauerte die erste Mahlzeit mehr als doppelt so lange wie die letzte Mahlzeit am Tag, während die Futteraufnahme der zweieinhalbfachen bis dreifachen Menge des letzten Mahls entsprach.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.11. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf das Futteraufnahmeverhalten (Lsmeans \pm SEM, $n^5 = 12$).

Parameter	PL der MS-TMR			SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
Total					
Mahlzeiten /d	6,0	6,5	6,3	0,2	n.s.
Mittlere Mahlzeitdauer, min	56,5	53,8	55,0	5,3	n.s.
Anzahl d. Besuche/ Mahl	8,0	8,1	8,4	0,2	n.s.
F-Aufnahme ² / Mahl, kg	7,5	7,6	8,0	0,2	n.s.
Fresszeit/ Mahl, min	38,7	35,5	38,0	3,4	n.s.
F-Aufnahme/ Besuch, kg	1,2	1,1	1,2	0,1	n.s.
Fresszeit/ Besuch, min	6,3	5,2	5,8	0,8	n.s.
Kriterium Mahlzeit ³	58,0	55,3	55,3	4,1	n.s.
Erstes Mahl am Tag					
Anfangszeit (hh:min) ⁴	07:56 ^c	08:15 ^b	08:47 ^a	14	PL
Mittlere-Dauer, min	82,0	73,3	81,5	11,3	n.s.
FM-Aufnahme/ Mahl, kg	12,3	12,5	12,6	0,5	n.s.
Letztes Mahl am Tag					
Anfangszeit (hh:min) ⁴	03:07	02:53	03:22	33	n.s.
Mittlere-Dauer, min	31,9 ^b	37,5 ^{ab}	41,3 ^a	3,6	PL
FM-Aufnahme/ Mahl, kg	3,9 ^a	4,7 ^b	5,7 ^c	0,2	PL

^{n.s.} nicht signifikant ($P > 0,10$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² Futter Frischmasse Aufnahme.

³ Minimale Zeit, welche eine Kuh dem Futtertrog fernbleiben musste, damit ein Mahl abgeschlossen ist, nach MELIN et al. (2005).

⁴ SEM in Minuten dargestellt.

⁵ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 24$.

4.2.3.2 Einfluss der Partikellänge auf das Futterselektionsverhalten

Tabelle 4.12 zeigt die Ergebnisse des Futterselektionsverhaltens, welche als Futterselektionsindices dargestellt sind. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass Kühe Partikel größer als 8 und 19 mm ausselektierten. Die Versuchstiere selektierten die Ration vor allem nach kleinen Partikeln, Nicht-Faser-Kohlenhydrate (NFC), NEL und Rohprotein. Mit abnehmender PL nahm die Aussortierung der $peNDF_K$ durch die Kühe signifikant ab, dadurch nahm auch die Selektion von feinen Partikeln ($< 1,18$ mm) signifikant ab. Im Gegensatz dazu wurden die Selektionsindices für Partikel größer als 8 und 19 mm und die chemische Zusammensetzung vom Faktor PL nicht beeinflusst.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.12. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Futterselektionsindices¹ (Lsmeans \pm SEM, $n^7 = 12$).

Parameter	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^2 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
r.P. auf Sieb ³					
> 19 mm	0,73	0,78	0,72	0,05	n.s.
> 8 – < 19 mm	0,95	0,96	0,95	0,01	n.s.
> 1,18 – < 8 mm	1,05 ^a	1,03 ^{ab}	1,02 ^b	0,01	PL
< 1,18 mm	1,07 ^a	1,05 ^{ab}	1,03 ^b	0,01	PL
Physikalisch effektive Faser					
peNDF _L ⁴	0,89	0,92	0,91	0,02	n.s.
peNDF _K ⁵	0,94 ^b	0,97 ^a	0,98 ^a	0,01	PL
Chem. Zusammensetzung					
XP	1,06	1,02	1,02	0,03	n.s.
NFC ⁶	1,02	1,02	1,01	0,01	n.s.
NDF	0,96	0,98	0,98	0,01	n.s.
NEL	1,01	1,01	1,01	0,01	n.s.

n.s.: nicht signifikant ($P > 0,10$).

¹ Selektionsindices = 1 bedeutet keine Selektion, < 1 Selektion dagegen, > 1 Selektion dafür.

² Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

³ Anhand der New Penn State Schüttelbox (NPSPS) ermittelt nach KONONOFF et al. (2003b).

⁴ Physikalisch Effektive NDF nach LAMMERS et al. (1996).

⁵ Physikalisch Effektive NDF nach KONONOFF et al. (2003b).

⁶ Nicht-Faser-Kohlenhydrate (100 -% XA -% XP -% XL -% NDF).

⁷ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 24$.

4.2.4 Parameter der Kauaktivität

Der Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Kauaktivität und die Kauindices der Kühe ist in den Tabellen 4.13 und 4.14 zusammengefasst. Es konnte keine Wirkung des Faktors PL auf die Kau-, Fress- und Wiederkauzeit festgestellt werden. Jedoch wurde die längste Kau- und Fresszeit (839 und 415 min) sowie die kürzeste Wiederkauzeit (405 min) bei der Behandlung 8,1 mm beobachtet. Während die Behandlung 5,5 mm die numerisch geringste Kau- und Fresszeit (819 und 389 min) aufwies, ließ die Behandlung 14 mm die längste Wiederkauzeit (420 min) erkennen. Auch die Kau- und Wiederkauschläge pro Tag waren nicht vom Faktor PL beeinflusst, während die PL für die Parameter Wiederkauschläge pro Minute, Zahl der Bissen pro Tag und Wiederkauschläge pro Bissen der signifikante Faktor war. Die Wiederkauschläge pro Minute und die Zahl der Bissen pro Tag nahmen mit Reduzierung der PL von 14 auf 8,1 bzw. 5,5 mm signifikant zu, dagegen verringerten sich die Wiederkauschläge je Bissen von 65,0 auf 61,4 bzw. 60,4 Wiederkauschläge signifikant.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.13. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Kauaktivität von Milchkühen (Lsmeans \pm SEM, $n^2 = 4$).

Parameter	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
Kauzeit (min/ 24h)	834	839	819	16,62	n.s.
Fresszeit (min/ 24h)	403	415	389	11,51	n.s.
Wiederkauzeit (min/ 24h)	420	405	412	15,17	n.s.
Kauschläge/ 24h	49415	50197	49203	1245	n.s.
Kauschläge/ min	59,3	59,8	60,1	0,28	n.s.
Wiederkauschläge/ 24h	29533	29782	30419	919	n.s.
Wiederkauschläge/ min	68,4 ^b	70,2 ^a	70,8 ^a	0,51	PL
Wiederkauperioden/ 24h	12,1	12,4	12,2	0,52	n.s.
Wiederkauperiode (min)	34,7	32,7	33,8	0,60	n.s.
Zahl der Bissen/ 24h	454,8 ^b	488,2 ^a	503,1 ^a	12,72	PL
Wiederkauschläge/ Bissen	65,0 ^a	61,4 ^b	60,4 ^b	1,24	PL

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

n.s. Nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 8$.

Die Ergebnisse der Kauindices der drei PL-Stufen sind in Tabelle 4.14 dargestellt. Der Faktor PL beeinflusst die Indices der Kauzeit (min/kg NDF, min/kg peNDF_L, min/kg peNDF_K) signifikant. Mit Reduzierung der PL nahm die Kauzeit in min pro kg NDF und in min pro kg peNDF_K von 14 auf 8,1 signifikant bzw. auf 5,5 mm numerisch ab, dagegen nahm die Kauzeit von 260,5 auf 289,6 bzw. 407,4 min pro kg NDF_L signifikant zu.

Es wurde eine statistisch abgesicherte Wirkung des Faktors PL auf die Fress- und Wiederkauzeit in min pro kg NDF_L festgestellt. Dabei erhöhte sich mit abnehmender PL von 14 auf 5,5 mm die Wiederkauzeit von 157,3 auf 250,1 min pro kg NDF_L signifikant, während sich die Behandlungen 14 und 8,1 mm nicht unterschieden. Die Fresszeit (min/kg NDF_L) nahm ebenfalls mit Reduzierung der PL signifikant zu.

Auch die Kauschläge pro g peNDF_L bzw. je g peNDF_K wurden vom Faktor PL signifikant beeinflusst. Mit Verringerung der PL erhöhten sich die Kauschläge von 15,5 über 17,3 auf 24,6 Kauschläge pro g peNDF_L signifikant, wohingegen die Kauschläge pro g peNDF_K von der Behandlung 14 zur Behandlung 8,1 signifikant bzw. zur Behandlung 5,5 mm numerisch reduziert wurden.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.14. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Kauindices von Milchkühen bezogen auf die Gesamtmischung (Lsmeans \pm SEM, $n^4 = 4$).

Parameter	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
<i>Kauen</i>					
Kauzeit (min/ kg TM)	40,6	38,9	38,0	1,03	n.s.
Kauzeit (min/ kg NDF)	117,3 ^a	108,0 ^b	110,0 ^{ab}	2,92	PL
Kauzeit (min/ kg peNDF _L ²)	260,5 ^c	289,6 ^b	407,4 ^a	8,20	PL
Kauzeit (min/ kg peNDF _K ³)	137,7 ^a	125,5 ^b	131,7 ^{ab}	3,49	PL
<i>Fressen</i>					
Fresszeit (min/ kg TM)	19,3	19,2	18,7	0,58	n.s.
Fresszeit (min/ kg NDF)	55,7	53,4	54,0	1,66	n.s.
Fresszeit (min/ kg peNDF _L)	123,3 ^c	143,3 ^b	200,1 ^a	4,48	PL
Fresszeit (min/ kg peNDF _K)	65,4	62,1	64,7	1,99	n.s.
<i>Wiederkauen</i>					
Wdkauzeit (min/ kg TM)	24,5	23,6	23,4	0,82	n.s.
Wdkauzeit (min/ kg NDF)	70,9	65,4	67,5	2,35	n.s.
Wdkauzeit (min/ kg peNDF _L)	157,3 ^b	175,4 ^b	250,1 ^a	6,73	PL
Wdkauzeit (min/ kg peNDF _K)	83,2	76,0	80,9	2,79	n.s.
Kauschläge/ g TM	2,4	2,3	2,3	0,07	n.s.
Kauschläge/ g NDF	7,0	6,4	6,7	0,20	n.s.
Kauschläge/ g peNDF _L	15,5 ^c	17,3 ^b	24,6 ^a	0,54	PL
Kauschläge/ g peNDF _K	8,2 ^a	7,5 ^b	8,0 ^{ab}	0,23	PL

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

^{n.s.} nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² Physikalisch Effektive NDF nach LAMMERS et al. (1996).

³ Physikalisch Effektive NDF nach KONONOFF et al. (2003b).

⁴ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 8$.

4.2.5 Einfluss der Partikellänge auf die Partikelkinetik

4.2.5.1 Einfluss der Partikellänge auf die Partikelgrößenverteilung von TMR, Digesta und Kot

Der Einfluss der PL der Maissilage auf die Partikelgrößenverteilung von TMR, Digesta und Kot ist in Tabelle 4.15 zusammengefasst. Sämtliche Siebfraktionen von TMR und Digesta sowie die MPL wurden von dem Faktor PL signifikant beeinflusst.

Der Anteil der groben Partikel (retinierte Partikel $> 1,18$ mm) in der TMR nahm mit Verringerung der PL von 14 auf 8,1 mm statistisch abgesichert ab, und die lösliche Fraktion (Flüssigkeit und feinste Stoffe, die das Sieb 0,063 mm passieren) erhöhte sich, während für die Behandlungen 8,1 und 5,5 mm kein Unterschied festzustellen war. Von Behandlung 14 bzw. 8,1 auf 5,5 mm steigerte sich der Anteil der feinen

4 Ergebnisse

Partikel (retinierte Partikel > 0,063 - < 1,18 mm). Die Verteilung der einzelnen Fraktionen führte zu einer signifikanten Verkürzung der MPL mit abnehmender PL.

Die Behandlung 8,1 mm zeigte die kürzeste MPL der Digesta mit 1,5 mm und den geringsten Anteil der Siebfraction grob mit 35,3 % auf, während die Behandlung 14 mm die signifikant höchsten Werte (2,0 mm und 40,9 %) aufwies und die Behandlung 5,5 mm dazwischen lag ($P < 0,05$). Die Behandlung 11 mm wies die wenigsten feinen Partikel und den statistisch abgesichert höchsten Anteil an der löslichen Fraktion in der Digesta auf.

Tabelle 4.15. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (Nasssiebanalyse, retinierte TM in %) von TMR, Digesta, und Kot (Lsmeans \pm SEM, $n^4 = 4$).

	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
TMR					
r.P. ⁴ > 1,18 mm	47,5 ^a	43,2 ^b	42,8 ^b	0,54	PL
r.P. > 0,063 – < 1,18 mm	17,9 ^b	17,3 ^b	20,0 ^a	0,58	PL
Lösliche Fraktion ²	34,4 ^b	39,5 ^a	37,2 ^a	0,65	PL
MPL ³ , mm	5,2 ^a	4,4 ^b	3,1 ^c	0,47	PL
Digesta (Pansen)					
r.P. > 1,18 mm	40,9 ^a	35,3 ^c	39,3 ^b	0,57	PL
r.P. > 0,063 – < 1,18 mm	40,0 ^a	37,5 ^b	41,2 ^a	0,90	PL
Lösliche Fraktion	19,1 ^b	27,2 ^a	19,5 ^b	0,94	PL
MPL, mm	2,0 ^a	1,5 ^c	1,6 ^b	0,05	PL
Kot					
r.P. > 1,18 mm	6,6	6,4	7,1	0,24	n.s.
r.P. > 0,063 – < 1,18 mm	40,9	38,8	38,1	1,35	n.s.
Lösliche Fraktion	52,5	54,8	54,8	1,21	n.s.
MPL, mm	0,17	0,14	0,16	0,01	n.s.

^{abc} Kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

^{n.s.} nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, A = Tier.

² Flüssigkeit und feinste Stoffe die das Sieb 0,063 mm passieren.

³ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

⁴ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 8$.

Obwohl der Faktor PL keinen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung im Kot hatte, war der Anteil der Siebfraction grob (retinierte Partikel > 1,18 mm) bei der Behandlung 5,5 mm tendenziell größer als bei der Behandlung 8,1 bzw. 14 mm.

Bei vertikaler Betrachtung von Tabelle 4.15 wird deutlich, wie der Anteil der groben Partikel von TMR über Digesta zum Kot zu Gunsten der feinen und löslichen Fraktion verschoben wurde. Dies spiegelte sich auch in der drastischen Reduzierung

der MPL wider, wobei die MPL-Abnahme von TMR zur Digesta bei der Behandlung 5,5 mm weit weniger ausgeprägt war als bei den Varianten 14 und 8,1 mm.

4.2.5.2 Einfluss der Partikellänge auf die Partikelgrößenverteilung der Digesta

In Tabelle 4.16 ist der Einfluss der PL auf die Partikelgrößenverteilung der Digesta im dorsalen und ventralen Reticulorumen eine Stunde vor, 2, 7 und 10 Stunden nach der Morgenfütterung dargestellt. Die beiden Faktoren PL und Digestaschicht (P) wirkten sich auf den Anteil der groben und feinen Partikel (Siebfraktion) signifikant aus, so dass die MPL ebenfalls beeinflusst wurde. Die lösliche Fraktion wurde von der 2-fachen Wechselwirkung von PL bzw. P und Zeitpunkt (Zp) bestimmt, welche auch den Anteil der feinen Partikel im Tagesverlauf beeinflussten.

Im dorsalen Reticulorumen nahm sowohl 1 h vor als auch 2, 7 und 10 h nach der Morgenfütterung der Anteil der groben Partikel ($> 1,18$ mm, Siebfraktion) mit Verringerung der PL von 14 auf 8,1 mm signifikant ab, wobei eine weitere Zerkleinerung auf 5,5 mm wieder zu einer numerischen bzw. statistisch abgesicherten Zunahme der groben Partikel führte. Der Partikelanteil grob verhielt sich ventral gleich wie dorsal, nur auf etwas geringerem Niveau. Im zeitlichen Verlauf blieb der Anteil der groben Partikel bei allen drei Behandlungen relativ konstant.

Die Behandlung 5,5 mm hatte dorsal 2 h bzw. ventral 2 und 7 h nach der Morgenfütterung den höchsten Anteil an feinen Partikeln ($> 0,063 - < 1,18$), während die Behandlung 8,1 mm den kleinsten Anteil aufwies. Von einer Stunde vor der Morgenfütterung ausgehend nahm dorsal der Anteil der feinen Partikel bis zum Abend (10 h) bei Behandlung 5,5 und 14 mm deutlich ab. Dies galt auch für die Behandlung 5,5 mm ventral. Im Gegensatz dazu verhielt sich die Behandlung 8,1 mm dorsal im Tagesverlauf konstant. Ventral reduzierte sich der Anteil der feinen Partikel von der ersten zur zweiten Probenahme deutlich, blieb dann aber auf einem ausgeglichenen Niveau.

Zu allen Zeitpunkten sowie dorsal und ventral wies die Behandlung 8,1 mm die numerisch höchsten Werte für die lösliche Fraktion auf. Der Verlauf des löslichen Anteils der Behandlung 8,1 mm war so charakterisiert, dass er sich ventral verdoppelte bis 2 Stunden nach der Morgenfütterung und dann konstant blieb, wobei die lösliche Fraktion im dorsalen Pansen kaum Schwankungen aufzeigte.

4 Ergebnisse

Bei Verringerung der PL von 14 auf 8,1 mm wurde die MPL dorsal und ventral signifikant kürzer. Eine weitere Reduzierung der PL auf 5,5 mm führte zu keiner weiteren Veränderung, ventral nahm die MPL sogar tendenziell wieder zu.

Tabelle 4.16. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (retinierte TM in %) und die MPL (mm) der Digesta im dorsalen und ventralen Reticulorum eine Stunde vor, 2 und 10 Stunden nach der Morgenfütterung (Lsmeans \pm SEM, $n^7 = 4$)

r.P. ⁵	Zp ⁶	Dorsal			Ventral			Pool SEM	$P^1 < 0,05$	
		14mm	8,1mm	5,5mm	14mm	8,1mm	5,5mm			
> 1,18 mm										
	-1h	43,6 ^a	38,6 ^b	41,7 ^{ab}	38,4	34,3	36,9	1,76		
	2h	40,3 ^a	35,8 ^b	39,0 ^{ab}	38,9 ^a	32,9 ^b	39,2 ^a	1,76	PL, P	
	7h	42,5 ^a	35,8 ^b	41,5 ^a	40,2 ^a	33,3 ^b	40,2 ^a	1,76		
	10h	43,6 ^a	37,0 ^b	38,2 ^b	39,8 ^a	34,5 ^b	37,6 ^{ab}	1,76		
> 0,063 – < 1,18 mm										
	-1h	39,2	35,4	39,8	49,9	49,3	46,4	2,27	PL, P,	
	2h	40,9 ^{ab}	37,8 ^b	45,8 ^a	39,9 ^b	35,2 ^b	48,0 ^a	2,27		ZP,
	7h	35,5	34,7	36,4	40,9 ^{ab}	36,2 ^b	42,2 ^a	2,27	P•Zp,	
	10h	34,1	35,5	32,5	39,5	35,9	38,1	2,27	Pl•Zp	
Lösliche F.³										
	-1h	17,2	25,9	18,4	11,8	16,3	16,7	2,50	ZP,	
	2h	18,8	26,3	15,2	21,2	31,9	12,7	2,50		P•Zp,
	7h	22,1	29,5	22,0	18,9	30,6	17,6	2,50		Pl•Zp
	10h	22,3	27,4	29,2	20,7	29,6	24,2	2,50		
MPL⁴, mm										
	-1h	2,3 ^a	1,8 ^b	1,8 ^b	1,6	1,4	1,4	0,16	PL, P	
	2h	1,9 ^a	1,6 ^b	1,6 ^b	1,8 ^a	1,3 ^b	1,6 ^{ab}	0,16		
	7h	2,2 ^a	1,5 ^b	1,8 ^a	1,9 ^a	1,3 ^b	1,6 ^{ab}	0,16		
	10h	2,3 ^a	1,7 ^b	1,7 ^b	1,9 ^a	1,4 ^b	1,5 ^{ab}	0,16		

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

^{n.s.} nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR, P = Digestaschicht, ZP = Zeitpunkt und deren Wechselwirkung.

² Faktoren zu allen Zp in einer r.P. Fraktion signifikant.

³ Flüssigkeit und feinste Stoffe, die das Sieb 0,063 mm passieren.

⁴ MPL berechnet ohne lösliche Fraktion nach FISHER et al. (1988).

⁵ retinierte Partikel.

⁶ Zeit der Probenahme: 1 h vor, 2, 7 und 10 h nach der Morgenfütterung.

⁷ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 8$.

4.2.5.3 Einfluss der Partikellänge auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage

Die Ergebnisse der Partikel- und Flüssigkeitspassage sind in Tabelle 4.17 aufgeführt. Die Passagerate der Partikel aus dem Reticulorum wurde mit Reduzierung der PL von 14 auf 8,1 bzw. 5,5 mm (0,05 vs. 0,04) signifikant vermindert, was sich auch mit einer signifikant längeren Verweilzeit im Reticulorum für die Behandlungen 8,1 und 5,5 mm (26,6 bzw. 26,7 h) gegenüber 14 mm (22,7 h) deckte.

4 Ergebnisse

Die post ruminale Passagerate nahm mit abnehmender PL signifikant zu. Damit verbunden verringerte sich die Verweilzeit im Dickdarm mit Verkürzung der PL von 14 auf 8,1 mm signifikant, während sich die Behandlung 5,5 mm nicht unterschied. Die kurze Verweilzeit im Reticulorumen der Behandlung 14 mm wurde durch eine signifikant längere Verweilzeit im postruminalen Verdauungstrakt kompensiert, so dass die Verweilzeiten des Futters im gesamten Verdauungstrakt zwischen den PL-Stufen kaum variierten. Numerisch hatte die Behandlung 8,1 mm mit 48,7 Stunden die geringste Verweilzeit des Futters im gesamten Verdauungstrakt.

Tabelle 4.17. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage (Lsmeans \pm SEM, $n^8 = 4$).

Parameter	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
Partikelpassage					
k_s^2 , (/h)	0,05 ^a	0,04 ^b	0,04 ^b	0,003	PL
k_f^3 , (/h)	0,07 ^b	0,11 ^a	0,09 ^{ab}	0,01	PL
TD ⁴ , h	10,5	8,9	11,2	0,98	n.s.
RMRT ⁵ , h	22,7 ^b	26,6 ^a	26,7 ^a	1,38	PL
FMRT ⁶ , h	16,6 ^a	13,2 ^b	14,2 ^{ab}	1,74	PL
TMRT ⁷ , h	49,9	48,7	52,0	1,19	n.s.
Flüssigkeitspassage					
k_s , (/h)	0,10	0,09	0,09	0,01	n.s.
k_f , (/h)	0,35	0,32	2,22	0,70	n.s.
TD, h	6,0 ^b	5,7 ^b	10,3 ^a	0,32	PL
RMRT, h	10,6	11,0	11,6	1,37	n.s.
FMRT, h	5,0 ^a	4,0 ^a	1,1 ^b	0,58	PL
TMRT, h	21,5	20,7	23,1	1,34	n.s.

^{abc} Kennzeichen signifikante Unterschiede zwischen den PL-Stufen.

^{n.s.} nicht signifikant ($P > 0,05$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² k_s = fraktionelle Passage aus dem Reticulorumen.

³ k_f = fraktionelle post ruminale Passage.

⁴ TD = Time Delay.

⁵ RMRT = ruminale Verweilzeit, ($1/k_s$).

⁶ FMRT = Verweilzeit im postruminalen Verdauungstrakt, ($1/k_f$).

⁷ TMRT = Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt (TD+RMRT+FMRT).

⁸ Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 8$.

Die Flüssigkeitspassage aus dem Reticulorumen nahm mit Verringerung der PL tendenziell ab. Dies zeigte sich in einem numerischen Anstieg der Verweilzeit im Reticulorumen. Der Faktor PL wirkte sich nur auf die Zeitverzögerung (TD) und die Verweilzeit im postruminalen Verdauungstrakt signifikant aus. Eine statistisch abgesicherte Verringerung der Verweilzeit im postruminalen Verdauungstrakt von 5,0 bzw. 4,0 auf 1,1 Stunden war mit abnehmender PL von 14 bzw. 8,1 auf 5,5 mm zu

beobachten. Im Gegensatz dazu nahm mit Reduzierung der PL die Zeitverzögerung (TD) zwischen Markereingabe und erstem Auftreten des LiCo-EDTA Markers im Kot signifikant zu. Die Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt war für die Behandlung 8,1 und 14 mm mit 21,5 bzw. 20,7 Stunden im Gegensatz zu der Behandlung 5,5 mm mit 23,1 Stunden numerisch geringer.

4.2.6 Einfluss der Partikellänge auf den *in situ* NDF- und TM-Abbau der TMR und deren Komponenten

Tabelle 4.18 zeigt den Einfluss der PL in einer TMR auf den *in situ* TM- und NDF-Abbau der TMR und ihrer Komponenten (MS, Heu und KF). Es konnte weder eine signifikante Wirkung der PL auf den *in situ* TM-Abbau noch auf den *in situ* NDF-Abbau der Substrate festgestellt werden. Dennoch war die Tendenz zu erkennen, dass mit Reduzierung der PL von 14 auf 8,1 mm sich der *in situ* TM-Abbau bzw. der *in situ* NDF-Abbau erhöht oder zumindest nicht verschlechtert wurde. Im Gegensatz dazu führte eine weitere Zerkleinerung der PL auf 5,5 mm wieder zu einer numerischen Abnahme der Verdaulichkeit unter die Werte der Behandlung 14 mm.

Tabelle 4.18. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die *in situ* TM- und NDF-Verdaulichkeit der TMR und ihrer Komponenten (Lsmeans \pm SEM).

Parameter	PL der MS-TMR			Pooled SEM	$P^1 < 0,05$
	14 mm	8,1 mm	5,5 mm		
TM-Verdaulichkeit ($n^2 = 12$)					
TMR	75,5	76,2	74,9	1,31	n.s.
MS	65,1	63,5	63,2	1,98	n.s.
Heu	46,0	47,2	44,9	1,27	n.s.
KF	93,1	93,8	92,6	2,86	n.s.
NDF-Verdaulichkeit ($n^2 = 4$)					
TMR	42,1	46,4	41,9	3,10	n.s.
MS	41,2	42,7	37,0	2,70	n.s.
Heu	29,0	31,2	28,5	1,56	n.s.
KF	63,9	68,2	63,6	2,86	n.s.

^{n.s.} Nicht signifikant ($P > 0,10$).

¹ Signifikante Faktoren: PL = Partikellänge der TMR.

² Für die PL-Stufe 14 mm, $n = 24$ bzw. 8.

5 Diskussion

Im Folgenden werden die beiden Versuche getrennt diskutiert, da sich die Grundfuttermittel Grassilage (GS) und Maissilage (MS) in ihrer Struktur und geometrischen Form deutlich unterscheiden. Die Partikel der GS sind wesentlich länger als breit, wobei die Breite vernachlässigbar ist. Durch diese geometrische Form bildet die GS im Pansen eine dichter vernetzte Fasermatte. Im Vergleich dazu haben die Partikel der MS bei Häckslung auf weniger als 14 mm eher eine quadratische Form mit gleichen Längen und Breitenverhältnissen wenn sie von den Maisblättern stammen bzw. eine kubische Form wenn sie vom Stängel stammen. Hierdurch ist die Vernetzung und Schichtenkonsistenz der Fasermatte verschieden. Vermutlich ist auch die Wachsbeschichtung bei Mais und Gras qualitativ unterschiedlich einzustufen, was für die mikrobielle Zugänglichkeit bedeutsam ist.

5.1 Grassilage-Versuch

5.1.1 Bewertung der Strukturwirksamkeit der TMR-Varianten auf Basis von Grassilage nach aktuellen Systemen

Die strukturwirksame Rohfaser nach HOFFMANN (1990) variierte mit Reduzierung der PL der Grassilage in der Gesamtmischung in der vorliegenden Untersuchung kaum, sie nahm sogar auf Grund der erhöhten Futteraufnahme mit verringerter PL etwas zu (390 vs. 421 vs. 415 g/ 100 kg LM). HOFFMANN (2003) gab eine Optimalversorgung von 400 g strukturwirksamer Rohfaser je 100 kg Lebendmasse an, so dass alle 3 PL Behandlungen nach diesem System eine ausreichende Strukturversorgung gewährleisteten. Jedoch zeigte sich in der vorliegenden Studie, dass sich die Parameter der Partikeldynamik und der Pansenfermentation (ZEBELI, 2006c) bei Verringerung der PL von 11 auf 5,5 mm verschlechterten. Auch Zebeli (2006c) stellte einen negativen Einfluss der reduzierten PL von 11 auf 5,5 mm fest: Die Faserverdaulichkeit und die bakterielle Masse im Pansen wurden verringert. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Abnahme der PL bis 5,5 mm zu einem Mangel an strukturwirksamer Faser geführt hat, obwohl die Faseraufnahme (kg/d) sehr hoch war. Die Partikellänge wird wohl in diesem

System nur unzureichend berücksichtigt. SPIEKERS et al. (2003) kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die strukturwirksame Rohfaser nur ein grober Indikator für die Strukturversorgung von Hochleistungsmilchkühen ist.

In der vorliegenden Untersuchung war der Strukturwert für alle 3 TMR-Varianten mit 1,63 gleich. Die ungenügende Berücksichtigung der PL der Grassilage hatte auch in diesem System zur Folge, dass sich der Strukturwert nicht unterschied. Laut DE BRABANDER et al. (1999a und b) benötigen Hochleistungsmilchkühe in der durchgeführten Untersuchung einen Strukturwert von 1,12 in der Ration. Alle 3 Behandlungen erfüllten diese Anforderungen bei weitem.

MEYER et al. (2001) stellten in einer Studie an Milchkühen fest, dass bei Fütterung von 35 % Grassilage und 65 % Krafffutter ein Defizit an Grobfutter vorlag, obwohl der Strukturwert rechnerisch ausreichend war. Der Strukturwert einer Gesamtmischration sollte in der ersten Laktationsphase den Wert 1,1 nicht unterschreiten, darüber hinaus sollte der Krafffutteranteil in der Gesamtration 60 % der Trockenmasse nicht überschreiten (DLG, 2001).

Mit Reduzierung der PL der Grassilage von 25 über 11 auf 5,5 mm in der Gesamtmischration nahm der peNDF_L -Gehalt linear ab (20 vs. 18 vs. 16 %). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass mit Abnahme der PL der Anteil der Partikel, welche auf dem 19 und 8 mm Sieb retiniert wurden, ausgehend von 25 mm im Vergleich zu 11 bzw. 5,5 mm um 6 bzw. 14 % zurückging. Auch von Yang et al. (2007) wurde berichtet, dass der peNDF_L -Gehalt mit Verringerung der PL (7,9 vs. 19,1 mm) einer Luzernesilage in einer TMR von Milchkühen abnahm. Die Behandlung 5,5 mm wies die der optimalen Verteilung nach LAMMERS et al. (1996) am nächsten kommenden Ergebnisse auf, wobei der Anteil der Partikel größer als 19 bzw. 8 mm an der Untergrenze und der Anteil der Partikel kleiner als 8 mm an der Obergrenze (60 %) der Empfehlung lagen. Die Behandlung 25 mm besaß einen deutlich zu hohen Anteil an Partikeln, welche auf dem 19 mm Sieb retiniert wurden. Dies konnte sich insofern nachteilig auf das Futteraufnahmeverhalten auswirken als die Gesamtmischration der Behandlung 25 mm stärker gegen grobe Partikel selektiert werden konnte als die Behandlungen 11 und 5,5 mm, die weniger lange Partikel enthielten. CALBERRY et al. (2003) und LEONARDI und ARMENTANO (2003) berichteten von Untersuchungen mit Milchkühen, die entweder mit einer auf Luzerneheu oder auf Luzernesilage basierenden TMR gefüttert wurden, dass mit der Abnahme der PL der Gesamtmischration die Selektion abnahm. LAMMERS et al.

(1996) gaben nur für die einzelnen Siebe eine ideale Partikelverteilung an, aber keinen Mindestgehalt an peNDF_L , um Störungen des Pansenmilieus vorzubeugen. Bei Vergleich der Ergebnisse der Fermentationsparameter (ZEBELI, 2006c), der Passagerate, der Kauaktivität und den Leistungsparametern war nicht von einem Strukturangel bei den verschiedenen Behandlungen auszugehen. Jedoch war bei der Behandlung 5,5 mm der pH-Wert vor der Morgenfütterung in der freien Flüssigkeit signifikant am geringsten (5,8). Des Weiteren wies die deutlich höhere MPL im Kot auf eine gestörte Fasermatte hin. Ein peNDF_L -Gehalt von 16 % ist als nicht ausreichend zu bewerten.

Der peNDF_M -Gehalt nahm mit Verringerung der PL der Grassilage von 26,5 über 26,0 auf 25,0 % nur unwesentlich ab, obwohl MERTENS (1997) der Behandlung 5,5 mm einen im Vergleich zur Behandlung 25 mm um 10 % geringeren physikalischen Effektivitätsfaktor (pef) zuordnete. Alle drei TMR-Varianten enthielten genügend peNDF_M (> 20 %), um den Milchfettgehalt über der von MERTENS (1997) angegebenen Grenze von 3,4 % zu halten, unter diesem Wert geht der Autor von einer Milchfettdepression aus. Dies bestätigten die ermittelten Milchfettgehalte der verschiedenen Behandlungen (3,8 vs. 4,2 vs. 3,8 %). Des Weiteren war keine gute Übereinstimmung der mit dem peNDF_M -Gehalt korrespondierenden Milchfettgehalte, welche von MERTENS (1997) ermittelt wurden, festzustellen. Der peNDF_M -Gehalt der 3 PL-Varianten wäre in der vorliegenden Studie laut MERTENS (1997) ausreichend, um einen Milchfettgehalt von 3,6 bis 3,7 % zu erhalten. Auch dieses Strukturbewertungssystem lässt keine Störung der Pansenphysiologie erkennen. BHANDARI et al. (2007) stellten bei Untersuchungen an Milchkühen in der zweiten Laktationsphase mit Reduzierung der PL von Luzerne und Maissilage in einer TMR ebenfalls nur eine geringe Abnahme des peNDF_M -Gehaltes fest (23,7 vs. 22,4 %). Dabei gingen die Autoren auf Grund der ermittelten Milchfettgehalte von unter 2,7 % bei beiden Behandlungen von einer subakuten Pansenacidose (SARA) aus, obwohl der peNDF_M -Gehalt ausreichend war. Die Autoren vermuteten einen zu geringen Grundfutter-NDF-Gehalt der TMR (19 %) und eine starke Selektion der Milchkühe gegen lange Partikel in der Ration als Grund der SARA. BEAUCHEMIN et al. (2003) sehen als Nachteil des peNDF_M -Konzeptes, dass Ausmaß und Geschwindigkeit der ruminalen Fermentierbarkeit der Futtermittel nicht berücksichtigt werden. Es ist daher umstritten, ob der Bewertungsmaßstab peNDF_M einen Fortschritt bedeutet (NRC, 2001).

5.1.2 Einfluss der Partikellänge der Grassilage auf Futteraufnahme und Milchleistung

In der vorliegenden Studie erhöhte sich die Futteraufnahme mit Verringerung der PL von 25 auf 11 bzw. 5,5 mm um 2,5 bzw. 2,3 kg TM-Aufnahme (19,6 vs. 22,1 vs. 21,8 kg TM/d) signifikant. Auf Grund dessen, dass bei allen 3 TMR Varianten die Nährstoffgehalte gleich waren, nahm die NDF-, NEL- und NFC-Aufnahme ebenfalls signifikant zu. Da keine Untersuchungen mit Grassilage als Grundfutterkomponente in Gesamtmischrationen vorliegen, werden die Ergebnisse mit Literaturquellen verglichen, welche Luzernesilage als Grundfutterkomponente enthalten.

WEISS und SHOCKEY (1991) und HOFFMANN et al. (1998) berichteten, dass trotz einer besseren NDF-Verdaulichkeit von Grassilagen die TM-Aufnahme für grassilagebetonte Rationen geringer ist als für Rationen mit Luzernesilage. Die Autoren diskutierten in diesem Zusammenhang eine eventuell bessere Partikelzerkleinerung der Leguminosen im Pansen und eine damit verbundene kürzere Retentionszeit im Pansen. Die Ergebnisse neuerer Untersuchungen stimmten gut mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie überein (YANG et al., 2001a; KONONOFF und HEINRICHS, 2003c; YANG und BEAUCHEMIN, 2007). KONONOFF und HEINRICHS (2003c) hatten in ihrer Versuchsanordnung vergleichbare GF/KF-Verhältnisse (50/50), NDF-Gehalte (32 %), Laktationsstadien (LD 20) sowie PL (22,3 – 4,8 mm) in der den Milchkühen vorgelegten TMR. Die Autoren zeigten, dass mit Reduzierung der PL einer Luzernesilage in einer TMR die TM-Aufnahme um 1,7 kg (20,7 vs. 23,4 kg TM/d) signifikant anstieg. Andere Autoren stellten keine signifikante Erhöhung der Futteraufnahme fest (KRAUSE et al., 2002a; SCHROEDER et al., 2003; BEAUCHEMIN et al., 2003). TAJAJ et al. (2007) zeigten in einer statistischen Auswertung von 25 Publikationen, bei denen Grassilage, Maissilage oder deren Mischung als Grundfutterkomponente in einer TMR an Hochleistungsmilchkühe verfüttert wurden, dass bei einer Grassilage-TMR die Reduzierung der PL positiv ($R^2 = 0,11$; $n = 41$) mit der Futteraufnahme korrelierte. Die Futteraufnahme wird von der Abbaurate im Pansen und der Passagerate aus dem Pansen beeinflusst (MERTENS, 1993). Nach Tajaj et al. (2001b) sind eine schnellere Passagerate und eine reduzierte Verdaulichkeit eher als Konsequenz der erhöhten Futteraufnahme zu sehen. Diese Aussage kann bestätigt werden. In der vorliegenden Studie nahm die Passagerate um 1 %/h signifikant zu, während die

Rohfaserverdaulichkeit (ZEBELI, 2006c) bei Verringerung der PL von 25 auf 11 bzw. 5,5 mm um 5 % zurückging. Die geringere Futteraufnahme bei der Behandlung 25 mm kann daher durch eine stärkere Pansenfüllung aufgrund einer reduzierten Passage erklärt werden. Diese Behandlung bietet den Mikroorganismen weniger Oberfläche, und die Abbaurate ist reduziert. Von ZEBELI (2006c) wurde dies bestätigt: Mit Abnahme der PL von 25 auf 11 mm erhöhte sich die Fermentationsintensität wobei der pH-Wert im Panseninhalt positiv beeinflusst wurde, was auf ein günstigeres Pansenmilieu hinweist.

Resultierend aus der signifikanten Futteraufnahmeerhöhung hatte die NDF-, NFC- und NEL-Aufnahme ebenso zugenommen. Auf Grund dessen, dass sich Milchkühe in der ersten Laktationsphase in einem Energiedefizit befinden, hat die Reduzierung der PL einen positiven Effekt auf die Deckung dieses Defizits (MBANYA et al., 1993).

Mit Verringerung der PL wurde die Fett-Eiweiß-korrigierte-Milchleistung (FECM) nicht verändert (40,5 – 41,3 kg/d). Dieses Ergebnis stimmt mit anderen Untersuchungen überein, die ebenfalls keine Auswirkungen feststellen konnten (KRAUSE et al., 2002a; CLARK und ARMENTANO, 2002; BEAUCHEMIN et al., 2003; KONONOFF und HEINRICHS, 2003c; RUSTOMO et al., 2006; CAO et al., 2007). Auf Grund der Erhöhung der TM-Aufnahme mit abnehmender PL wäre eine Zunahme der Milchleistung zu erwarten gewesen. Diese Unstimmigkeit zwischen dem Effekt der PL auf die TM-Aufnahme und die FECM kann damit erklärt werden, dass die Milchkühe bei allen 3 PL-Varianten eine negative Energiebilanz hatten. Generell befinden sich hochleistende Milchkühe zu Beginn der Laktation in einem Energiedefizit, da die über das Futter aufgenommene Energie und die Nährstoffe nicht ausreichen, um den enormen Bedarf für Erhaltung und Milchleistung zu decken (BUTTLER und SMITH, 1989; DE VRIES und VEERKAMP, 2000). Durch die Steigerung der Futteraufnahme mit abnehmender PL von 25 über 11 auf 5,5 mm wurde das Energiedefizit zu Laktationsbeginn verringert (-30 vs. -10 vs. -15 MJ NEL/d). Damit ist zu erklären, weshalb keine Effekte der PL auf die FECM festgestellt wurden. Die Tiere der Behandlungen 11 und 5,5 mm verwendeten die höhere Energieaufnahme zur Reduzierung dieses Energiedefizits, was sich positiv auf die Gesundheit und die Fruchtbarkeit der Hochleistungsmilchkuh auswirken kann (GEARHART et al., 1990; FÜRLL, 1999).

GRANT (1990a) stellte eine signifikante Reduzierung der FECM mit abnehmender PL fest. Der Grund hierfür war eine deutliche Abnahme der peNDF-Aufnahme, damit verbunden eine Pansenmilieustörung, welche zu einer Verschiebung des Acetat-/Propionat-Verhältnisses führte und als Konsequenz daraus zu einer Abnahme des Milchfettgehalts (3,8 vs. 3,2 %). BEAUCHEMIN et al. (1994) und MERTENS (1997) kamen zu dem Ergebnis, dass es erst bei Unterschreiten der Empfehlungen zur NDF-Aufnahme (NRC, 2001) zu einer Beeinflussung des Milchfettgehalts durch die PL kommt. Nach den Empfehlungen von MERTENS (1997) muss eine TMR für Milchkühe einen peNDF-Gehalt von mindestens 20 % aufweisen, damit ein Milchfettgehalt von 3,4 % nicht unterschritten wird. Bei einem Milchfettgehalt von unter 3,4 % geht MERTENS (1997) von einem Milchfettmangelsyndrom aus. In der vorliegenden Studie stieg der Milchfettgehalt bei Verringerung der PL der Grassilage von 14 auf 11 mm um 0,4 % (3,81 vs. 4,21 %) signifikant an, wobei eine weitere Reduzierung der PL auf 5,5 mm (3,81 %) den Milchfettgehalt wieder statistisch abgesichert senkte. Auf Grund der Versuchsanordnung als randomisierter Block-Versuch konnte das statistische Modell den Laktationstag als Einflussfaktor nicht ganz ausschließen. Offensichtlich wurde der Milchfettgehalt vom Laktationstag stärker als von der PL beeinflusst.

Auf Grund des hohen NDF-Gehalts in der TMR und der hohen peNDF_M-Aufnahme waren Anzeichen eines Milchfettmangelsyndroms nicht zu erwarten. Der Milchfettgehalt (4,21 %) bei der Variante 11 mm ist zum einen mit der hohen Aufnahme an verdaulicher organischer Substanz und zum anderen mit dem besseren Pansenmilieu bei dieser Variante zu erklären. ZEBELI (2006c) konnte zeigen, dass bei der Behandlung 11 mm das Acetat-/Propionat-Verhältnis bei 2,8 lag und die Fermentationsintensität am höchsten war, ohne das Pansenmilieu zu beeinträchtigen. Es stand genügend Acetat für die de-novo-Synthese in der Milchdrüse zur Verfügung. Bei der 5,5 mm Variante wurden die Fermentationsbedingungen verschlechtert, und der Milchfettgehalt sank.

Eine Reihe von Autoren konnten keine Veränderung des Milchfettgehalts auf Grund einer Reduktion der PL feststellen (KRAUSE et al., 2002a; KRAUSE et al., 2002b; PLAIZIER et al., 2004; YANG und BEAUCHEMIN, 2007), während andere eine Abnahme aufzeigen konnten (GRANT 1990a; YANG et al., 2001a; TEIMOURI YANSARI et al., 2004). BAL et al. (2000) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass der Milchfettgehalt mit Verringerung der PL zunahm. Der Grund dafür war die starke

Selektion der Milchkühe in der groben TMR gegen lange faserreiche Partikel und eine damit verbundene Verschlechterung der Pansenbedingungen.

Die signifikante Zunahme des Milcheiweißgehalts bei Abnahme der PL der Grassilage von 25 auf 11 mm (3,01 vs. 3,55 %) ist durch die erhöhte Energie- und duodenale Rohproteinversorgung auf Grund der erhöhten Futteraufnahme in Zusammenhang mit dem verbesserten Pansenmilieu zu erklären. Auch andere Autoren stellten einen gesteigerten Milcheiweißgehalt mit Reduzierung der PL fest (PREISSINGER et al., 1997b; SOITA et al., 2000; TEIMOURI YANSARI et al., 2004), wobei es in Untersuchungen, in denen die Futteraufnahme nicht erhöht wurde, zu keiner Veränderung des Milcheiweißgehalts kam (LE LIBOUX und PEYRAUD, 1999; JOHNSON et al., 2003; STEINWIDDER und ZEILER, 2003; YANG und BEAUCHEMIN, 2007).

5.1.3 Einfluss der Partikellänge der Grassilage auf die Verdauungsvorgänge (Kauaktivität, Passage, Partikeldynamik und funktionelle spezifische Dichte)

Die Unterschiede in der PL der Grassilage (25 vs. 11 vs. 5,5 mm) beeinflussten die Parameter der Kauaktivität nur tendenziell. Eine ähnliche Beobachtung machte ALLEN (1997). Ein signifikanter Rückgang in der Kauaktivität zeigte sich hier bei einer PL zwischen 10 und 1 mm erst, als die PL unter 3 mm sank. TAJAJ et al. (2007) stellten bei einer Literaturlauswertung fest, dass die PL von Grassilage in einer TMR positiv mit der Kauaktivität korrelierte. In diesem Zusammenhang war die kürzeste geprüfte PL 2,8 mm. Auch andere Autoren hatten eine Reduktion der Kauaktivität erst mit einer deutlichen Verringerung der PL unter 3 mm festgestellt (BEAUCHEMIN et al., 1997; BAL et al., 2000; SCHWAB et al., 2002; KONONOFF et al., 2003b).

Die Wiederkauzeit lag bei allen 3 PL-Varianten in Bereichen, von denen auch andere Autoren berichteten (WELCH, 1982; PIATKOWSKI et al., 1990; VAN SOEST, 1994; MERTENS, 1997; DE BRABANDER et al., 1999a und b). Die gesamte Kauzeit befand sich in der vorliegenden Studie unter den von MERTENS (1997) genannten 1000 min/d bzw. 16,7 h/Tag, die als Limit des gesamten Kauaktivitätsvermögens auf Grund des Kauenergiebedarfs festgelegt wurden. Die Kauzeit pro kg Trockenmasse war über dem Schwellenwert von SUDWEEKS et al. (1991), welcher bei 30 min/kg TM liegt und nicht unterschritten werden sollte, um negative Folgen auf die

Verdauungsphysiologie zu vermeiden. Sowohl Kauzeit als auch Fresszeit pro kg TM bzw. NDF nahmen mit Verringerung der PL von 25 mm auf 11 mm bzw. 5,5 mm numerisch ab; die Effizienz des Kauens bzw. des Kauens beim Fressen hat sich verringert. Hierzu zeigen die Ergebnisse der Partikeldynamik, dass die Behandlung 25 mm mit 2,1 mm die höchste Abnahme der MPL von TMR zur Digesta hatte. Bei den Behandlungen 11 bzw. 5,5 mm wurde die MPL um 0,9 mm verringert bzw. um 0,3 mm erhöht, wobei die PL 11 mm die signifikant kürzeste MPL der Digesta mit 3,1 mm aufwies. Dadurch hatten die Digestapartikel dieser Variante die besten Voraussetzungen für eine Passage aus dem Pansen. Die Effizienz der Partikelzerkleinerung wird mit Abnahme der PL verringert, was andere Untersuchungen bestätigen. FERNANDEZ et al. (2004) berichteten, dass eine größere PL zu einer höheren Effizienz der Partikelzerkleinerung beim Fressen führt als eine kleinere PL. Die Autoren verfütterten eine auf Maissilage basierende TMR mit zwei verschiedenen PL (5 vs. 13 mm) und einem KF-Anteil von 25 % an Milchkühe. Das Kauen während des Fressens reduzierte die Partikellänge stärker als das Wiederkauen, und es bestand kein Unterschied in der Partikelgrößenverteilung der Digesta zwischen den beiden Varianten. Von BEAUCHEMIN et al. (2003) wurde ebenfalls festgestellt, dass Milchkühe, die eine Gesamtmischung mit vier verschiedenen MPL erhielten, große Futterpartikel intensiver beim Kauen während des Fressens zerkleinerten. Hinsichtlich der Effizienz der Partikelzerkleinerung konnte in beiden Untersuchungen festgestellt werden, dass die Kautätigkeit und die Mikroorganismenaktivität im Pansen ergänzend wirken, wodurch die Futterpartikel letztlich eine psalterreife Größe erhalten. Mit Ausnahme der hoch verdaulichen Anteile des Raufutters wird der überwiegende Teil der groben Partikel mehr durch das Wiederkauen als durch die direkte mikrobielle Fermentation im Pansen zerkleinert (KENNEDY, 2006). Dennoch tragen auch die mikrobiellen Populationen im Pansen zur Zerkleinerung bei, indem das Pflanzengewebe zwischen den vaskulären Bündeln während der mikrobiellen Verdauung gespalten wird, wodurch die Partikel einfacher beim Wiederkauen zerkleinert werden können (CHAI et al., 1984; WILSON, 1993). UEDA et al. (2001) schätzten mithilfe von dynamischen Modellen beim Schaf, dass die Rate zur Zerkleinerung der groben Partikel (> 5,6 mm) zu feinen (< 1,18 mm) schneller ist (1,94 %/h) als die Zerkleinerungsrate der mittleren Partikel (1,18 – 5,6 mm) zu feinen (0,46 %/h), was auf eine höhere Effizienz des Kauens grober Partikel hinweist. Es scheint daher, dass grobe Partikel zum einen eine intensivere

Zerkleinerung in der Maulhöhle beim Fressen bedingen und zum anderen einen intensiveren Wiederkauprozess auslösen, was wiederum eine größere Kontaktfläche für die Adhäsion von Mikroorganismen zur Folge hat. In der vorliegenden Studie wirkte sich die Behandlung 11 mm am besten auf die Reduktion der Partikellänge beim Kauen und die mikrobielle Desintegrierung der Partikelstruktur aus. Dies bestätigten auch die Ergebnisse der Fermentationsintensität von ZEBELI (2006c). Die Behandlung 11 mm hatte die signifikant höchste FSG der Digesta eine Stunde vor und 2 Stunden nach der Morgenfütterung (1,50 und 1,44 mg/ml) – ebenfalls ein Zeichen des guten Zusammenspiels von mikrobieller Aktivität und physikalischer Partikelzerkleinerung beim Kauen, um die Partikel in eine psalterreife Größe und Dichte zu bringen. MURPHY und KENNEDY (1993) stellten die höchste Passagerate für Partikel mit einer FSG zwischen 1,2 und 1,5 fest. Bei geringerer oder höherer Dichte sind die Partikel schwimmfähig oder sinken ab (MURPHY und KENNEDY, 1993; KASKE, 2000).

Bei vergleichender Betrachtung der Partikelverteilung im dorsalen und ventralen Pansen zeigte sich, dass im dorsalen Pansen bei allen PL-Behandlungen etwa 45 % der Partikel der Fraktion größer als 1,18 mm angehörten, wobei die Varianten 11 und 5,5 mm mit 31,7 - 33,3 % den signifikant höchsten Anteil an Partikeln kleiner als 1,18 mm aufwiesen. Im ventralen Pansen hatte die Behandlung 11 mm den geringsten Gehalt an Partikeln größer als 1,18 mm (38 – 40,6 %), während die Behandlungen 25 und 5,5 mm mit 41,9 – 46,9 % gleiche Anteile wie dorsal aufzeigten. Auch ALLEN und GRANT (2000) beobachteten beim Einsatz unterschiedlicher Partikellängen bei *ad libitum* gefütterten Milchkühen keine Unterschiede hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung zwischen der dorsalen und ventralen Digesta.

Der Anteil der Partikel kleiner als 1,18 mm war ventral bei der PL-Variante 11 mm am höchsten, des Weiteren hatte diese Variante die signifikant bzw. tendenziell kürzeste MPL ventral (2,4 – 2,8). Die Mächtigkeit der Fasermatte reichte bei allen drei PL-Varianten auf Grund der hohen Futteraufnahme bis in den ventralen Pansen. Dabei legt die Partikelverteilung die Vermutung nahe, dass die Behandlung 11 mm die beste Schichtung der Futtermassen im Pansen gewährleistete. Zum einen war dies deshalb der Fall, weil sich viele unverdaute, potentiell psalterreife Partikel in der dorsalen Fasermatte assoziiert an grobe Partikel fanden und dort länger der mikrobiellen Fermentation ausgesetzt waren. Zum anderen ist der hohe Anteil von

groben Partikeln (>1,18 mm) im ventralen Bereich bei der PL 5,5 mm im Vergleich zur 11 mm Variante ein Indiz dafür, dass mit Verringerung der PL die Schichtung und damit die Schichtungskonsistenz nicht mehr optimal war. Auf Grund der kurzen Partikellänge von 5,5 mm kam es zu Störungen in der Vernetzung der Fasermatte, es sanken zu viele grobe als auch feine Partikel in den ventralen Pansen ab. Dies zeigte sich zum einen an der hohen MPL der ventralen Digesta und zum anderen an der langen MPL im Kot (0,15 mm), was noch von dem hohen Gehalt an Partikeln > 1,18 mm (7,8 %) im Kot unterstützt wurde. KASKE et al. (1992) stellten fest, dass trotz der Durchmischung während der Pansenkontraktionen die Digesta nicht homogenisiert wird. Vielmehr erfolgt eine Trennung in unterschiedliche Phasen bzw. Schichtung der Digesta, vorwiegend nach ihrer FSG. Durch die Faserschicht werden die feinen Partikel (<1,18 mm) in zwei Pools getrennt (FAICHNEY, 1986). Ein Pool umfasst die feinen Partikel, die mit der flüssigen Phase aus dem Pansen abfließen. Ein weiterer, relativ großer Anteil feiner, potentiell passagefähiger Partikel ist an größere Partikel im dorsalen Pansensack assoziiert und kann somit nicht in den ventralen Pansensack sedimentieren. POPPI et al. (2001) gehen davon aus, dass die Fasermatte einen relativ starren Pool bildet. Für Partikel, die sich in dieser Matte befinden, ist es sehr schwer, sich herauszulösen. Sind sie jedoch einmal in den ventralen Bereich des Pansens abgesunken, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass sie den Pansen verlassen, und die Wahrscheinlichkeit gering, dass sie wieder ein Bestandteil der Fasermatte werden.

Bei der Behandlung 11 mm war im Gegensatz zu 25 und 5,5 mm der höchste Anteil an „bailable liquids“ festzustellen (7,33 vs. 2,77 vs. 5,85 %). Um eine optimale Fermentation und ein ausgeglichenes Pansenmilieu herzustellen, muss die Fermentationssäureproduktion durch die Absorptionsrate und die Speichelproduktion im Gleichgewicht gehalten werden. Der Gehalt an „bailable liquids“ bei der Behandlung 11 mm gewährleistete eine ausreichende Umspülung der Fasermatte zur Abführung der von den an die Partikel assoziierten zellulolytischen Mikroorganismen gebildeten flüchtigen Fettsäuren. Dies bewirkte, dass der pH-Wert in der Fasermatte nicht unter einen für die zellulolytische Enzymaktivität störenden Bereich abfällt. ZEBELI (2006c) zeigte, dass bei der Behandlung 11 mm die Fermentationsintensität, insbesondere in der festen Phase der Digesta, erhöht wurde, während der pH-Wert im Pansen positiv beeinflusst wurde. Dies weist auf ein günstigeres Pansenmilieu hin. Des Weiteren erhöhte sich die Protozoenkonzentration im Pansen, die positiv mit dem

Acetat-/Propionat-Verhältnis und Butyrat sowie negativ mit der Propionatkonzentration korrelierte, was vermutlich auch zu einer Vermeidung einer Übersäuerung des Pansens beigetragen hat.

Bei der Behandlung 25 mm war der geringe Anteil von „bailable liquids“ (2,77 %) ein Resultat der höheren Wasserbindungskapazität von langen Partikeln gegenüber kurzen Partikeln. TEIMOURI YANSARI et al. (2004) berichteten, dass die Abnahme der Partikellänge bei einem Luzerneheu von 19 über 10 auf 2 mm ihre Wasserbindungskapazität von 2,92 über 2,81 auf 2,74 g H₂O/g TM verringerte. Der geringere Anteil an „bailable liquids“ ist auch ein Grund dafür, dass die PL-Variante 25 mm die signifikant längste Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt (TMRT) von Partikeln und Flüssigkeit hatte. LLAMAS-LAMAS et al. (1991) stellten fest, dass zwischen der Wasserbindungskapazität der Digesta und der fraktionellen Passagerate der Partikel eine lineare, negative Beziehung bestand.

Obwohl die PL-Variante 11 mm die tendenziell geringste Verweilzeit im Pansen (RMRT; 36,6 h) und signifikant kürzeste TMRT (51,3 h) der Partikel aufwies, wurde bei dieser Variante die signifikant kürzeste MPL im Kot festgestellt. Im Gegensatz dazu hatten die Behandlungen 25 bzw. 5,5 mm längere mittlere Partikellängen. Es ist allgemein anerkannt, dass der größte Teil der Partikelreduktion abgeschlossen ist, wenn die Partikel die Psalteröffnung passieren. Dies deutet darauf hin, dass die Effizienz und das Zusammenspiel von mikrobieller Aktivität und physikalischer Partikelzerkleinerung für die Behandlung 11 mm optimal war, um die Partikel in eine passagefähige Form (Dichte und Größe) zu überführen, wobei die NDF-Verdaulichkeit nur tendenziell beeinträchtigt wurde (ZEBELI, 2006c). Die Ergebnisse der Partikel- und Flüssigkeitspassage wurden von den Ergebnissen der Futteraufnahme bestätigt, durch die Verringerung der Partikellänge wurde die TM-Aufnahme signifikant erhöht. Auch andere Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass sich mit Reduzierung der PL die Passagerate der festen Phase der Digesta erhöhte und die TMRT verringerte (MARTZ und BELYEA, 1986; LE LIBOUX und PEYRAUD, 1999; TEIMOURI YANSARI et al., 2004). Jedoch stellten KRAUSE et al. (2002a) eine Abnahme der Passagerate sowie Zunahme der TMRT der festen Phase der Digesta mit Reduktion der PL fest. Die Autoren begründeten dieses Ergebnis mit dem verwendeten Marker. Es wurde ein markiertes gemahlendes Weizenstroh verwendet, welches sich auf Grund der geringen Partikelgröße wahrscheinlich eher der Flüssigkeitspassage anglich.

5.2 Maissilage-Versuch

5.2.1 Einfluss der Partikellänge auf die Qualität der Maissilage-Varianten

Für diesen Fütterungsversuch wurden drei Schlauchsilos mit Maissilage (PL: lang 14 mm; kurz 8,1 mm und fein 5,5 mm) angelegt. Durch das Zwangsverdichtungssystem der Siloschlauchpresse ist eine standardisierte Verdichtung für Vergleichszwecke möglich (WAGNER et al., 2004). Es ist davon auszugehen, dass alle drei Varianten einheitlich verdichtet waren. Schlauchsilos haben den Vorteil, dass sie für Versuchszwecke kleine Versuchseinheiten (2,4 m Durchmesser, 15 m Länge) darstellen und gleichzeitig bezüglich des Silierverlaufs mit den in der Praxis verbreiteten Silotypen vergleichbar sind (LEURS et al., 2004). Die Untersuchungsergebnisse der Gärparameter zeigten, dass die PL der Maissilage keinen Einfluss auf den Siliererfolg in den Siloschläuchen hatte. Die Essigsäurekonzentrationen lagen bei allen drei Behandlungen unter 1,2 % (i. TM), der pH-Wert bei 4,0 bis 4,1 und der Milchsäuregehalt zwischen 3,7 und 4,7 % (i. TM). Die Buttersäure- und Propionsäurekonzentration war unter der Nachweisgrenze. Alle drei Silagevarianten wurden nach WEISSBACH und HONIG (1992) mit der Gärqualitätsnote 1,5 bewertet. Damit konnten Effekte der unterschiedlichen Gärqualität der Silagen auf Futteraufnahme und Futterselektionsverhalten ausgeschlossen werden. Auch in anderen Studien mit vergleichbaren PL wurden keine Effekte auf die Gärqualität von Maissilagen in Flachsilos durch Reduzierung der PL festgestellt (KONONOFF und HEINRICHS, 2003a und d; YANG und BEAUCHEMIN, 2006a), wobei die Gärsäurekonzentrationen mit denen aus dieser Untersuchung vergleichbar sind.

5.2.2 Bewertung der Strukturwirksamkeit der TMR-Varianten auf Basis von Maissilage nach aktuellen Systemen

In der vorliegenden Studie veränderte sich der Anteil der strukturwirksamen Rohfaser nach HOFMANN (1990) mit Reduzierung der PL der Maissilage in der TMR kaum, er nahm sogar auf Grund der Erhöhung der Futteraufnahme mit Verringerung der PL etwas zu (368 vs. 371 vs. 395 g/ 100 kg LM). HOFFMANN (2003) gibt eine Optimalversorgung von 400 g strukturwirksamer Rohfaser je 100 kg Lebendmasse an,

wobei der Autor ein Maximum bei 550 g sieht und darauf hinweist, dass niedrige Werte von 300 bis 350 g nur kurzfristig von gesunden Tieren kompensiert werden können. Dies bedeutet, dass alle 3 Behandlungen ausreichend strukturwirksame Rohfaser in der Ration enthielten, während die PL-Variante 5,5 mm dem optimalen Niveau näher war im Gegensatz zur Behandlung 14 mm. Dieses Resultat wurde von den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung nicht gedeckt, da kein Unterschied im pH-Wert (6,25 vs. 6,20 vs. 6,27) festzustellen war und die scheinbare Nährstoffverdaulichkeit bei Reduzierung der PL von 8,1 auf 5,5 mm verschlechtert wurde (ZEBELI et al., 2006a). Ein Grund für diese Diskrepanz ist, dass die Partikellänge nicht in die Bewertung der strukturwirksamen Rohfaser eingeht.

MEYER et al. (2002) stellten in ihren Untersuchungen mit Milchkühen fest, dass es bei Fütterung von Gesamtmischrationen zu Anzeichen von Strukturmangel kam, obwohl der Anteil der strukturwirksamen Rohfaser rechnerisch ausreichend war. STEINGASS und ZEBELI (2008) bemängelten, dass das System der strukturwirksamen Rohfaser durch Kauaktivitätsmessungen an trockenstehenden Kühen abgeleitet wurde und damit bei Rationen für Hochleistungskühe in seiner Anwendung problematisch ist. Des Weiteren ist eine Validierung an Versuchen aus der internationalen Literatur nicht möglich, da dieses System als Grundlage die Rohfaser verwendet.

Der Strukturwert (SW) nach DE BRABANDER et al. (1999a und b) nahm mit Reduzierung der PL der Maissilage (14,0 vs. 8,1 vs. 5,5 mm) von 1,47 über 1,32 auf 1,26 ab. Diese Abnahme des SW kam auf Grund der Bewertung der Partikellänge der Maissilage in diesem System zustande. Die Einbeziehung der Partikellänge in den SW kann als Vorteil betrachtet werden, jedoch kommt es in diesem System grundsätzlich zu einer Unterschätzung des Strukturbedarfs. Deshalb empfiehlt die DLG (2001), dass bei TMR-Fütterung der SW einen Wert von 1,1 nicht unterschreiten sollte. In einem Versuchsbericht der staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt Aulendorf (2002) kamen die Versuchsansteller zu dem Schluss, dass der SW zwar zusätzliche Hinweise zur Krafftutterverträglichkeit liefert, auf Grund der gewonnenen Ergebnisse ein SW von 1,2 in der Rationsplanung jedoch nicht unterschritten werden sollte. Der Strukturwert wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Einige Autoren geben die Empfehlung zur Anwendung in der Praxis (DLG, 2001; SPIEKERS et al., 2003), andere raten davon ab, da der SW die Strukturwirksamkeit mancher Krafftuttermittel deutlich überschätzt (MEYER et al., 2001). STEINGASS und ZEBELI (2008) schlugen

vor, den SW anhand der Daten von ZEBELI et al. (2008) zu validieren und gegebenenfalls zu korrigieren. Laut DE BRABANDER et al. (1999a und b) benötigten die Milchkühe in der vorliegenden Untersuchung einen Strukturwert von 1,12 in der Ration, alle 3 Behandlungen erfüllten diese Anforderung.

In der vorliegenden Untersuchung nahm der Anteil der langen Partikel, retiniert auf dem 19 und 8 mm Sieb, mit Verringerung der PL der Maissilage in einer TMR wie erwartet linear ab. Dies spiegelte sich in einer signifikanten Reduzierung der $peNDF_L$ wider (14,5 vs. 13,5 vs. 9,3 %). Zu diesem Ergebnis kamen auch andere Studien, welche den NPSPS zur Erfassung der Partikelverteilung von auf Maissilagen basierenden Gesamtmischrationen unterschiedlicher PL untersucht hatten (KONONOFF und HEINRICHS, 2003a; YANG und BEAUCHEMIN, 2006c). Yang et al. (2006c) berichteten bei Abnahme der PL einer Maissilage TMR (28,6 vs. 15,9 vs. 4,8 mm) von einer signifikanten Reduzierung der $peNDF_L$ (17,6 vs. 14,8 vs. 10,0 %) und der $peNDF_{L-NDF}$ (22,2 vs. 18,8 vs. 11,9 %) (bei der $peNDF_{L-NDF}$ werden die NDF-Gehalte der einzelnen Siebfraktionen bestimmt und zur Berechnung verwendet). Der etwas geringere $peNDF_L$ -Gehalt im Vergleich zum $peNDF_{L-NDF}$ -Gehalt der Gesamtmischrationen kann der Tatsache zugeschrieben werden, dass die $peNDF_L$ -Methode den NDF-Gehalt der Partikel größer als 8 mm unterschätzt, da bei dieser Methode von einer gleichen Verteilung der NDF über alle Siebfraktionen ausgegangen wird. Weil beide Methoden die gleiche Rangierung des $peNDF$ -Gehalts der Rationen auf geringfügig unterschiedlichem Niveau vornehmen und die $peNDF_L$ -Bestimmung die einfachere und günstigere der beiden Methoden ist, sollte sie zur Anwendung in der Praxis kommen. Wird die Partikelverteilung im Verhältnis zur Optimalverteilung von KONONOFF et al. (2003b und e) betrachtet, so fällt auf, dass sich nur bei der Behandlung 5,5 mm ein zu geringer Anteil von Partikeln auf dem 19 bzw. 8 mm Sieb und zu viele Partikel auf dem 1,18 mm Sieb befanden. Dieses Defizit an langen Partikeln in der TMR wurde durch die Ergebnisse des Milchfettgehalts und der Kauaktivität nicht bestätigt. Sensiblere Parameter wie der *in situ* NDF-Abbau, die Passagerate, die cellulolytische Bakterienanzahl (ÖLSCHLÄGER, 2007) und die fibrolytische Enzymaktivität (ZEBELI, 2006c) wurden dagegen negativ beeinflusst. Die Partikelverteilung der Behandlungen 14 und 8,1 mm befand sich auf dem angestrebten Niveau.

Im Kontrast dazu steht der $peNDF_K$ - und $peNDF_M$ -Gehalt der vorliegenden Untersuchung, welche sich zwischen den Gesamtmischrationen mit abnehmender PL

der Maissilage nicht unterschieden. Dieses Ergebnis stimmt mit dem Resultat von Yang et al. (2006c) überein. Die Autoren stellten ebenfalls fest, dass sich mit reduzierter Partikellänge der peNDF_K (28,3 vs. 26,6 vs. 26,5 %) nicht veränderte. In beiden Studien wurden die Unterschiede zwischen den Rationen mit Verringerung der PL der Totalmischrationen im peNDF_K -Gehalt durch eine signifikante Zunahme der Partikel retiniert zwischen dem 1,18 und dem 8 mm Sieb ausgeglichen (41,4 vs. 48,5 vs. 56,5 % in der vorliegenden Studie und 33,8 vs. 38,6 vs. 52,8 % bei Yang et al., 2006c). Nach den Aussagen von MERTENS (1997 und 2000) ist der peNDF_K -Gehalt (29,6 vs. 30,9 vs. 28,8 %) der vorliegenden Untersuchung ausreichend zur wiederkäuergerechten Versorgung von Hochleistungsmilchkühen. Der peNDF_K -Gehalt der verschiedenen Behandlungen (14, 8,1 und 5,5 mm) ist ausreichend, um einen mittleren pH-Wert im Reticulorumen von etwa 6,15 und einen Milchfettgehalt von mindestens 3,6 % zu erhalten (MERTENS, 1997). ZEBELI et al. (2008) konnten anhand einer umfangreichen Literaturlauswertung und eigenen Studien mit Milchkühen in der ersten Laktationsphase einen optimalen peNDF_K -Gehalt berechnen. Die Autoren geben einen peNDF_K -Gehalt von 30 bis 33 % in der Ration an, um das Risiko einer subakuten Pansenacidose zu minimieren, ohne dass die Leistung von Milchkühen beeinträchtigt wird.

5.2.3 Einfluss der Partikellänge der Maissilage auf Futteraufnahme und Milchleistung

Die Trockenmasse-Aufnahme in dieser Studie lag etwas niedriger als in anderen Untersuchungen mit Hochleistungsmilchkühen, denen verschiedene PL einer Maissilage in einer TMR (30 - 33 NDF) mit etwa 45 % Krafffutter in der Ration angeboten wurden. KONONOFF und HEINRICHS (2003c) ermittelten eine TM-Aufnahme von 25,7 bis 28 kg pro Tag, während die TM-Aufnahme in den Untersuchungen (23 - 27 % NDF) von BAL et al. (2000), SCHWAB et al. (2002) und SOITA et al. (2005) 25,3 bis 26,6 kg pro Tag betrug. Die Ergebnisse der TM-Aufnahme der vorliegenden Studie stimmen jedoch mit den Resultaten von COOKE und BERNARD (2005) und YANG und BEAUCHEMIN (2005) gut überein, die mit einem Krafffutteranteil von 56 bis 58 % in der Ration (34 % NDF) eine TM-Aufnahme von 20,0 bis 22,6 kg pro Tag ermittelten. Da der NDF-Gehalt der vorliegenden Studie (35 - 36 % NDF) näher an den Untersuchungen von COOKE und BERNARD (2005)

und YANG und BEAUCHEMIN (2005) liegt, deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass die geringere TM-Aufnahme auf einen höheren NDF-Gehalt der TMR zurückzuführen ist. TAJAJ et al. (2007) stellten in einer Literaturstudie fest, dass bei Gesamtmischrationen mit Maissilage als Grundfutterkomponente der NDF-Gehalt negativ mit der TM-Aufnahme korrelierte ($R^2 = 0,31$), wobei sich für die PL der Maissilage kein Effekt erkennen ließ.

Die PL der TMR hatte jedoch in der vorliegenden Studie einen signifikanten Einfluss auf die TM-Aufnahme. Mit Reduzierung der PL von 14 auf 8,1 mm nahm die TM-Aufnahme (19,7 vs. 21,8 kg/d) signifikant zu, während eine weitere Zerkleinerung der PL auf 5,5 mm zu keiner weiteren Erhöhung führte. Von ALLEN und GRANT (2000) wird die Meinung vertreten, dass die Partikellänge des Grundfutters selbst durch eine zunehmende physikalische Pansenfüllung einen negativen Einfluss auf die Futteraufnahme ausübt. Mehrere Studien mit Milchkühen führten zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich des Einflusses der PL und des NDF-Gehalts bzw. des peNDF-Gehalts der Ration auf die TM-Aufnahme bei Hochleistungsmilchkühen im ersten Laktationsdrittel. TEIMOURI YANSARI et al. (2004) berichteten von einer Erhöhung der TM-Aufnahme (21,3 vs. 22,6 vs. 24,8 kg/d) mit der Reduzierung der PL von Mais- und Luzernesilage in einer TMR von 19 über 10 auf 2 mm, aufgrund einer niedrigeren physikalischen Pansenfüllung und einer höheren fraktionellen Partikelpassage bei der PL von 2 mm. BHANDARI et al. (2007) stellten eine geringere Erhöhung der TM-Aufnahme (21,9 vs. 23,4 kg/d) mit der Abnahme der PL der Maissilage (19,1 vs. 14,5 mm) in einer TMR fest. COOKE und BERNARD (2005) berichteten von einer unveränderten TM-Aufnahme mit Reduzierung der PL der Maissilage (25,4 vs. 19,5 mm) ohne Kornnachzerkleinerung. Wurde dagegen eine Kornnachzerkleinerung (Spaltmaß: 2 mm) vorgenommen, so erhöhte sich die TM-Aufnahme um 2,6 kg/d bei der Ration mit kürzerer PL. Andere Studien mit Maissilage als Grundfutter in der TMR (LE LIBOUX und PEYRAUD, 1999; JOHNSON et al., 2003; ONETTI et al., 2003; SOITA et al., 2005) berichteten von keinem Einfluss der PL auf die Futteraufnahme. Darüber hinaus sind ALLEN und GRAND (2000) der Meinung, dass nur bei einem niedrigen KF-Niveau die Partikellänge der Ration ein limitierender Faktor hinsichtlich der Futteraufnahme sei, während sich bei einem hohen Kraffutterniveau eher eine Störung der Pansenphysiologie als die physikalische Pansenfüllung negativ auf die Futteraufnahme auswirkt. TAJAJ et al. (2001) beobachteten eine lineare Erhöhung der TM-Aufnahme mit Reduzierung der

PL von 28,7 über 9,2 auf 2,9 mm, wenn eine Ration mit geringem Krafftutteranteil (200 g/kg TM) an Rinder und Schafe verfüttert wurde. Im Gegensatz dazu wurde kein Effekt der PL auf die Futteraufnahme festgestellt, wenn den Tieren ein hohes Krafftutterniveau (550 - 600 g/kg TM) angeboten wurde. Ein Grund für die Diskrepanzen hinsichtlich des Einflusses der PL der Gesamtmischration auf die Futteraufnahme in verschiedenen Studien war nach TAJAJ et al., (2007) auch eine sehr unterschiedliche Zahl der in diese Versuche einbezogenen Tiere, was mit einer hohen Variation der Futteraufnahme zwischen den Tieren einherging.

Als Konsequenz aus der Erhöhung der TM-Aufnahme mit abnehmender PL von 14 auf 8,1 mm stieg auch die NDF-, NFC- und NEL-Aufnahme in der vorliegenden Studie signifikant an. Die Zunahme der NDF- und NEL-Aufnahme mit Reduzierung der Partikellänge wurde auch in anderen Untersuchungen mit Hochleistungsmilchkühen in der ersten Laktationsphase ermittelt (BAL et al., 2000; LEONARDI et al., 2005). Das NRC (2001) berichtete, dass sich Milchkühe zu Beginn der Laktation aufgrund der hohen Milchleistung in einem Energiedefizit befinden, da die Energieaufnahme den Energiebedarf nicht decken kann. Durch die Verringerung der Partikellänge wird die Oberfläche vergrößert, die physikalische Pansenfüllung reduziert, der mikrobielle Abbau und die Passagerate erhöht und damit die Nährstoffzufuhr gesteigert (ALLEN und GRANT, 2000). Die Kühe haben die Möglichkeit, mehr Futter aufzunehmen und damit das Energiedefizit zu verringern (MBANYA et al., 1993).

Das die Fett-Eiweiß-korrigierte-Milchleistung (FECM) in der vorliegenden Studie durch die Reduzierung der PL nicht beeinflusst wurde, stimmt mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen überein (CLARK und ARMENTANO, 1999; BAL et al., 2000; KRAUSE et al., 2002a; KONONOFF und HEINRICHS, 2003d; EINARSON et al., 2004; YANG und BEAUCHEMIN, 2006; TAJAJ et al., 2007). Diese zeigten ebenfalls, dass die Partikellänge der Maissilage keinen Effekt auf die Milchleistung hatte. In der Literatur fanden sich verschiedene Hinweise, dass mit zunehmender Zerkleinerung der Maissilage eine verbesserte Milchleistung einhergeht (GRANT et al., 1990b; PETIT et al., 1993). Dabei war aber zumeist auch gleichzeitig die Futteraufnahme erhöht. Somit ist die Steigerung der Milchleistung mit einer erhöhten Zufuhr an Energie und duodenalem Rohprotein zu erklären (SCHWARZ, 2000). In der vorliegenden Studie wäre eine Erhöhung der FECM, auf Grund der höheren TM-Aufnahme mit abnehmender PL zu erwarten gewesen, da sich die Tiere anhand der im HFT ermittelten NEL-Gehalte (6,9 – 7,0 MJ NEL/kg TM) der TMR, bei der PL-

Variante 14 mm in einer ausgeglichenen Energiebilanz (+1 MJ NEL/d) befanden bzw. bei den PL-Varianten 8,1 und 5,5 mm üerversorgt waren (+8 und +10 MJ NEL/d). Wurden jedoch die von ZEBELI et al. (2006c) *in vivo* ermittelten Nährstoffverdaulichkeiten der einzelnen Maissilage PL-Varianten zur Berechnung der NEL (MJ/kg TM) verwendet, so ergaben sich mit Verringerung der PL von 14 über 8,1 auf 5,5 mm NEL-Gehalte von 6,1, 6,2 und 6,1 MJ NEL /kg TM. Diese Diskrepanzen zwischen den *in vitro* und *in vivo* ermittelten NEL-Gehalten sind mit dem hohen Fütterungsniveau zu erklären (MENKE und STEINGASS, 1988). Unter Verwendung der *in vivo* bestimmten NEL-Gehalte, befanden sich die Tiere aller 3 PL-Varianten in einer negativen Energiebilanz (-24, -10, -17 MJ NEL/d), wobei die Milchkühe, welche die PL-Behandlung 11 mm bekamen das geringste Energiedefizit hatten. Damit ist das Ausbleiben von Effekten auf die FECM zu begründen. Die höhere Energieaufnahme mit abnehmender PL wurde zur Reduzierung des Energiedefizits verwendet, was einen äußerst positiven Effekt für die Gesundheit und die Fruchtbarkeit von Hochleistungsmilchkühen zu Beginn der Laktation darstellt (ULBRICH et al., 2004).

Da der Milchfettgehalt von den Pansen- und Stoffwechselerhältnissen abhängig ist, wird dieser Parameter oft als Indikator für die Strukturversorgung einer Milchkuhration verwendet. Von DE BRABANDER et al. (2002) wurde eine Verringerung des Milchfettgehalts um 0,6 % innerhalb von einer Woche als Indiz für das Vorliegen eines Struktur mangels in der Ration beschrieben. MERTENS (1997) sprach von einem Milchfett mangelsyndrom, wenn der Milchfettgehalt unter 3,4 % fällt. Damit diese Grenze nicht unterschritten wird, benötigt eine Milchkuh in der ersten bis zweiten Laktationsphase einen $peNDF_K$ -Gehalt in der Ration von etwa 20 %. In der vorliegenden Studie befand sich der Milchfettgehalt über 3,6 % (3,66 - 3,88 %). Dies kann mit dem relativ hohen $peNDF_K$ -Gehalt der Rationen (29 - 31 %) und mit dem Maisanteil (15 %) der Kraftfuttermischung erklärt werden. Da durch den Maisanteil die Abbaugeschwindigkeit der Stärke im Pansen langsamer ist, ist das Risiko geringer, dass es zu einer zu hohen Intensität der Produktion und Konzentration an Fermentationsprodukten kommt, was eine Übersäuerung und einen niedrigen pH-Wert im Pansen und in der Folge eine Milchfettdepression verursachen kann (DE BRABANDER 1999 a und b; KRAUSE und OETZEL, 2006). Die Behandlung 5,5 mm wies im Gegensatz zu 14,0 mm den höchsten Milchfettgehalt auf (3,88 vs. 3,66 %). Dies ist ein Resultat der hohen absoluten $peNDF_K$ -Aufnahme (6,59 kg/d) und der deutlich geringeren Selektion gegen $peNDF$. Laut MERTENS (1997) ist eine $peNDF_K$ -

Aufnahme von 5,1 kg pro Tag notwendig, um einen Milchfettgehalt von 3,6 % zu erhalten.

Der Milcheiweißgehalt hatte sich mit Reduzierung der Partikellänge von 14 auf 8,1 mm signifikant erhöht (3,31 vs. 3,41 %). Dieses Ergebnis steht im Kontrast zu einigen Untersuchungen, die keinen Einfluss der Partikellänge auf den Milcheiweißgehalt feststellten (GRANT et al., 1990a; FIRKINS et al., 2001; SCHWAB et al., 2002; KRAUSE und COMBS, 2003; EUN et al., 2004; COOKE und BERNARD, 2005; CAO et al., 2007). PREISSINGER et al. (1997b) berichteten von einer Zunahme des Milcheiweißgehalts (3,4 vs. 3,6 %) bei Verringerung der PL einer Grassilage (8,4 vs. 7,2 mm). Auch TEIMOURI YANSARI et al. (2004) beobachteten bei Reduzierung der PL der Mais- und Luzernesilage in einer TMR (60 % KF) keine Veränderung der Milchleistung, aber eine Erhöhung des Milcheiweißgehalts (3,6 vs. 3,8 %). Die physikalische Struktur des Futters wirkt sich nur indirekt über eine verbesserte Futteraufnahme und eine dadurch erhöhte mikrobielle Eiweißsynthese auf den Milcheiweißgehalt aus (PREISSINGER et al., 1997a). Dies wird auch durch den Stärkegehalt (ca. 30 %) der Maissilage begünstigt (CLARK und ARMENTANO, 1999b). Die Veränderungen des Eiweißgehaltes sind wohl mit einer Verbesserung der duodenalen Rohproteinversorgung in Gegenwart einer verbesserten Energieversorgung zu erklären (SOITA et al., 2000; TEIMOURI YANSARI et al., 2004). Da die Milchleistung mit abnehmender Partikellänge nicht anstieg, jedoch die Futteraufnahme erhöht war, wurde mehr Milchprotein produziert. Dies führt zu einer höheren Proteinkonzentration.

5.2.4 Einfluss der Partikellänge der Maissilage auf das Futteraufnahme- und Selektionsverhalten

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass mit abnehmender PL der Maissilage die Futteraufnahme sowie die Dauer der letzten Mahlzeit am Tag signifikant zunahm. Tendenziell erhöhte sich die Zahl der Mahlzeiten pro Tag, die Zahl der Besuche pro Mahlzeit und die Futteraufnahme pro Mahl. Dies deutet darauf hin, dass Kühe bei Fütterung einer TMR mit kurzer PL eine höhere Motivation haben den Futtertrog bei Nacht zu besuchen, und als Konsequenz daraus die Futteraufnahme zu erhöhen. Im Gegensatz dazu waren die Kühe, welche die Behandlung 14 mm vorgelegt bekamen, besonders bei Nacht (24:00 – 07:30 h), weniger motiviert, den Futtertrog aufzusuchen. Als eine Konsequenz hatten diese

Tiere eine geringere Futteraufnahme sowie Dauer der letzten Mahlzeit am Tag. Um dies zu kompensieren, besuchten diese Kühe den Futtertrog am nächsten Tag früher und begannen die erste Mahlzeit signifikant früher als die Kühe der Behandlungen 8,1 und 5,5 mm. BEAUCHEMIN und YANG (2005) kamen zu demselben Ergebnis. Die Autoren berichteten von einem vergleichbaren Futteraufnahmeverhalten bei Verringerung der PL einer Maissilage von 19,1 über 11 auf 4,8 mm. Sie stellten fest, dass die Kühe welche die kurze PL der Maissilage erhielten, signifikant mehr Futter bei Nacht aufnahmen und die Futteraufnahmeverteilung gleichmäßiger war. Dieses Verhalten kann mit dem Sättigungsmechanismus erklärt werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kuh ein neues Mahl beginnt, positiv mit der seit der letzten Mahlzeit vergangenen Zeit korreliert und negativ mit der aufgenommenen Futtermenge bei der vergangenen Mahlzeit (TOLKAMP et al., 2002; MELIN et al., 2005).

Die geringere Futteraufnahme während der letzten Mahlzeit am Tag (3.07 Uhr) und damit verbunden die reduzierte Futteraufnahme bei Erhöhung der PL der Maissilage kann mit einer Zunahme der Selektion nach feinen Futterpartikeln erklärt werden. Auch KONONOFF und HEINRICHS (2003d) berichteten, dass Kühe, die eine reduzierte Futteraufnahme bei Nacht haben, eine verminderte Futteraufnahme (kg/d) aufweisen. Dies ist vor allem zu beobachten, wenn die Tiere die Möglichkeit haben, die Gesamtmischung nach feinen Partikeln zu selektieren (KONONOFF und HEINRICHS, 2003d). Die ausgeprägte Selektion nach feinen Partikeln während der ersten Mahlzeit am Tag, welche gleichzeitig die größte Mahlzeit am Tag war, könnte die Pansenfermentation negativ beeinflusst haben, was sich in einer verringerten Futteraufnahmebereitschaft bei den nächsten Mahlzeiten zeigte. Darauf könnte auch bei der Behandlung 14 mm im Vergleich zur Behandlung 5,5 mm eine signifikant höhere Propionatkonzentration (28,4 vs. 23,8 mol/100mol FFS) am Morgen im Reticulorumen hinweisen (ZEBELI, 2006c). Von BRADFORD und ALLEN (2007) wurde berichtet, dass die Erhöhung der Propionatkonzentration im Reticulorumen in Verbindung mit hohen Plasmainsulinkonzentrationen und als Folge davon mit einer reduzierten Futteraufnahme bei Hochleistungsmilchkühen steht.

Die Abnahme der PL von 14 auf 8,1 bzw. 5,5 mm der Maissilage reduzierte die Selektion der Kühe gegen die $peNDF_K$ ($> 1,18$ mm) sowie nach feinen Futterpartikeln ($< 1,18$ mm) und erhöhte damit die $peNDF_K$ -Aufnahme (kg/d). ZEBELI et al. (2006b) kamen zu dem Schluss, dass der $peNDF_K$ -Gehalt in der TMR ein guter Indikator für

den Strukturbedarf ist, um Fermentationsbedingungen im Pansen auf einem optimalen Niveau zu halten. Die Autoren berichteten, dass mehr als 6,0 kg peNDF_K pro Tag aufgenommen werden müssen, um den pH-Wert im Pansen in einem physiologischen Bereich von 6,25 zu halten. Mit der hohen peNDF_K-Aufnahme können die guten Pansenfermentationsbedingungen (ZEBELI, 2006c) und der Erhalt des hohen Milchfettgehalts bei Vorlage der Behandlung 5,5 mm erklärt werden.

Zusätzlich führte eine Abnahme der PL der Maissilage zu einer tendenziellen Erhöhung der Anzahl der Mahlzeiten pro Tag und der Anzahl der Besuche pro Mahlzeit, was ebenfalls einen positiven Effekt auf die Fermentationsdynamik im Reticulorumen hatte. Die Futteraufnahme war erhöht, wobei sich die aufgenommene Futtermenge gleichmäßiger auf mehrere Portionen täglich verteilte. Dies zeigte sich in einer konstanteren Futteraufnahme im Tagesverlauf. VAN SOEST (1994) stellte fest, dass die gleichmäßige Versorgung des Reticulorumens mit Nährstoffen während des ganzen Tages zu ausgeglicheneren Pansenverhältnissen führt und damit das Bakterien- und Protozoenwachstum unterstützt wird. Ist die Futteraufnahme jedoch schnell oder selektiv, so kann es zu deutlichen Schwankungen in der Fermentationssäurekonzentration und -zusammensetzung über den Tag kommen. Dies führt zu Störungen der Pansenphysiologie, was seinerseits zu einer schnellen Reduzierung der Futteraufnahme beitragen kann (KRAUSE und OETZEL, 2006).

5.2.5 Einfluss der Partikellänge der Maissilage auf die Verdauungsvorgänge (Kauaktivität, Passage, Partikeldynamik und *in situ*-Abbau)

Die Reduzierung der PL der Maissilage von 14 über 8,1 auf 5,5 mm hatte keinen Einfluss auf Fress-, Wiederkau- und Kauaktivität. Zu diesem Ergebnis kamen auch andere Autoren, welche die PL von Maissilage variierten (CLARK und ARMENTANO, 1999b; BAL et al., 2000; KONONOFF und HEINRICHS, 2003d; BEAUCHEMIN und YANG, 2005). Die Wiederkauzeit lag bei allen 3 PL-Varianten zwischen 405 und 420 Minuten pro Tag und damit 45 bis 60 Minuten über der von BEAUCHEMIN et al. (1994) angegebenen Mindestzeit von 360 Minuten, unterhalb derer es zu Störungen des Pansenmilieus kommen kann. Nach BEAUCHEMIN et al. (1994) und CLARK und ARMENTANO (1997) hätte mit Effekten auf die Kauaktivität ab dem Unterschreiten einer PL von 5 bis 10 mm gerechnet werden müssen. Eine

Veränderung der Wiederkauaktivität wäre mit zunehmender PL anhand verschiedener Untersuchungen zu erwarten gewesen (GRANT et al., 1990b, YANG und BEAUCHEMIN, 2006a), jedoch war das Selektionsverhalten gegen peNDF_K (z.B. Spindelscheiben, Lischblätter, Heu) und für feine Partikel bei der Behandlung 14 mm deutlich erhöht. Dies führte nicht nur auf Grund der geringeren TM-Aufnahme, sondern auch auf Grund der Selektion gegen peNDF_K zu einer wesentlich geringeren peNDF_K -Aufnahme und kompensierte offenbar den Effekt der Partikellänge. Dieses Selektionsverhalten gegen grobe Partikel wurde auch von METHU et al. (2001) und CALBERRY et al. (2003) festgestellt. KONONOFF und HEINRICHS (2003a) konnten in ihren Studien an hochlaktierenden Milchkühen sogar zeigen, dass eine PL von 22,4 mm gegenüber 4,8 mm zu einem so starkem Selektionsverhalten führte, dass die feine PL eine höhere Wiederkauaktivität auslöste als die grobe PL (461 vs. 521 min/d).

Da die Wiederkauzeit (min/24h) für alle 3 PL-Varianten gleich war und sich die Wiederkauschläge pro Tag numerisch erhöhten, kam es zu einer signifikanten Erhöhung der Wiederkauschläge pro Minute mit abnehmender PL, was auch an den Kauschlägen pro Minute zu erkennen ist. Diese Erhöhung der Wiederkauschläge pro Minute kann als Effizienzsteigerung angesehen werden, die Kauindices bestätigen dies. Die Kauzeit in Minuten pro kg NDF-Aufnahme sank mit Verringerung der PL von 14 auf 8,1 mm um 9 Minuten von 117,3 auf 108,0 Minuten, während eine weitere Reduzierung der PL auf 5,5 mm zu keiner weiteren Veränderung führte. Dies bedeutet, dass die Behandlung 14 mm mehr Kauzeit in Anspruch nahm, wobei die gesamte Kauzeit nicht beeinflusst wurde, da die Futteraufnahme bei dieser Behandlung am geringsten war. Auch andere Studien kamen zu dem Ergebnis, dass mit Anstieg der PL die Fress- und Wiederkauzeit pro kg TM-Aufnahme erhöht wurde (NELSON und SATTER, 1992; BEAUCHEMIN et al., 1997; SOITA et al., 2000; SCHWAB et al., 2002). Die Kauzeit in Minuten pro kg Trockenmasse lag zwischen 40,6 und 38,0 pro kg TM-Aufnahme. Dies ist über dem Schwellenwert von SUDWEEKS et al. (1981), welcher bei 30 min/kg TM liegt und nicht unterschritten werden sollte um negative Folgen auf die Verdauungsphysiologie zu vermeiden. Mit der Tatsache, dass die tägliche NDF-Aufnahme für die Behandlungen 8,1 und 5,5 mm signifikant höher war als für die Behandlung 14 mm, ist die höhere Bissenzahl pro Tag zu erklären. Allerdings waren die Wiederkauschläge pro Bissen angesichts der

kürzeren PL und der daraus resultierend geringeren mechanischen Stimulation mit abnehmender PL geringer.

Bei Betrachtung der Resultate der Partikeldynamik zeigt sich, dass mit Verringerung der PL der MS von 14 bzw. 8,1 auf 5,5 mm die Effizienz der Partikelzerkleinerung deutlich abnahm. Die Behandlung 14 bzw. 8,1 mm hatte eine um 3,3 bzw. 2,9 mm kürzere MPL in der Digesta als in der vorgelegten TMR. Hier kommt die höhere Effizienz bei der Zerkleinerung von groben Partikeln zu feinen Partikeln zum Ausdruck (FERNANDEZ et al., 2004; UEDA et al., 2001). Ferner ist bei der Variante 14 mm die Selektion gegen grobe und nach feinen Partikeln zu berücksichtigen. Bei der Behandlung 5,5 mm war die Verringerung der MPL von der vorgelegten TMR zur Digesta mit 1,5 mm deutlich niedriger als bei den anderen beiden Varianten, was auf die geringere Effizienz sowie Notwendigkeit der Zerkleinerung von feinen Partikeln zurückzuführen ist. Die Behandlung 8,1 mm hatte die kürzeste MPL der Digesta mit 1,5 mm, was auf ein optimales Zusammenspiel von Partikelzerkleinerung beim Kauen und mikrobieller Desintegration der Partikelstruktur hindeutet. ZEBELI (2006c) stellte für die Behandlung 8,1 mm die höchste fibrolytische Aktivität fest. ALLEN (1997) ging davon aus, dass Grundfutter eine kritische Partikellänge haben und dass jede weitere Erhöhung der Partikellänge darüber hinaus zu keiner weiteren Steigerung der physikalischen Effektivität der Faser und damit verbunden zu keiner weiteren Stimulation der Kauaktivität führt.

Zwischen den PL-Varianten war kein signifikanter Unterschied der MPL des Kotes festzustellen, jedoch hatten die Behandlungen 14 und 5,5 mm die numerisch höchste MPL (0,17 bzw. 0,16 mm). Die Variante 5,5 mm wies des Weiteren mit 7,1 % den numerisch höchsten Anteil an Partikeln größer als 1,18 mm im Kot auf. Dies deutet darauf hin, dass die Behandlung 5,5 mm eine schlechtere Ausprägung der Fasermatte bzw. Schichtenkonsistenz besaß, dahingehend, dass feine, aber auch grobe Partikel, welche noch nicht optimal abgebaut waren, auf Grund der unzureichenden selektiven Retention den Pansen verlassen konnten. Die Partikel im ventralen Pansenpool weisen jedoch generell eine höhere Wahrscheinlichkeit zum Abfluss auf als die Partikel, die in die Faserschicht integriert sind (POPPI et al., 2001). Durch eine längere Retentionszeit der Partikel in der Faserschicht werden Partikel intensiver abgebaut, was mit Beobachtungen mehrerer Gruppen übereinstimmte (MARTIN et al., 1999; MICHALET-DOREAU et al., 2001; TAJAJ et al., 2004). ZEBELI (2006c) konnte im Rahmen dieser Untersuchungen zeigen, dass sich mit Abnahme

der PL von 14 auf 8,1 mm die NDF-Verdaulichkeit im gesamten Verdauungstrakt erhöhte, während eine weitere Zerkleinerung bis auf 5,5 mm eine Verschlechterung der NDF-Verdaulichkeit bewirkte. Die *in situ*-Ergebnisse der NDF-Verdaulichkeit bestätigten dies ebenfalls. Obwohl keine statistisch abgesicherten Unterschiede zwischen den PL-Varianten vorlagen, zeigte die Behandlung 5,5 mm die numerisch geringste NDF-Verdaulichkeit.

Die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung zeigen ebenfalls, dass die Variante 8,1 mm zu allen Probenahmezeitpunkten sowohl dorsal (35,8 – 38,6 %) als auch ventral (32,9 – 34,5 %) die geringsten Anteile von Digestapartikeln größer als 1,18 mm und die höchsten Gehalte an löslicher Fraktion aufwies. Dieses Resultat spiegelte sich auch in der MPL der entsprechenden Digestaschicht wider, wobei die Behandlung 8,1 mm die kürzeste MPL (1,3 – 1,4 mm) der Partikel ventral und dorsal hatte, während die Variante 14 mm wie erwartet die höchste MPL aufzeigte. Interessanterweise sprechen diese Ergebnisse dafür, dass die Behandlung 8,1 mm eine bessere Partikelzerkleinerung im Pansen ermöglicht hatte.

Allerdings wurde in der Literatur darauf hingewiesen, dass die Zerkleinerung der Partikel ein Resultat von drei Vorgängen bzw. Prozessen ist: dem Kauen beim Fressen, dem Wiederkauen und dem mikrobiellen Abbau. Die ersten beiden Faktoren tragen zu 80 % zur allgemeinen Zerkleinerung der Partikel bei, während der mikrobielle Abbau für den Rest verantwortlich gemacht wird (BEAUCHEMIN und BUCHANA-SMITH, 1990). In einer neuen Studie vertraten TAJAJ et al. (2005) die Meinung, dass eine höhere Aktivität des mikrobiellen Abbaus die Relation verschieben kann, wobei auch ein geringerer Anteil der Zerkleinerung durch die Kauaktivität kompensiert werden kann. Indes zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie auch, dass die Kauaktivität vom Untersuchungsfaktor PL nicht beeinflusst wurde. Dies spricht dafür, dass die Prozesse des ruminalen Abbaus für eine bessere Zerkleinerung der Partikel bei der Variante 8,1 mm verantwortlich waren. Die besseren Ergebnisse des Faserabbaus, der fibrolytischen Aktivität der Digesta (ZEBELI, 2006c), der *in situ*-NDF-Verdaulichkeit und der längeren Retentionszeit im Pansen, welche später diskutiert werden, unterstützen diese Vermutung.

In der vorliegenden Untersuchung waren die Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung zwischen der ventralen und dorsalen Schicht unabhängig von der PL nur unwesentlich, was für geringe Differenzen hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften zwischen den beiden Digestapools spricht. Die

Fasermatte war so dick und tief, dass sie weit in den ventralen Pool reichte und sich dadurch Unterschiede ausglich. Dies widerspricht früheren Untersuchungen mit Schafen und Rindern als Versuchstieren, die *restriktiv* gefüttert wurden (KOVÁCS, 1996). Allerdings wurde von anderen Autoren darauf hingewiesen, dass zwischen zwei wichtigen Pools der festen Digesta im Pansen unterschieden werden kann, nämlich einem dorsalen und einem ventralen Pool mit unterschiedlichen chemischen und mikrobiologischen Eigenschaften (MARTIN et al., 1999; MICHALET-DOREAU et al., 2001; ÖLSCHLÄGER, 2007). Studien von WEIDNER und GRANT (1994), ALLEN und GRANT (2000) und ZEBELI (2005b) bestätigten, dass sich die Partikelzusammensetzung beider Pools bei Kühen ähnelt, die ein relativ hohes Fütterungsniveau erhalten. Weitere Studien bei *ad libitum* gefütterten Milchkühen ergaben, dass die geschichteten Futtermassen als Frischmasse 75 bis 92 % des gesamten Pansenvolumens in Anspruch nehmen können (ROBINSON et al., 1987; OBA und ALLEN, 2000; HARVATINE et al., 2002). Dies bestätigt ebenfalls, dass das Fütterungsniveau wichtig für die Zusammensetzung der Digesta im Pansen ist.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der vorliegenden Studie und anderen ähnlich gelagerten Untersuchungen (BAL et al., 2000; BODUGGARI et al., 2001; QIU et al., 2003) kann davon ausgegangen werden, dass die PL-Varianten zu unterschiedlich ausgeprägten Fasermatten mit unterschiedlicher Schichtenkonsistenz führten. Während das Ausmaß ein quantitatives Kennzeichen der Faserschicht ist, ist die Konsistenz ein qualitativer Maßstab für die Faserschicht. Die Schichtenkonsistenz beschreibt die physikalische Stabilität der Schichtung der Digesta im Pansen, die vorwiegend aus der Vernetzung, der Dichte bzw. dem Wasseranteil, dem Gehalt an potenziell abbaubarer Faser und der Partikellänge resultiert (WELCH, 1982). Die Behandlung 14 mm hatte auf Grund der relativ starken Selektion gegen $peNDF_K$ bzw. gegen grobe und für feine Partikel eine geringer ausgeprägte Schichtenkonsistenz. Daraus folgte eine geringere Verweilzeit der Partikel in der dorsalen Pansenschicht, was in erster Linie deren Faserabbau negativ beeinflusste, wie auch von Zebeli (2006c) und von der höheren fraktionellen Passagerate (5 %/h) der Partikel aus dem Pansen bei dieser Variante bestätigt wurde. In einer Untersuchung bei Milchkühen mit zwei unterschiedlichen Heupartikellängen ermittelten ZEBELI et al. (2005b), dass die Aufstiegsrate eines definierten Körpers (WELCH, 1982) durch die Schichten im Pansen negativ mit der NDF-Aufnahme, insbesondere mit der NDF des Heus und der $peNDF_K$, sowie mit dem Anteil der festen Phase korrelierte. Es gab jedoch eine

positive Korrelation zwischen der Aufstiegsrate und der Turnover-Rate der Trockenmasse der festen Phase des Panseninhaltes, was auf eine Steigerung der Turnover-Rate der festen Digesta bei verminderter Stabilität der Faserschicht hinwies. Des weiteren ist zu vermuten, dass im Vergleich zu den Varianten 8,1 und 5,5 mm auf Grund gleicher Kauzeiten bei allen 3 PL-Varianten, aber geringerer TM-Aufnahme der PL-Variante 14 mm, bei dieser der durch Speichel produzierte Flüssigkeitsanteil im Pansen höher war, was ebenfalls einen Einfluss auf die Schichtenkonsistenz hatte.

Die Schichtenkonsistenz der Behandlung 8,1 mm sollte einer idealen Fasermatte am nächsten gekommen sein, da diese Variante die höchste Faserverdaulichkeit aufwies. Der hohe Anteil von feinen Partikeln und löslicher Fraktion in der Digesta geben einen Hinweis darauf, dass die potentiell passagefähigen Partikel stark an grobe Partikel im dorsalen Pansen assoziiert waren und damit länger und intensiver der mikrobiellen Fermentation ausgesetzt waren. Dies spricht für einen guten Filterschicht-Effekt der Faserschicht (FAICHNEY, 2006). Es ist nicht davon auszugehen, dass das Flüssigkeitsvolumen bei dieser Variante zu gering war um diese Partikel in den ventralen Pansen zu spülen. Denn obwohl die Fermentationsintensität bei dieser Variante sehr hoch war, bestand kein Unterschied im pH-Wert zwischen den PL-Varianten (ZEBELI, 2006c). Dies ist ein Indiz dafür, dass genügend Flüssigkeit vorhanden war, um die Faserschicht zu durchspülen, was den Faserabbau fördert (JEROCH et al., 1999) und die Abfuhr der flüchtigen Fettsäuren erhöht. Des weiteren hatte die Behandlung 8,1 mm wie auch die Behandlung 5,5 mm die höchste absolute $peNDF_K$ -Aufnahme. Dies führt zu einer stabilen, mächtigen Faserschicht im Pansen, was wiederum die Pansenkontraktionen erhöht und eine bessere Pansenpufferung mit sich bringt (ZEBELI et al., 2006a). ZEBELI et al. (2006a) stellten fest, dass die Strukturfaserversorgung nur zu 44 % für die Bildung der Faserschicht verantwortlich ist und der Rest der ungeklärten Streuung mit der PL und Fermentierbarkeit des Grundfutters erklärt werden kann. Auf Grund der kürzeren PL der Behandlung 5,5 mm im Vergleich zur Behandlung 8,1 mm hatte erstere bei gleicher $peNDF_K$ -Aufnahme eine geringere Schichtenkonsistenz.

Interessanterweise zeigen die Ergebnisse der Passageparameter in der vorliegenden Untersuchung, dass mit Reduzierung der PL von 14 auf 8,1 bzw. 5,5 mm die fraktionelle Passagerate der Partikel aus dem Pansen signifikant abnahm (5 vs. 4 bzw. 4 %/h), während die fraktionelle postruminale Passagerate zunahm (7 vs. 11 bzw. 9 %/h). Dies erklärt, warum mit abnehmender PL die Retentionszeit im Pansen

signifikant erhöht ist, während die Retentionszeit im Darm verringert wurde. Eine längere Retentionszeit im Pansen erhöht die Wirkungsdauer der fibrolytischen Mikrobiota auf den Faserabbau, was wiederum bei der PL-Variante 8,1 mm zu einer besseren Zerkleinerung der Partikel beitrug.

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch mit anderen Untersuchungen, die keinen Einfluss (TAF AJ et al., 2001b; BEAUCHEMIN und YANG, 2005) auf die fraktionelle Passagerate der Partikel aus dem Pansen oder eine inverse Beziehung feststellten (TEIMOURY YANSARI et al., 2004). Jedoch ist davon auszugehen, dass die starke Selektion gegen $peNDF_K$ und für feine Partikel bei der Behandlung 14 mm zu einer Störung der Fasermatte beigetragen hatte und dadurch die fraktionelle Passagerate der Partikel zunahm. Obwohl in dieser Untersuchung der pH-Wert im Pansen kaum beeinflusst wurde (ZEBELI, 2006c), erhöhte sich das Acetat-/Propionat-Verhältnis mit abnehmender Partikellänge. Dies ist wiederum auf eine bessere Faserverdaulichkeit bei der Behandlung 8,1 mm zurückzuführen. Dasselbe wurde auch von anderen Autoren festgestellt (BAL et al., 2000). Ein möglicher Grund dafür war auch das Selektionsverhalten der Milchkuh. Beispielsweise gingen KONONOFF et al. (2000) davon aus, dass Gesamtmischrationen mit grober PL zu einem intensiveren Selektionsverhalten der Milchkühe gegenüber einer homogenen TMR führen und die Möglichkeit besteht, dass es Abweichungen im täglichen pH-Wert Verlauf gibt, auch wenn keine Unterschiede im preprandialen pH-Wert und den flüchtigen Fettsäuren im Pansen vorliegen. Auch in der vorliegenden Studie nahm die Futterselektion mit Erhöhung der PL zu, was sich negativ auf das Pansenökosystem auswirken kann, da dieses dann starken Schwankungen in der Artenzusammensetzung unterworfen ist. Außerdem werden die Vorteile der TMR-Fütterung, gleich bleibendes Angebot der Nährstoffe, durch die Selektion außer Kraft gesetzt. Bezüglich des Pansenökosystems zeigten die Resultate von ÖLSCHLÄGER (2007) bei der Behandlung 14 mm eine hohe Diversität der Mikrobiota im Vergleich zur Behandlung 8,1 mm. Diese geringe Spezialisierung bzw. Anpassung der Mikrobiota spricht dafür, dass die Nährstoff- und Faseraufnahme nicht nur im Tagesverlauf, sondern auch von Tag zu Tag verschieden waren, was negative Folgen für das Pansenmilieu und die Konsistenz der Fasermatte zeitigte.

Bei Betrachtung der *in situ*-Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung kann eine suboptimale NDF-Verdaulichkeit bei der Behandlung 14 als auch 5,5 mm festgestellt werden. Bei dieser *in situ*-Messung sollte nicht der Einfluss der PL der

Probe auf ihre Verdaulichkeit betrachtet werden, sondern der Einfluss der PL der TMR auf den Pansenfermentationsstatus. Die Änderung des Abbauverhaltens entsprach somit einem veränderten Pansenmilieu.

Im Gegensatz zur Passage der festen Digesta wurden die Parameter der Flüssigkeitspassage aus dem Pansen von der PL der Maissilage nicht beeinflusst, was auch mit den Ergebnissen anderer Autoren übereinstimmt (YANG et al., 2001a; KONONOFF und HEINRICHS, 2003c; BEAUCHEMIN und YANG, 2005). BEAUCHEMIN und YANG (2005) untersuchten die Wirkung der Verringerung der PL einer MS (19 vs. 11 vs. 6 mm) in einer Gesamtmischung (58 % KF) auf Passageparameter bei Hochleistungsmilchkühen. Die fraktionelle Passagerate und die TMRT der flüssigen Phase wurden durch die reduzierte PL nicht beeinflusst (10,3 - 11,6 %/h bzw. 23,0 – 24,9 h). Dagegen wurde in der vorliegenden Untersuchung die FMRT mit abnehmender PL von 14 bzw. 8,1 auf 5,5 mm deutlich verringert (5,0 bzw. 4,0 vs. 1,1 h). Eine Erklärung hierfür kann die geringere Wasserbindungskapazität von kurzen Partikeln gegenüber längeren sein (TEIMOURI YANSARI et al., 2004). Dies führte zu einer höheren postruminalen Passagerate, wodurch auch der von ZEBELI (2006c) festgestellte NDF-Verdaulichkeitsrückgang bei der Behandlung 5,5 mm zu erklären wäre. Der Autor stellte die Hypothese auf, dass die Unterschiede in der NDF-Verdaulichkeit durch eine geringere Faserfermentation im postruminalen Verdauungstrakt zu Stande kamen. Es gibt Belege dafür, dass 72 bis 88 % der gesamten NDF-Verdauung von Milchkühen mit hohem Fütterungsniveau im Pansen stattfindet, während der Rest im postruminalen Verdauungstrakt fermentiert wird (YANG und BEAUCHEMIN, 2005; SILVEIRA et al., 2007). YANG und BEAUCHEMIN (2005) berichteten in einer vergleichbaren Untersuchung mit abnehmender PL der MS (19,1 vs. 11 vs. 6 mm) von einer unveränderter NDF-Verdaulichkeit (33,6 vs. 30,8 vs. 32,2 %) im Pansen. Dabei zeigten die Milchkühe, welche die kurze PL (6 mm) erhielten, im postruminalen Verdauungstrakt eine reduzierte NDF-Verdaulichkeit (4,7 %) im Vergleich zu den beiden anderen Varianten (12,9 und 12,5 %). Hierdurch waren die Unterschiede der gesamten NDF-Verdaulichkeit zu erklären.

6 Schlussfolgerungen

Die Optimierung der Strukturwirksamkeit durch den Einsatz einer idealen Partikellänge (PL) des Grundfutters in einer Gesamtmischung (TMR) ist eine wichtige Fütterungsstrategie, um die Wiederkäuergerechtigkeit einer TMR für Hochleistungsmilchkühe zu gewährleisten. Hauptziele sind hierbei, eine hohe Futteraufnahme, eine hohe Milchleistung und gleichzeitig ein stabiles Pansenmilieu, welches sich positiv auf den ruminalen Faserabbau und die Pansengesundheit auswirkt, zu erreichen.

Tatsächlich deuteten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit darauf hin, dass eine Reduzierung der PL der Grassilage (GS) in einer TMR von 25 auf 11 mm die Aufnahme der Trockenmasse (TM) und Nährstoffe einschließlich der Faser und Nicht-Faser-Kohlenhydrate (NFC) signifikant erhöhte, ohne die Strukturwirksamkeit der TMR zu beeinträchtigen. Dieses Ergebnis ist insbesondere für Milchkühe zu Laktationsbeginn wichtig, um dadurch das Energiedefizit in dieser Phase der Laktation zu verringern. Obwohl die Fett-Eiweiß-korrigierte-Milchleistung (FECM) von der PL der GS nicht beeinflusst wurde, erhöhte sich mit Abnahme der PL bis 11 mm der Milchfettgehalt und der Milcheiweißgehalt signifikant, was wiederum auf eine bessere Struktur- sowie gleichzeitige Energie- und Nährstoffversorgung dieser PL-Variante zurückzuführen ist.

Andere Ergebnisse derselben Untersuchung zeigten zudem, dass eine höhere PL keine positive Wirkung auf die Kauaktivität hatte. Die Kau-, Fress- und Wiederkauaktivität wurden mit Verringerung der PL der GS in einer TMR nicht verändert, wobei die Kaeffizienz tendenziell zunahm. Interessanterweise wurde der Faserabbau mit Reduzierung der PL der GS bis 11 mm deutlich verbessert. Der bessere Faserabbau spiegelte sich auch in den Eigenschaften der Partikeldynamik von Digesta und Kot wider, d.h. bei dieser Variante wurde die kürzeste Mittlere Partikellänge (MPL) und die höchste funktionelle spezifische Dichte in der Digesta sowie die kürzeste MPL im Kot festgestellt, was wiederum auf ein stabileres Pansenmilieu mit verstärktem ruminalen Faserabbau durch eine pansenphysiologisch bessere Fasermatte bei dieser Futtermittelvariante schließen lässt.

Die Parameter des Faserabbaus wurden von den Ergebnissen der Digestakinetik unterstützt. So erhöhte eine Abnahme der PL der GS bis 11 mm die fraktionelle Passagerate der festen Phase der Digesta, während die Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt (TMRT) verringert wurde. Die Ergebnisse bei der PL-Variante 11 mm zeigten jedoch eine Tendenz, die Verweilzeit im Pansen (RMRT) sowohl von fester als auch flüssiger Phase zu verringern, was auf einen vermehrten Faseraufschluss und bessere Pansenbedingungen zurückzuführen wäre.

Die positiven Effekte einer mäßigen Reduzierung der PL betätigten sich auch bei den Untersuchungen mit Maissilage (MS), obwohl sich dieses Grundfutter in der chemischen Zusammensetzung und morphologischen Struktur von GS wesentlich unterscheidet. Die Abnahme der PL der MS in der TMR von 14 über 8,1 auf 5,5 mm verringerte das Selektionsverhalten gegen physikalisch effektive Faser und verbesserte das Futteraufnahmeverhalten dahingehend, dass eine gleichmäßigere über 24 Stunden verteilte Futteraufnahme stattfand. Dies wirkte sich positiv auf die absolute Strukturversorgung der Kühe aus und verringerte die Spitzen der Fermentationsintensität im Pansen, was sich positiv auf das Pansenmilieu bemerkbar machte.

Weitere Ergebnisse des MS-Versuchs zeigten ebenfalls, dass mit Reduzierung der PL bis auf 8,1 mm die TM-, Nährstoff- und Faseraufnahme erhöht wurde. All diese Effekte wirken sich ebenfalls in der Früh-laktation positiv auf die Deckung des Energiedefizits aus. Im Gegensatz zum GS-Versuch wurde der Milchfettgehalt von der PL der MS nicht beeinflusst. Jedoch erhöhte sich der Milcheiweißgehalt bei den Kühen, welche die PL-Variante 8,1 mm erhielten, was auf eine höhere mikrobielle Proteinproduktion aufgrund besser verteilter TM-Aufnahme sowie einer besseren Verdaulichkeit der organischen Masse hindeutet.

Obwohl die Parameter der Kauaktivität mit Verringerung der PL der MS nicht verändert wurden, nahm die Kaueffizienz mit Reduzierung der PL bis 8,1 mm zu, während die Retentionszeit im Pansen erhöht wurde. Somit stand der cellulolytischen Mikroflora mehr Zeit für den Faserabbau zur Verfügung. Ebenfalls zeigte sich bei dieser PL-Variante ein besserer Faserabbau im Pansen, ermittelt durch eine höhere Partikelzerkleinerungseffizienz und höheren *in situ* Faserabbau im Pansen sowie die kürzeste MPL im Kot. Im Gegensatz dazu konnte bei weiterer Reduzierung der PL der MS bis auf 5,5 mm kein positiver Einfluss auf die Parameter des Faserabbaus

festgestellt werden. Dies ist mit einer höheren Fermentationsintensität im Pansen, kürzerer Retentionszeit und nicht optimalen Bedingungen für den ruminalen Faserabbau zu erklären.

Die Strukturbewertungssysteme von HOFFMANN (1990), DE BRABANDER et al. (1999a und b) und MERTENS (1997) zeigten keinen Strukturmangel bei Verringerung der PL der GS bzw. MS-TMR bis auf 5,5 mm an, obwohl bereits Anzeichen einer Beeinträchtigung der Passagerate, der Partikeldynamik und des ruminalen Faserabbaus festgestellt wurden. Dies deutet darauf hin, dass diese Systeme die Strukturversorgung von Hochleistungsmilchkühen im ersten Laktationsdrittel relativ grob beurteilen. Es werden sensiblere Parameter zur Bewertung der Wiederkäuergerechtheit benötigt als mittlerer präprandialer pH-Wert, Kauaktivität und Milchfettgehalt. Die Partikelgrößenverteilung nach LAMMERS (1996) wies mit abnehmender PL bei der MS und GS-TMR auf keinen Mangel an groben Partikeln hin, während nach KONONOFF (2003b und e) bei der PL-Variante 5,5 mm der MS-TMR ein Mangel angezeigt wurde. Die physikalisch effektive NDF_K sollte zur Strukturbewertung weiterentwickelt und daraus ein Bewertungssystem abgeleitet werden.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle, ausgehend von den Ergebnissen der vorliegenden Studie, eine PL der GS von 11 mm bzw. der MS von 8,1 mm in einer TMR für ähnliche Fütterungsbedingungen empfohlen werden, da die Strukturversorgung und der Faserabbau im Pansen verbessert und gleichzeitig eine höhere Futteraufnahme und potentielle Leistung erzielt werden.

Auf Grundlage der positiven Einflüsse einer mäßigen Reduzierung der PL in den beiden Versuchen, unabhängig vom Grundfuttermittel, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die folgenden Faktoren sollten dabei berücksichtigt werden:

1. Die Laktationsphase der Kühe. Untersuchungen an Hochleistungsmilchkühen über die Effekte der PL sollten in der Transitphase postpartum beginnen, da Tiere in dieser Phase sehr sensibel auf Einflüsse der PL reagieren und dadurch die Faserwirkung auf das Pansenmilieu deutlicher zu erkennen ist. Außerdem

wäre angesichts des Energiedefizits eine höhere Futter- und Energieaufnahme bei diesen Tieren sehr wünschenswert.

2. Des Weiteren sollte die Dauer einer Versuchsperiode auf 7 bis 10 Wochen erhöht werden, um Effekte der PL auf die Milchleistung und Milchinhaltsstoffe voll erfassen zu können.
3. Da eine mäßige Zerkleinerung der PL die Strukturwirksamkeit der Ration erhöhen kann, sollte ein geringer Fasergehalt bzw. ein Krafftutterniveau von bis zu 60 % in Verbindung mit mäßiger Zerkleinerung in der Ration untersucht werden, um zu überprüfen, ob damit die Strukturwirksamkeit der Ration noch erhalten werden kann.

7 Zusammenfassung

Bei der Fütterung von Hochleistungsmilchkühen sind Grassilage (GS) und Maissilage (MS) die wichtigsten Grundfuttermittel in Gesamtmischrationen (TMR). Jedoch ist es auf Grund der Leistungssteigerung der Milchkühe notwendig, den Raufutteranteil in der TMR durch Krafffutterkomponenten mit höherer Energiedichte zu ersetzen. Hierbei tritt die Erhaltung der Wiederkäuergerechtigkeit der Ration in den Vordergrund. Um eine hohe Futteraufnahme sowie eine hohe Milchleistung und gleichzeitig ein stabiles Pansenmilieu zu gewährleisten, welches sich positiv auf den ruminalen Faserabbau auswirkt, wird eine Optimierung der Partikellänge (PL) des Grundfutters in der Ration angestrebt. Hierzu wurden zwei Untersuchungen mit Hochleistungsmilchkühen der Rasse Deutsche Holstein durchgeführt.

Im ersten Versuch wurden 3 PL-Stufen (Kontrolle 25 mm, kurz 11 mm und fein 5,5 mm) von GS in einer TMR mit insgesamt 13 *ad libitum* gefütterten Milchkühen, davon 4 pansenfistulierte Kühe, untersucht. Die TMR setzte sich aus 45 % GS, 5 % Heu und 50 % Krafffutter (incl. Mineralfutter) zusammen. Es stand eine GS (31,3 % TM, 46,5 % NDF i. TM) aus dem ersten Schnitt zur Verfügung, die zu Beginn des Ähren- und Rispenschiebens gemäht wurde. Das Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss der PL einer GS auf die Struktureigenschaften von Gesamtmischrationen in der Fütterung von Hochleistungsmilchkühen zu überprüfen. Um die Wirkung der PL auf die Kaskade der Verdauungsvorgänge im Pansen zu untersuchen, wurden Kauaktivität, Pansenvolumen, Partikelverteilung sowie Partikeldynamik, funktionelle spezifische Dichte der Digesta und Passagerate erfasst. Ferner wurde auch der Einfluss der PL auf Futteraufnahme, Milchleistung und Milchinhaltsstoffe untersucht.

Die Reduzierung der PL der GS in einer TMR bis 11 mm erhöhte die Aufnahme an Trockenmasse (TM) und Nährstoffen einschließlich der Faser und Nicht-Faser-Kohlenhydrate (NFC), ohne die Strukturwirksamkeit der TMR zu beeinträchtigen. Die Fett-Eiweiß-korrigierte-Milchleistung (FECM) wurde nicht beeinflusst, während der Milchfettgehalt und der Milcheiweißgehalt mit Abnahme der PL bis 11 mm zunahm, wobei der Milchfettgehalt primär von der Laktationsphase beeinflusst wurde.

Die Kau-, Fress- und Wiederkauaktivität wurden mit Verringerung der PL der GS in einer TMR nicht verändert, wobei die Kau-effizienz tendenziell zunahm. Im dorsalen

Pansen gehörten bei allen PL Behandlungen etwa 45 % der Partikel der Fraktion > 1,18 mm an, wobei die Varianten 11 und 5,5 mm den signifikant höchsten Anteil an Partikeln kleiner als 1,18 mm aufwiesen. Im ventralen Pansen hatte die Behandlung 11 mm den geringsten Gehalt an Partikeln > 1,18 mm, während die Behandlungen 25 und 5,5 mm gleiche Anteile wie dorsal aufwiesen. Die Partikeldynamik bzw. der Faserabbau wurde mit Reduzierung der PL bis 11 mm verbessert. Somit hatte die PL-Variante 11 mm die kürzeste Mittlere Partikellänge (MPL) und höchste funktionelle spezifische Dichte in der Digesta sowie die kürzeste MPL im Kot. Die Zerkleinerung auf 11 mm erhöhte die fraktionelle Passagerate der festen Phase der Digesta und verringerte die Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt (TMRT), des Weiteren war die TMRT der flüssigen Phase am kürzesten und der Anteil der schöpfbaren Flüssigkeit am gesamten Pansenvolumen am höchsten. Die tendenziell kürzeste Verweilzeit im Pansen (RMRT) sowohl für feste und flüssige Phase hatte die PL-Variante 11 mm.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass eine Reduzierung der PL der GS in einer TMR bis 11 mm die TM und NEL-Aufnahme erhöht, wodurch das Energiedefizit zu Laktationsbeginn abgeschwächt wird. An dieser Stelle kann ausgehend von dieser Studie eine PL von 11 mm für ähnliche Fütterungsbedingungen empfohlen werden, da das Pansenmilieu (Faserabbau) und die potentielle Leistung optimiert werden. Eine höhere PL hat keine positiven Effekte auf die Strukturwirksamkeit und die Homogenität der Ration, und bei weiterer Zerkleinerung unter 11 mm deuten sich Störungen im Pansenmilieu an.

In der zweiten Untersuchung wurden 3 PL-Stufen (Kontrolle 14 mm, 8,1 mm, 5,5 mm) einer MS in einer TMR an insgesamt 12 *ad libitum* gefütterten Hochleistungsmilchkühen, davon 4 Tiere mit permanenter Pansenfistel, geprüft. Es wurde Silomais (36,2 % TM, 51,9 % NDF i. TM, Sorte Benicia, Reifegruppe mittelspät) angebaut und zum Ende der Teigreife mit Normalschnitt geerntet. Die TMR (44,6 % TM, 15,1 % XP, 34,8% NDF i. TM) setzte sich aus 40 % MS, 10 % Heu und 50 % Kraftfutter (inkl. Mineralfutter) zusammen. Das Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der PL einer MS auf die Parameter Kauaktivität, Partikelverteilung sowie Partikeldynamik, *in situ*-Verdaulichkeit, und Passagerate zu untersuchen. Des Weiteren wurde auch die Wirkung der PL auf Futteraufnahme,

Futteraufnahmeverhalten und Futterselektion sowie Milchleistung und Milchinhaltsstoffe untersucht.

Die Abnahme der PL der MS in einer TMR von 14 über 8,1 auf 5,5 mm verringerte das Selektionsverhalten gegen physikalisch effektive Faser und verbesserte das Futteraufnahmeverhalten dahingehend, dass die Futteraufnahme gleichmäßiger über 24 Stunden verteilt wurde. Mit der Reduzierung der PL der MS bis auf 8,1 mm wurde die TM-, Nährstoff- und Faseraufnahme erhöht, während die FECM nicht verändert wurde. Der Milchfettgehalt wurde primär von der Laktationsphase bestimmt, während die PL-Variante 8,1 mm auf Grund der höheren Energieaufnahme den höchsten Milcheiweißgehalt aufwies.

Die Kau-, Fress- und Wiederkauaktivität wurden mit Verringerung der PL der MS nicht verändert, wobei die Kaeffizienz bei der PL von 8,1 mm zunahm. Bei dieser Variante wurden zu allen Probenahmezeitpunkten sowohl dorsal als auch ventral die geringsten Anteile von Partikeln $> 1,18$ mm und $< 1,18$ mm sowie der höchste Gehalt an löslichen Bestandteilen festgestellt. Die in situ NDF-Verdaulichkeit nahm mit Verringerung der PL der MS auf 8,1 mm tendenziell zu, während eine weitere Zerkleinerung auf 5,5 mm wieder zu einer Reduzierung führte. Durch den besseren Faserabbau hatte die PL-Variante 8,1 mm die kürzeste MPL in der Digesta und im Kot. Des Weiteren reduzierte die Zerkleinerung auf 8,1 mm die fraktionelle Passagerate der festen Phase der Digesta, wodurch die RMRT erhöht wurde, während die TMRT von fester und flüssiger Phase der Digesta tendenziell am kürzesten war.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Reduzierung der PL der MS von 14 auf 8,1 mm den Homogenisierungsgrad der TMR verbessert, was wiederum eine gleichmäßige Nährstoff- insbesondere Faseraufnahme der Kühe ermöglicht. Des Weiteren wird die Energieaufnahme erhöht und das Energiedefizit zu Laktationsbeginn abgemildert. Auf Grund der Ergebnisse kann eine PL der MS in einer TMR von 8,1 mm für vergleichbare Fütterungsbedingungen empfohlen werden. Die Strukturfaserversorgung ist gewährleistet, um ein optimales Pansenmilieu aufrechtzuerhalten, und die potentielle Leistung kann erhöht werden. Eine höhere PL ist auf Grund des Selektionsverhaltens der Milchkühe gegen Strukturfaser ohne Vorteile. Eine weitere Zerkleinerung bis 5,5 mm wird allerdings nicht empfohlen, da sich Störungen im Pansenmilieu andeuten.

8 Summary

In the feeding of high yielding dairy cows grass- (GS) and maize silage (MS) are important roughages for total mixed rations (TMR). The TMR of high-producing dairy cows contain increasing ratios of concentrate to forage to increase their energy density needed for maintenance, production, and reproduction, Although the latter diets increase short-term milk production, this feeding strategy hampers the maintenance of a ruminant-specific nutritional management having negative effects on the maintenance of proper rumen conditions and digestion. In fact, a major challenge of dairy industry today is to feed dairy cows high grain diets to support high milk production while maintaining a healthy rumen with a balanced microbiota. Precondition for the latter is the optimization of roughage particle length (PL) in the TMR. Two different feeding and physiological trials were conducted to investigate rumen-physiological effects of forage PL and advance the knowledge on the evaluation of physical effectiveness as well as on the optimization of forage PL in the TMR used in the feeding of high-yielding Holstein cows.

In the first experiment, three different PL (control ca. 25 mm, short 11 mm and fine 5.5 mm) of GS in a TMR were tested in 13 *ad libitum*-fed German-Holstein dairy cows, including 4 rumen-cannulated cows. The TMR consisted of 45 % GS, 5 % hay and 50 % concentrate (1 % minerals included). The GS used was a first cut grass (31.3 % dry matter (DM), 46.5 % NDF in DM) harvested at the end of the vegetative growing stage. An array of rumen digestive variables including rumination activity, rumen digesta volume, particle size distribution and particle dynamics, functional specific gravity and passage rate were measured. Furthermore, responses of feed intake, milk production and milk composition were measured to evaluate the effects of the PL on productive performance of dairy cows.

Results showed that lowering the PL of GS up to 11 mm increased DM and nutrient intake including fiber and non fiber carbohydrates, without compromising the physical effectiveness of TMR. The fat-protein-corrected-milk yield (FPCM) was not affected, whereas the milk fat- and milk protein content increased by decreasing PL of GS up to 11 mm, while the milk fat content was mainly influenced by days in lactation.

The chewing-, eating- and rumination activity were not affected by the reduction of the PL of GS in a TMR, whereas the chewing efficiency tendentially increased. Cows fed the three PL-diets demonstrated in the dorsal rumen sac approximately 45 % particles > 1.18 mm screen, while those fed PL-variants of 11 and 5.5 mm showed the highest amount of particles < 1.18 mm. In the ventral rumen sac the medium PL (11 mm) had the lowest amount of the particle fraction of > 1.18 mm, whereas other two PL variants 25 and 5.5 mm had similar amounts as observed in the dorsal sac. The lowering of the PL of GS up to 11 mm improved particle dynamics and fiber degradation. Consequently, cows fed the medium PL had the shortest mean particle length (MPL) and the highest functional specific gravity (FSG) in the rumen digesta mass as well as the shortest MPL in the feces. The reduction of PL up to 11 mm increased the fractional passage rate of solid digesta mass out of the rumen and declined the total mean retention time in the digestive tract (TMRT). Furthermore, with decreasing of the PL of GS up to 11 mm the TMRT of liquid digesta mass was shortened and the amount of bailable liquids of total digesta mass was increased. Cows fed the medium PL showed a tendency to shorten the rumen mean retention time (RMRT) for both the solid and liquid digesta mass.

Taken together, the data obtained indicate that the reduction of PL of GS up to 11 mm increases DM and energy intake suggesting a potential of the latter PL to decrease the energy deficit of high yielding dairy cows post partum. In conclusion, results of this study recommend the inclusion of a medium PL of GS for comparable feeding conditions, because the medium PL-based diet optimized both rumen milieu and the productive performance.

In the second experiment, three different PL (control 14 mm, short 8.1 mm and fine 5.5 mm) of MS in a TMR were tested in 13 *ad libitum*-fed German-Holstein dairy cows, including 4 rumen-cannulated cows. The whole-maize plant (36.2 % DM, 51.9 % NDF in DM) was harvested at dough stage of maturity with kernel processing (2 mm) at three different chopping lengths. The TMR (44.6 % DM, 15.1 % CP, 34.8% NDF in DM) consisted of 40 % MS, 10 % hay and 50 % concentrate (1 % minerals included). The aim of this experiment was to investigate the effects of PL of a MS-based TMR on the rumination activity, particle size distribution and particle dynamics, *in situ*-digestibility and passage rate. Furthermore, the impact of PL of MS on cows'

intake patterns and sorting activity, feed intake, milk production and milk composition were investigated.

Cows linearly decreased sorting against physically effective fiber content of TMR as PL of MS was reduced up to 5.5 mm resulting in a better distributed feed consumption over the day. Reducing the PL of MS up to 8.1 mm increased DM and nutrient intake including structural carbohydrates, whereas the FPCM was not affected. The milk fat content was mainly influenced by days in lactation, while the medium level of PL (8.1 mm) had the highest milk protein content.

The chewing-, eating- and rumination activity were not affected by the reduction of the PL of MS in a TMR, whereas the medium PL (8.1 mm) demonstrated an increased chewing efficiency. The PL variety 8.1 mm had at all sampling times in the dorsal and in the ventral rumen sac the lowest fraction of particles > 1.18 mm and < 1.18 mm as well as the highest amount of soluble fraction. The in situ NDF-digestibility tended to improve with lowering of the PL of MS up to 8.1 mm, while further reduction of PL led to a lower digestibility. The medium level of PL (8.1 mm) had the shortest MPL in the rumen digesta mass as well as in the feces. Furthermore, the reduction of PL of MS up to 8.1 mm decreased the fractional passage rate of solid digesta mass out of the rumen resulting in higher RMRT. However, the TMRT of solid and liquid digesta mass tended to be shorter by the latter treatment.

Taken together, the present results suggest that the reduction of PL up to 8.1 mm improve the homogenization of TMR, which leads to a uniform energy and especially fiber intake. Also, the higher energy intake in response to feeding of the medium PL could be particularly beneficial in terms of decreasing the risk of energy deficit by high yielding dairy cows post partum. In conclusion, the results recommend the inclusion of a PL of MS of 8.1 mm in the TMR for comparable feeding conditions. However, a further reduction of PL of MS up to 5.5 mm can not be recommended because of the indications of an impaired rumen milieu.

9 Literaturverzeichnis

- ALLEN, D. M. (1997): Relationship between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber. J. Dairy Sci., **80**, 1447-1462.
- ALLEN, D. M. und R. J. GRANT (2000): Interactions between forage and wet corn gluten feed as sources of fiber in diets for lactating dairy cattle. J. Dairy Sci., **83**, 322-331.
- ALWASH, A. H. und P. C. THOMAS (1971): The effect of the physical form of the diet and the level of feeding on the digestion of dried grass by sheep. J. Sci. Fd. Agric., **22**, 611-615.
- ALZAHAL, O., M. R. OR-RASHID, S. L. GREENWOOD, M. S. DOUGLAS und B. W. MCBRIDE (2007): Subacute ruminal acidosis increases milk fat depression with diets supplemented with polyunsaturated fatty acids. J. Anim. Sci. (Suppl.), **85**, 561.
- ARMENTANO, L. E., C. PASTORE und P. C. HOFFMAN (1988): Particle size reduction of alfalfa silage did not alter nutritional quality of high forage diets for dairy cattle. J. Dairy Sci., **71**, 409-413.
- ARMENTANO, L. E. und M. PEREIRA (1997): Measuring effectiveness of fiber by animal response trials. J. Dairy Sci., **80**, 1416-1425.
- ASAE, American Society of Agricultural Engineers (1993) S424: Method of determining and expressing particle size of chopped forage. 40th ed. Am. Soc. Agric. Eng., St Joseph, Mi.
- BAE, D. H., J. G. WELCH und B. E. GILMAN (1983): Mastication and rumination in relation to body size in cattle. J. Dairy Sci., **66**, 2137-2141.
- BAL, M. A., R. D. SHAVER, A. G. JIROVEC, K. J. SHINNERS, J. G. COORS (2000): Crop processing and chop length of corn silage: Effects on intake, digestion and milk production by dairy cows. J. Dairy Sci., **83**, 1264-1273.
- BALCH, C. C. (1958): Observations on the act of eating in cattle. Br. J. Nutr., **12**, 330.
- BALCH, C. C. und R. C. CAMPLING (1962): Regulation of voluntary food intake in ruminants. Nutr. Abstr. Rev., **32**, 669-686.
- BALCH, C. C. (1971): Proposal to use time spent chewing as an index of the extent to which diets for ruminants possess the physical property of fibrousness characteristic of roughages. Br. J. Nutr., **26**, 383-392.
- BARBER, M. C., R. A. CLEGG, M. T. TRAVERS und R. G. VERNON (1997): Lipid metabolism in the lactating mammary gland. Lipids and Lipid metabolism. In: *Boichimica et Biophysica Acta*, 101-126

- BAUMGARD, L. H., J. K. SANGSTER und D. E. BAUMAN (2001): Milk fat synthesis in dairy cows is progressively reduced by increasing supplemental amounts of trans-10, cis-12 conjugated linoleic acid. J. Nutr., 131, 1764-1769.
- BAUMAN, D. E., J. M. GRIINARI (2003): Nutritional regulation of milk fat synthesis. Ann. Rev. Nutr., 23, 203-227.
- BAUMGARD, L. H., B. A. CORL, D. A. DWYER, A. SAEBO, D. E. BAUMAN (2000): Identification of the conjugated linoleic acid isomer that inhibits milk fat synthesis. Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol., 278, 179-189.
- BEAUCHEMIN, K. A. und J. G. BUCHANA-SMITH (1989): Effects of dietary neutral detergent fiber concentration and supplementary long hay on chewing activities and milk production of dairy cows. J. Dairy Sci., 72, 2288-2295.
- BEAUCHEMIN, K. A. und BUCHANA-SMITH, J. G. (1990): Effects of fiber source and method in feeding on chewing activities, digestive function and productivity of dairy cows. J. Dairy Sci., 73, 749-760.
- BEAUCHEMIN, K. A. (1991a): ingestion and mastication of feed by dairy cattle. Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract., 7, 439-462.
- BEAUCHEMIN, K. A., B. I. FARR und L. M. RODE (1991b): Enhancement of the effective fiber content of barley-based concentrates fed to dairy cows. J. Dairy Sci., 74, 3128-3139.
- BEAUCHEMIN, K. A., B. I. FARR, L. M. RODE und G. B. SCHAALJE (1994): Effects of alfalfa silage chop length and supplementary long hay on chewing and milk production of dairy cows. J. Dairy Sci., 77, 1326-1339.
- BEAUCHEMIN, K. A., L. M. RODE und M. V. ELIASON (1997): Chewing activities and milk production of dairy cows fed alfalfa as hay, silage, or dried cubes or silage. J. Dairy Sci., 80, 324-333.
- BEAUCHEMIN, K. A., W. Z. YANG und L. M. RODE (2003): Effects of particle size of alfalfa-based dairy cows diets on chewing activity, ruminal fermentation and milk production. J. Dairy Sci., 86, 630-643.
- BEAUCHEMIN, K. A. und W. Z. YANG (2005): Effects of physically effective fiber on intake, chewing activity and ruminal acidosis for dairy cows fed diets based on corn silage. J. Dairy Sci., 88, 2117-2129.
- BERNARD, L., J. P. CHAISE, R. BAUMONT und C. PONCET (2000): The effect of physical form of orchard grass hay on the passage of particulate matter through the rumen of sheep. J. Anim Sci., 78, 1338-1354.
- BERZAGHI, P., G. COZZI, F. GOTTARDO, G. M. BURATO, S. SEGATO und I. ANDRIGHETTO (2001): Effetto delle dimensioni delle particelle di una dieta unified sul comportamento alimentare e sulla produzione di bovine da latta. Zoo. Nutr. Anim., 27, 135-144.

- BEUKELLEN, P., T. H. VANWENSING und H. J. BREUKINK (1985): Der Einfluss von gehäckseltem Heu auf Wiederkauzeit, Pansenfermentation, Milchfett-Produktion, Blutglucose- und Insulingehalte bei Milchkühen. Z. Tierphysiol. Tierernähr. U. Futtermittelkd., 53, 19-34.
- BHANDARI, S. K., K. H. OMINSKI, K. M. WITTENBERG, J. C. PLAIZIER (2007): Effects of chop length of alfalfa and corn silage on milk production and rumen fermentation of dairy cows. J. Dairy Sci., 90, 2355-2366.
- BINES, J. A. (1986): Complete Diets. In: Principles and practice of feeding dairy cows (Eds.: BROSTER, W. H., R. H. PHIPPS und C. L. JOHNSON). 163-175.
- BIRKHAMMER, H. (1995): TMR- die neue Zauberformel für die Milchviehfütterung. Veredlungsprodukt., 1, 2-3.
- BLAXTER, K. (1989): Energy metabolism in animals and man. Cambridge University Press. New York, N.Y.
- BODDUGARI, K., R. J. GRANT, R. STOCK und M. LEWIS (2001): Maximal replacement of forage and concentrate with a new wet corn milling product for lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 84, 873-884.
- BOURQUIN, L. D., E. C. TITGEMEYER, N. R. MERCHEN und G. C. FAHEY (1994): For- age level and particle size effects on orchard grass digestion by steers. I.: Site and extend of organic matter, nitrogen and cell wall digestion. J. Anim. Sci., 72, 746-758.
- BRADFORD, B. J. und M. S. ALLEN (2007): Depression in feed intake by a highly fermentable diet is related to plasma insulin concentration and insulin response to glucose infusion. J. Dairy Sci., 90, 3838-3845.
- BROUK, M. und R. BELYEA (1993): Chewing activity and digestive responses of cows fed alfalfa forages. J. Dairy Sci., 76, 175-182.
- BUCK, G. R., W. G. MERRILL, C. E. COPPOCK und S. T. SLACK (1969): Effect of recutting and plant maturity on kernel passage and feeding value of corn silage. J. Dairy Sci., 52, 1617-1623.
- BUCKMASTER, D. R. (2000): Particle size in dairy rations. In: Recent advances in animal nutrition. (Eds.: GRANSWORTHY, P. C. und J. WISEMAN). University of Nottingham, UK, 109-128.
- BUTLER, W. R. und R. D. SMITH (1989): Interrelationships between energy and post partum reproductive function in dairy cattle. J. Dairy Sci., 72, 767-783.
- CALBERRY, J. M., J. C. PLAIZIER, M. S. EINARSON und B. W. MCBRIDGE (2003): Effects of replacing chopped alfalfa hay with alfalfa silage in a total mixed ration on production and rumen conditions of lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 86, 3611-3619.

- CALSAMIGLIA, S., A. FERRET und M. DEVANT (2002): Effects of pH and pH fluctuations on microbial fermentation and nutrient flow from a dual-flow continuous culture system. J. Dairy Sci., 85, 574-579.
- CALLISON, S. L., J. L. FIRKINS, M. L. EASTRIDGE und B. L. HULL (2001): Site of nutrient digestion by dairy cows fed corn of different particle sizes or steam rolled. J. Dairy Sci., 84, 1458-1467.
- CAO, Z. J., S. L. LI, J. J. XING, M. MA und L. L. WANG (2007): Effects of maize grain and lucerne particle size on ruminal fermentation, digestibility and performance of cows in midlactation. J. Anim. Phys. Nutr.,
- CASTLE, M. E., M. S. GRILL und J. N. WATSON (1981): Silage and milk production: Comparisons between grass silage of three different chop length. Grass Forage Sci., 34, 293-301.
- CHAI, K., P. M. KENNEDY und L. P. MILLIGAN (1984): Reduction in particle size during rumination in cattle. Can. J. Anim. Sci., 64 (Suppl.), 339-340.
- CHENG, K. J. und R. HIRONAKA (1973): Influence of feed particle size on pH, carbohydrate content and viscosity of rumen fluid. Can. J. Anim. Sci., 53, 417-422.
- CHILLIARD, Y., A. FERLAY, R. M. MANSBRIDGE und M. DOREAU (2000): Ruminant milk fat plasticity: nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids. Ann. Zootech., 49, 181-205.
- CHOUINARD, P. Y., L. CORNEAU, D. E. BAUMAN, W. R. BUTLER, Y. CHILLIARD und J. K. DRACKLEY (1998): Conjugated linoleic acid content of milk from cows fed different sources of dietary fat. J. Dairy Sci., 81, 233.
- CLARK, P. W., R. E. RICKETS, R. L. BELYEA und G. F. KRAUSE (1980): Feeding and managing dairy cows in three versus one production group. J. Dairy Sci., 63, 1299-1308.
- CLARK, P. W. und L. E. ARMENTANO (1997): Influence of particle size on the effectiveness of beet pulp fiber. J. Dairy Sci., 80, 898-904.
- CLARK, P. W. und L. E. ARMENTANO (1999a): Influence of particle size on the effectiveness of fiber with a combination of nonforage fiber sources. J. Dairy Sci., 82, 675-680.
- CLARK, P. W. und L. E. ARMENTANO (1999b): Influence of particle size on the effectiveness of fiber in corn silage. J. Dairy Sci., 82, 581-588.
- CLARK, P. W. und L. E. ARMENTANO (2002): Influence of particle size on the effectiveness of the fiber in alfalfa silage. J. Dairy Sci., 85, 3000-3007.
- COENEN, M. (1996): Mischration, total mixed ration – eine Fütterungstechnik aus tierärztlicher Sicht. Übersichten Tierernährung, 24, 118-128.

- COLLIER, R. J. (1985): Nutritional, metabolic and environmental aspects of lactation. In: Lactation (Ed.: LARSON B. L.). The Iowa State University , 80-127
- COLLOMB, M., H. EYER, R. SIEBER (2002): Chemische Struktur und Fettsäureverteilung des Milchfettes. Agrar Forschung, 9 (6), 240-245.
- COOLE, K. M. und J. K. BERNARD (2005): Effect of length of cut and kernel processing on use of corn silage by lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 88, 310-316.
- COOK, D. I. (1995): Salivary secretion in ruminants. Ruminant physiology: Digestion, metabolism, growth and reproduction. Proc. 8th Intl. Sym. Rum. Physiol., 153-170.
- COOKE, K. M. und J. K. BERNARD (2005): Effect of length of cut and kernel processing on use of corn silage by lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 88, 310-316.
- COPPOCK, C. E., C. H. NOLLER und S. A. WOLFE (1974): Effect of forage-concentrate ratio in complete feeds fed ad libitum on energy intake in relation to requirements by dairy cows. J. Dairy Sci., 57, 1371-1380.
- COPPOCK, C. E. (1977): Feeding methods and grouping systems. J. Dairy Sci., 60, 1327-1336.
- COPPOCK, C. E., D. L. BATH und B. HARRIS (1981): From feeding to feeding systems. J. Dairy Sci., 64, 1230-1249.
- CORL, B. A., L. H. BAUMGARD, D. A. DWYER, J. M. GRIINARI, B. S. PHILLIPS und D. E. BAUMAN (2001): The role of delta 9-desaturase in the production of cis-9, trans-11 CLA. J. Nutr. Biochem., 12, 622-630.
- DE BOEVER, J. L., J. I. ANDRIES, D. L. DE BRABANDER, D. G. COTTYN und F. X. BUYSSE (1990): Chewing activity of ruminants as a measure of physical structure. A review of factors affecting it. Anim. Feed Sci. Technol., 27, 281-291.
- DE BOEVER, J. L., A. M. DE SMET, D. L. DE BRABANDER, und C. V. BOUCQUE (1993a): Evaluation of physical structure. 2. Grass silage. J. Dairy Sci., 76, 140-153.
- DE BOEVER, J. L., D. L. DE BRABANDER, A. M. DE SMET, J. M VANACHER und C. V. BOUCQUE (1993b): Evaluation of physical structure. 2. Maize silage. J. Dairy Sci., 76, 1624-1634.
- DE BRABANDER, D. L., J. V. AERTS, C. V. BOUCQUÈ und F. X. BUYSSE (1983): Influence de la finesse de hachage de l'ensilage d'herbe pré fanée sur l'ingestion et les résultats de production chez la vache laitière. Revue de l'Agriculture, 36, 107-122.

- DE BRABANDER, D. L., J. L. DE BOEVER, J. M. VANACKER, C. V. BOUCQUE und S. M. BOTTERMAN (1999a): Evaluation of physical structure in dairy cattle nutrition. In: *Recent Advances in Animal Nutrition* (Eds.: Gransworthy, P. C. und J. Wiseman). University of Nottingham, UK, 111-147.
- DE BRABANDER, D. L., J. L. DE BOEVER, A. M. DE SMET, J. M. VANACKER und C. V. BOUCQUE (1999b): Evaluation of the physical structure of fodder beets, potatoes, pressed beet pulp, brewers grains and corn cob silage. *J. Dairy Sci.*, 82, 110-121.
- DE BRABANDER, D. L., J. L. DE BOEVER, J. M. VANACKER und N. E. GEERTS (2002): Evaluation and effects of physical structure in dairy cattle nutrition. *XXII World Buiatrics Congress*, pp. 182-197.
- DEMARQUILLY, C. und J. P. DULPHY (1977): Effect of ensiling on feed intake and animal performance. 1. Int. Meeting animal production from temperate grassland, Dublin, 53-61.
- DESWYSEN, A. G., M. VANBELLE und M. FOCANT (1978): The effect of silage chop length on the voluntary intake and rumination behavior of sheep. *J. Br. Grassld. Soc.*, 33, 107-115.
- DESWYSEN, A. G. und H. J. EHRLEIN (1981): Silage intake, rumination and pseudorumination activity in sheep studied by radiography and jaw movement recordings. *Br. J. Nutr.*, 46, 327-335.
- DESWYSEN, A. G., W. C. ELLIS und K. R. POND (1987a): Interrelationships among voluntary intake, eating and rumination behavior and ruminal motility of heifers fed corn silage. *J. Anim. Sci.*, 64, 835-841.
- DE VRIES, M. J. und R. F. VEERKAMP (2000): Energy balance of dairy cattle in relation to milk production variables and fertility. *J. Dairy Sci.*, 83, 62-69.
- DEWHURST, R. J., J. M. MOORBY, M. S. DHANOA und W. J. FISHER (2002): Effects of level of concentrate feeding during the second gestation of Holstein Friesian dairy cows. I. feed intake and milk production. *J. Dairy Sci.*, 85, 169-177.
- DITTRICH, A., H. DAEBERITZ, D. PREDIGER, M. HOFFMANN und R. FUCHS (1986): Untersuchungen zum Verzehr- und Wiederkauverhalten an Schafen. *Arch. Anim. Nutr.*, 11, 1043-1052.
- DIXON, R. M. und L. P. MILLIGAN (1985): Removal of digesta components from the rumen of steers determined by sieving techniques and fluid, particulate and microbial markers. *Br. J. Nutr.*, 53, 347-362.
- DLG, Deutsch Landwirtschaftsgesellschaft (1995): Vorgaben zum Einsatz von Mischrationen (TMR) bei Milchkühen. *DLG-Information*, 2.
- DLG, Deutsch Landwirtschaftsgesellschaft (2001): Struktur- und Kohlenhydratversorgung der Milchkuh. *DLG-Information*, 2.

- DOHME, F. (2005): Fetteinsatz in der Milchviehfütterung und Einfluss auf die Produktqualität. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Vol. 49, 181-205.
- DULPHY, J. P. und M. VAN OS (1996): Control of voluntary intake of precision-chopped silages by ruminants: A review. Reprod. Nutr. Dev., 36, 113-135.
- DULPHY, J. P. und C. DEMARQUILLY (1975): Influence de la machine de récolte sur les quantités d'ensilage ingérées et les performances des vaches laitières. Annales de Zootechnie, 24, 363-371.
- DUPCHAK, K. (1999): Feeding tips from Manitoba agriculture total mixed rations for dairy cattle. Hoard's dairyman, 5, 130-133.
- EINARSON, M. S., J. C. PLAIZIER und K. M. WITTENBERG (2004): Effects of barley silage chop length on productivity and rumen conditions of lactating dairy cows fed a total mixed ration. J. Dairy Sci., 87, 2987-2996.
- EKINCI, C. und G. A. BRODERICK (1997): Effect of processing high moisture ear corn on ruminal fermentation and milk yield. J. Dairy Sci., 80, 3298-3307.
- EMMANUEL, B., M. J. LAWLOR und D. M. MCALEESE (1969): The rumen buffering system of sheep fed pelleted roughage-concentrate rations. Br. J. Nutr., 23, 805-811.
- ENGELHARD, T., I. LACHMANN und B. FISCHER (1993): Leistungsfütterung in Milchviehherden, aber wie? Neue Landwirtschaft, 7, 63-66.
- ERIKSSON, S., G. JÖNSSON, S. J. PERSSON und O. WALLIN (1968): The influence of pelleted and wafered roughage on the rumen digestion, the milk fat content and the health of cows. Acta Agric. Scand., 18, 165-176.
- EUN, J. S., K. A. BEAUCHEMIN, S. H. HONG und W. Z. YANG (2004): Effects of mechanical processing on the nutritive value of barley silage for lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 87, 4170-4177.
- FAICHNEY, J. G. (1986): The kinetics of particulate matter in the rumen. In: Control of Digestion and Metabolism in Ruminants (Eds.: MILLIGAN, L. P., W. L. GROVUM, A. DOBSON) Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 173-195.
- FAICHNEY, J. G. (1993): Digesta flow. In: Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. (Eds.: FORBES, J. M. and J. FRANCE). CAB International, Wallingford, Oxon, 54 – 85.
- FAICHNEY, J. G. (2006): Digesta flow. In: Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. (Eds.: DIJKSTRA, J., J. M. FORBES, J. FRANCE). CAB International, Wallingford, UK, 49-86.
- FERNANDEZ, I., C. MARTIN, M. Champion und B. MICHALET-DOREAU (2004): Effect of corn hybrid and chop length of whole-plant corn silage on digestion and intake by dairy cows. J Dairy Sci., 87, 1298-1309.

- FIRKINS, J. L., M. L. EASTRIDGE, N. R. ST-PIERRE und S. M. NOFTSGER (2001): Effects of grain variability and processing on starch utilization by lactating dairy cattle. J. Dairy Sci. (Suppl.), 79, 218-238.
- FISCHER, J. M., J. G. BUCHANAN-SMITH, C. CAMPBELL, D. G. GRIEVE und O. B. ALLEN (1994): Effects of particle size and long hay for cows fed total mixed rations based on alfalfa and corn. J. Dairy Sci., 77, 217-229.
- FISCHER, B. (2001): Zur Versorgung von Milchkühen mit Mischrationen. Viehwirtschaft. Fachtagung, Gumpenstein, 37-45.
- FISHER, D. S., J. C. BURNS und K. R. POND (1988): Estimation of mean and median particle size of ruminant digesta. J. Dairy Sci., 71, 518-524.
- FRENS, A. M. (1960): Die Struktur des Raufutters als wichtiger Faktor bei der Pansenverdauung. Rationalisierung der viehwirtschaftlichen Erzeugung. Vorträge des internationalen Ferienkurses für Tierwissenschaftler, Trenhorst, 8-14.
- FROETSCHEL, M. A. und H. E. AMOS (1991): Effects of dietary fiber and feeding frequency on ruminal fermentation, digesta water-holding capacity and fractional turnover of contents. J. Anim. Sci., 69, 1312-1321.
- FÜRL, M. (1999): Diät für hohe Milchleistungen. DLG-Mitteilung 4, 28 – 30.
- GALYEAN, M. L. und A. L. GOETSCH (1993): Utilization of forage fiber by ruminants. In: Forage cell wall structure and digestibility. (Eds. Jung et al.), Madison, Wisconsin, USA, 33-77.
- GARRETT, E. F., M. N. PEREIRA, K. V. NORDLUND, L. E. ARMENTANO, W. J. GOODGER und G. R. OETZEL (1999): Diagnostic methods for the detection of subacute ruminal acidosis in dairy cows. J. Dairy Sci., 82, 1170-1178.
- GENCOGLU, H. und I. I. TURKMEN (2006): Effects of forage source on chewing and rumen fermentation in lactating dairy cows. Revue Méd. Vét., 157, 463-470.
- GERIGHAUSEN, H. G. (2000): Ein landtechnischer Exkurs zur TMR-Fütterung. Tagung Arbeitskreis Großtierpraxis, Haus Riswick, 68-70.
- GEARHART, M. A., C. R. CURTIS, H. N. ERB, R. D. SMITH, C. J. SNIFFEN L. E. CHASE und M. D. COOPER (1990): Relationship of changes in condition score to cow health in Holsteins. J. Dairy Sci., 73, 3132-3140.
- GFE, Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (1991): Leitlinien für die Bestimmung der Verdaulichkeit von Roh Nährstoffen an Wiederkäuern. J. Anim. Physiol Nutr., 65, 229-234.
- GFE, Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (2001): Versorgung mit "strukturiertem" Grundfutter. In: Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. DLG-Verlag, 57-69.

- GIVENS, D. I. (1987): Nutritive value of apple pomace for ruminants. Anim. Feed Sci. Technol., 11, 189-197.
- GRANT, R. J., V. F. COLENBRANDER, D. R. MERTENS (1990a): Milk fat depression in dairy cows: Role of particle size of alfalfa hay. J. Dairy Sci., 73, 1823-1833.
- GRANT, R. J., V. F. COLENBRANDER, D. R. MERTENS (1990b): Milk fat depression in dairy cows: Role of silage particle size. J. Dairy Sci., 73, 1834-1842.
- GRANT, R. J., V. F. COLENBRANDER und J. L. ALBRIGHT (1990c): Effect of particle size of forage and rumen cannulation on chewing activity and laterality in dairy cows. J. Dairy Sci., 73, 3158-3164.
- GRANT, R. J. und S. J. WEIDNER (1992): Effect of fat from whole soybeans on performance of dairy cows fed rations of differing fiber level and particle size. J. Dairy Sci., 75, 2742-2751.
- GREENHALGH, J. F. D. und G. W. REID (1974): Long- and short-term effects on intake of pelleting roughage for sheep. Anim. Prod., 19, 77-86.
- GRENET, E. (1989): A comparison of digestion and reduction in particle size of Luzerne hay (*Medicago sativa*) and Italian ryegrass hay (*Lolium italicum*) in the ovine digestive tract. Br. J. Nutr., 62, 493-507.
- GRUHN, M und M. HOFFMANN (1982): Einfluss der Fütterungsfrequenz auf Futteraufnahme, Verdauungsvorgänge und Leistung bei Rindern und Schafen. Forschungsberichte Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft, 20, 13-14.
- GÜRTLER, H. (1989): Die Physiologie der Verdauung und Resorption. In: Lehrbuch der Physiologie der Haustiere (Ed.: E. KOLB). Band I.
- GUTH, N., E. WEIGAND, U. MEYER und F. J. BOCKISCH (1998): Futteraufnahme, Leistung und Kauaktivität von Milchkühen beim Angebot von Silagen mit unterschiedlicher Häckselstruktur. VDLUFA Kongress, Darmstadt, 389-392.
- HARVATANI, D. I., J. E. WINKLER, M. DEVANT-GUILLE, J. L. FIRKINS, N. R. ST-PIERRE, B. S. OLDICK und M. L. EASTRIDGE (2002): Whole linted cottonseed as a forage substitute: Fiber effectiveness and digestion kinetics. J. Dairy Sci., 85, 1988-1999.
- HEINRICHS, A. J., D. R. BUCKMASTER und B. P. LAMMERS (1999): Processing, mixing and particle size reduction of forages for dairy cattle. J. Anim. Sci., 77, 180-186.
- HEINRICHS, A. J. und P. KONONOFF (2002): Evaluation particle size of forages and TMRs using the New Penn State Particle Size Separator. Department of Dairy & Anim. Sci. 02-42, 1-9.
- HILGEFORT, G. (1993): Mischrationen total. Der Tierzüchter, 2, 26-27.

- HOFFMANN, M. (1983): Tierfütterung. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, DDR-Berlin.
- HOFFMANN, M. (1990): Tierfütterung, DT. Landwirtschaftsverlag Berlin, 2 Auflage.
- HOFFMANN, P. C., D. K. COMBS und M. D. CASLER (1998): Performance of lactating cows fed alfalfa silage or perennial ryegrass silage. . J. Dairy Sci., 81, 162-168.
- HOFFMANN, M (2003): Erhaltung der Gesundheit bei hohen Leistungen. Nutztierpraxis, 7, 16-21.
- HOFS, W. (2000): Mischwagen setzen sich immer mehr durch. Tagung Arbeitskreis Großtierpraxis, Haus Riswick, 68-70.
- HOPPER, A. P. und J. G. WELCH (1985): Change of functional specific gravity of forages in various solutions. J. Dairy Sci., 68, 1652-1658.
- HOWARD, W. T., J. L. ALBRIGHT, M. D. CUNNINGHAM, R. B. HARRINGTON und C. H. NOLLER (1968): Least-coast complete rations for dairy cows. J. Dairy Sci., 51, 595-600.
- HOWARD, K., N. TAKUSARI und N. YAMAGISHI (1986): Effect of TMR feeding frequency on eating behavior of lactating cows. J. Dairy Sci., 69, 692-694.
- HRISTOV, A. N., PRICE und W. J. SHAFII (2004): A meta-analysis examining the relationship among dietary factors, dry matter intake, and milk and milk protein yield in dairy cows. J. Dairy Sci., 87, 2184-2196.
- HUNTINGTON, J. A. und D. I. GIVENS (1995): The *in situ* Technique for studying the rumen degradation of feeds: a review of the procedure. Nutrition Abstracts and Reviews (Series B), 65 No. 2, 64-93.
- INGVARSTEN, K. L. und O. AAES (1995): Effect of rate of increase in concentrate allowances and separate feeding versus total mixed ration on feed intake, milk yield and health in early lactation. EAAP 46th Annual Meeting Prague, 1-4
- JENKINS, T. C., J. A. BERTRAND und W. C. BRIDGES (1998): Interactions of tallow and hay particle size on yield and composition of milk from lactating Holstein cows. J. Dairy Sci., 81, 1396-1402.
- JEROCH, H., W. DROCHNER und O. SIMON (1999): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- JILG, T., K. P. AIPLE und H. STEINGASS (1988): Fettstoffwechsel und Wirkung von Futterfetten beim Wiederkäuer. Übersicht Tierernährg., 16, 109-152.
- JOHNSON, L. M., J. H. HARRISON, D. DAVIDSON, W. C. MAHANNA und K. SHINNERS (2003): Corn silage management: Effects of hybrid, chop length and mechanical processing on digestion and energy content. J. Dairy Sci., 86, 208-231.

- JOHNSON, L. M., J. H. HARRISON, D. DAVIDSON, M. SWIFT, W. C. MAHANNA und K. SHINNERS (2002a): Corn silage management II: Effects of hybrid, maturity and mechanical processing on digestion and energy content. J. Dairy Sci., **85**, 2913-2927.
- JOHNSON, L. M., J. H. HARRISON, D. DAVIDSON, M. SWIFT, W. C. MAHANNA und K. SHINNERS (2002b): Corn silage management III: Effects of hybrid, maturity and processing on nitrogen metabolism and ruminal fermentation. J. Dairy Sci., **85**, 2928-2947.
- KALSCHEUER, K. F., B. B. TETER, L. S. PIPEROVA und R. A. ERDMAN (1997): Effects of dietary forage concentration and buffer addition on duodenal flow of trans-C_{18:1} fatty acids and milk fat production in dairy cows. J. Dairy Sci., **80**, 2104-2114.
- KASKE, M. und W. ENGELHARDT (1987): Der Einfluss der Dichte auf die selektive Retention großer Partikel im Pansen von Schafen. J. Anim Physiol. Nutr., **58**, 2- 9.
- KASKE, M., S. HATIBOGLU und W. ENGELHARDT (1992): The influence of density and size of particles on rumination and passage from the reticulo-rumen of sheep. Br. J. Nutr., **67**, 235-244.
- KASKE, M. (1997): Einflussfaktoren auf die Ingestapassage von Rindern und Schafen (1997): Übers. Tierernährg., **25**, 1-40.
- KASKE, M (2000): Vormagenmotorik und Ingestapassage. In: Physiologie der Haustiere. (Eds.: ENGELHARDT, W., G. BREVES). Enke Verlag Stuttgart, 333-338.
- KAUFMANN, W. und A. ORTH (1966): Untersuchungen über Einflüsse des Futters und der Pansenfermentation auf die Speichelsekretion. Tierphysiol., Tierernährg., Futtermittelkd., **25**, 157-168.
- KAUFMANN, W. und H. HAGEMEISTER (1973): Fütterungstechnik und Verdauungsablauf bei Milchkühen. Übers. Tierernährg., **1**, 193-221.
- KENNEDY, P. M. (1985): Effect of rumination on reduction of particle size of rumen digesta by cattle. Austr. J. Agric. Res., **36**, 819-828.
- KENNEDY, P. M. und P. T. DOYLE (1993): Particle-size reduction by ruminants. Effects of cell-wall composition and structure. In: Forage cell wall structure and digestibility. (Eds.: JUNG, H. G., D. R. BUXTON, R. D. HATFIELD, J. RALPH), Madison, Wisconsin, USA, 499-529.
- KENNEDY, P. M. (2006): Particle dynamics. In: Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. (Eds.: DIJKSTRA, J., J. M. FORBES, J. FRANCE). CAB International, Wallingford, UK, 123-156.

- KHAZAAL K., M. T. DENTINHO, J. M. RIBEIRO, E. R. ØRSKOV (1993): A comparison of gas production during incubation with rumen contents in vitro and nylon bag degradability as predictors of the apparent digestibility in vivo and the voluntary intake of hays. Anim. Prod., 57, 105-112.
- KNOWLTON, K. F., M. S. ALLEN und P. S. ERICKSON (1996): Lasalocid and particle size of corn for dairy cows in early lactation. II.: Effects on ruminal measurements and feeding behavior. J. Dairy Sci., 79, 565-574.
- KNOWLTON, K. F., B. P. GLENN und R. A. ERDMAN (1998): Performance, ruminal fermentation and site of starch digestion in early lactation cows fed corn grain harvested and processed differently. J. Dairy Sci., 81, 1972-1984.
- KONONOFF, P. J., A. F. MUSTAFA, D. A. CHRISTENSEN und J. J. MCKINNON (2000): Effect of barley silage particle length and effective fiber on yield composition of milk from dairy cows. Can. J. Anim. Sci., 80, 749-752.
- KONONOFF, P. J. und A. J. HEINRICHS (2003a): The effect of corn silage particle size and cottonseed hulls on cows in early lactation. J. Dairy Sci., 86, 2438-2451.
- KONONOFF, P. J., A. J. HEINRICHS und D. R. BUCKMASTER (2003b): Modification of the Penn state forage and total mixed ration particle separator and the effects of moisture content on the measurements. J. Dairy Sci., 86, 1858-1863.
- KONONOFF, P. J. und A. J. HEINRICHS (2003c): The effect of reducing alfalfa haylage particle size on cows in early lactation. J. Dairy Sci., 86, 1445-1457.
- KONONOFF, P. J., A. J. HEINRICHS und H. A. LEHMAN (2003d): The effect of corn silage particle size on eating behavior, chewing activities and rumen fermentation in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 86, 3343-3353.
- KONONOFF, P. J. und A. J. HEINRICHS (2003e): New developments in TMR particle size Measurement. Tri Stat. Dairy Nutr. Con., 75-85.
- KOVÁCS, P. L. (1996): Effects of amount of intake and time post feeding on processes of particle breakdown in the reticulorumen of steers fed a mixed diet. Dissertation, Universität Kiel.
- KRAJCARSKI-HUNT, H., J. C. PLAIZIER, J. P. WALTON, R. SPRATT und B. W. MCBRIDE (2002): Effect of subacute ruminal acidosis on in situ fiber digestion in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 85, 570-573.
- KRAMER, J. K. G., P.W. PARODI, R. G. JENSEN, M. M. MOSSOBA und R. O. ADLOF (1998): Rumenic acid: A proposed common name for the major conjugated linoleic acid isomer found in natural products. Lipids, 33, 835.
- KRAUSE, K. M., D. K. COMBS und K. A. BEAUCHEMIN (2002a): Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. I. Milk production and diet digestibility. J. Dairy Sci., 85, 1936-1946.

- KRAUSE, K. M., D. K. COMBS und K. A. BEAUCHEMIN (2002b): Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. II. Ruminal pH and chewing activity. J Dairy Sci., 85, 1947-1957.
- KRAUSE, K. M. und D. K. COMBS (2003): Effects of forage particle size, forage source and grain fermentability on performance and ruminal pH in midlactation cows. J. Dairy Sci., 86, 1382-1397.
- KRAUSE, K. M. und G. R. OETZEL (2006): Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds. A review. Anim. Feed Sci. Technol., 126, 215-236.
- KROLL, O., J. B. OWEN und C. J. WHITAKER (1987): Grouping and complete diet composition in relation to parity and potential yield in dairy cows. J. agric. Sci. Camb., 108, 281-291.
- KUEHN, C. S., J. G. LINN und H. G. JUNG (1997): Effect of corn silage chop length on intake, milk production and milk composition of lactating dairy cows. J. Dairy Sci. (Suppl. 2), 80, 219-226.
- KUNDRA, V., E. MARKALOS und F. URBAN (1995): Milk production of dairy cows and dry matter intake by different feeding technique. EAAP 46th Annual Meeting Prague, 33-37
- KUSMARTONO, A., A. SHIMADA, K. J. STAFFORD (1996): Intra-ruminal particle size reduction in deer fed fresh perennial ryegrass (*Lolium perenne*) or chicory (*Cichorium intybus*). J. Agric. Sci., 127, 525-531
- LAMMERS, B. P., D. R. BUCKMASTER und A. J. HEINRICHS (1996): A simple method for the analysis of particle sizes of forage and total mixed rations. J. Dairy Sci., 79, 922-928.
- LEE, S. S., J. K. HA und K. J. CHENG (2000): Relative contributions of bacteria, protozoa and fungi to *in vitro* digestion of orchard grass cell walls and their interaction. Appl. Environ. Microbiol., 66, 3807-3813.
- LE LIBOUX, S. und J. L. PEYRAUD (1998): Effect of forage particle size and intake level on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. Anim. Feed Sci. Technol., 73, 131-150.
- LE LIBOUX, S. und J. L. PEYRAUD (1999): Effect of forage particle size and feeding frequency on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. Anim. Feed Sci. Technol., 76, 297-319.
- LECHNER-DOLL, M. (1986): Selektive Retention von Futterpartikeln in verschiedenen Größen im Magen-Darmkanal von Kamelen im Vergleich mit Rindern und Schafen im Sudan. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- LEONARDI, C. und L. E. ARMENTANO (2003): Effect of quantity, quality and length of alfalfa hay on selective consumption by dairy cows. J. Dairy Sci., 86, 557-564.

- LEONARDI, C., K. J. SHINNERS und L. E. ARMENTANO (2005): Effect of different dietary geometric mean particle length and particle size distribution of oat silage on feeding behavior and productive performance of dairy cattle. J. Dairy Sci., 88, 698-710.
- LESSARD, J. R. und L. J. FISHER (1980): Alfalfa fed as formic-acid treated silage, dehydrated pellets or hay in mixed rations with corn silage for lactating cows. Can. J. Anim. Sci., 60, 945-951.
- LEURS, K., A. WAGNER und W. BÜSCHER (2004): Nacherwärmung von Maissilage. Einfluss der Häcksellänge. Landtechnik, 59, 100-101.
- LI, D. Y., S. S. LEE, N. J. CHOI, S. Y. LEE, H. G. SUNG, J. Y. KO, S. G. YUN und J. K. HA (2003): Effects of feeding system on rumen fermentation parameters and nutrient digestibility in Holstein steers. Asian-Aust. J. Anim. Sci., 16, 1482-1486.
- LITTELL, R. C., P. R. HENRY und C. B. AMMERMAN (1998): Statistical analysis of repeated measures data using SAS procedures. J. Anim. Sci., 76, 1216-1231.
- LOSAND, B. (1999): Getrennt oder gut gemischt. DLG-Mitteilung, 4, 16-19.
- LU, C. D. (1987): Implication of forage particle length on chewing activities and milk production in dairy goats. J. Dairy Sci., 70, 1411-1416.
- LUND, P., M. R. WEISBJERG und T. HVELPLUD (2007): Digestible NDF is selectively retained in the rumen of dairy cows compared to indigestible NDF. Anim. Feed Sci. Technol., 134, 1-17.
- LÜPPING, W., H. W. THOMSON und J. THOMSON (1999): TMR: Eine Ration für die gesamte Herde. Top Agrar, 6, 10-13.
- LYND, L. R., P. J. WEIMER, W. H. VAN ZYL, I. S. PRETORIUS (2002): Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology. Microbiol. Mol. Biol. Rev., 66, 506-577.
- MAEKAWA, M., K. A. BEAUCHEMIN und D. A. CHRISTENSEN (2002): Chewing activity, saliva production and ruminal pH of primiparous and multiparous lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 85, 1176-1182.
- MAMBRIMI, M. und J. L. PEYRAUD (1997): Retention time of feed particles and liquids in the stomach and intestines of dairy cows, direct measurement and calculation based on faecal collection. Reprod. Nutr. Dev., 37, 427-442.
- MARTIN, C., E. DEVILLARD und B. MICHALET-DOREAU (1999): Influence of sampling site on concentrations and carbohydrate-degrading enzyme activities of protozoa and bacteria in the rumen. J. Anim. Sci., 77, 979-987.
- MARTIN, C., I. FERNANDEZ, Y. ROCHETTE und B. MICHALET-DOREAU (2000): Is ruminal viscosity involved in the microbial fibrolytic activity decrease with high cereal diets? 25th Conference on rumen function, Chicago, IL., 24-32.

- MARTZ, F. A. und R. L. BELYEA (1986): Role of particle size and forage quality in digestion and passage by cattle and sheep. J. Dairy Sci., **69**, 1996-2008.
- MCALLISTER, T. A., H. D. BAE, G. A. JONES und K. J. CHENG (1994): Microbial attachment and feed digestion in the rumen. J. Anim. Sci., **72**, 3004-3018.
- MCBURNEY, M. I., P. J. VAN SOEST und L. E. CHASE (1983): Cat ion exchange capacity and buffering capacity of neutral-detergent fibers. J. Sci. Food Agric., **34**, 910-916.
- MCCULLOUGH, M. E. (1969): Optimum feeding of dairy animals. Univ. Georgia Presses, Athens.
- MCGILLIARD, M. L., J. M. SWISHER und R. E. JAMES (1983): Grouping lactating cows by nutritional requirements for feeding. J. Dairy Sci., **66**, 1084-1093.
- MEIJER, A. B. (1981): Systeme der Kraffutervorlage bei Milchvieh. Tierzüchter, **33**, 115-118.
- MELIN, M., H. WIKTORSSON, L. NORELL (2005): Analysis of feeding and drinking patterns of dairy cows in two cow traffic situations in automatic milking systems. J. Dairy Sci., **88**, 71-85.
- MENKE, K. H. und H. STEINGASS (1988): Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. Anim. Res. Dev., **28**, 7-55.
- MERTENS, D. R., T. L. STRAWN und R. S. CARDOZE (1984): Modeling ruminal particle size reduction: its relationship to particle size description. Proc. Techniques in particle size Analysis of feed and digesta in ruminants (Ed. P. M. KENNEDY), Edmonton, CA, 134-141.
- MERTENS, D. R. (1986): Effect of physical characteristics, forage particle size and density on forage utilization. Proc. Nutr. Symp., St. Louise, MO, 91.
- MERTENS, D. R. (1993): Kinetics of cell wall digestion and passage in ruminants. In: Forage cell wall structure and digestibility. (Eds. JUNG et al.), Madison, Wisconsin, USA, 538-566.
- MERTENS, D. R. (1997): Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. J. Dairy Sci., **80**, 1463-1481.
- MERTENS, D. R. (2000): Physically effective NDF and its use in dairy rations explored. Feedstuffs, **4**, 11-14
- MERTENS, D. R. (2007): Role of effective fiber in reducing milk fat depression in lactating cows fed Rumensin. J. Anim. Sci. (Suppl. 1), **85**, 562.
- METHU, J. N., E. OWEN, A. L. ABATE und J. C. TANNER (2001): Botanical and nutritional composition of maize stover, intakes and feed selection by dairy cattle. Livest. Prod. Sci., **71**, 87-97.

- MEYER, J. H., R. KROMANN und W. N. GARRETT (1965): Digestion: Influence of roughage preparation. In: Physiology of digestion in the ruminant. (Eds.: DOUGHERT, R. W. et al.), Butterworth Inc., London, 469-486.
- MEYER, H., K. BRONSCH, J. LEIBETSEDER, W. DROCHNER, J. KAMPHUES, K. MÄNNER, K. ROHR und D. SCHNEIDER (1993): Supplemente zu Vorlesungen und Übungen in der Tierernährung. 8. Auflage, Verlag M. & H. SCHAPER, Alsfeld-Hannover.
- MEYER, U., D. GÄDEKEN, M. SPOLDERS und G. FLACHOWSKY (2001): Strukturbewertungssysteme in der Milchviehfütterung. Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung, Verband der Landwirtschaftskammern (VLK), Bonn, 31-36.
- MEYER, U., D. GÄDEKEN, M. SPOLDERS und G. FLACHOWSKY (2002): A comparison of recommendation for the fiber supply of dairy cows fed total mixed rations (TMR). Proc. Soc. Nutr. Physiol., 11, 133.
- MICHALET-DOREAU, B., I. FERNANDEZ, C. PEYRON, L. MILLET und G. FONTY (2001): Fibrolytic activities and cellulolytic bacterial community structure in the solid and liquid phases of the rumen contents. Reprod. Nutr. Dev., 41, 187-194.
- MINSON, D. J. (1968): The voluntary intake and digestibility in sheep of chopped and pelleted *Digitaria decumbens* (pangola grass) following a late application of fertilizer nitrogen. Br. J. Nutr., 21, 587-597.
- MIRON, J., E. YOSET, D. BEN-GHEDALIA, L. E. CHASE, D. E. BAUMAN und R. SOLOMON (2002): Digestibility by dairy cows of monosaccharide constituents in total mixed ration containing citrus pulp. J. Dairy Sci., 85, 89-94.
- MOON, Y. H., S. C. LEE und S. S. LEE (2004): Effects of neutral detergent fiber concentration and particle size of the diet on chewing activities of dairy cows. Asian-Aust. J. Anim. Sci., 17, 1535-1540.
- MOONEY, C. S. und M. S. ALLEN (1997): Physical effectiveness of the neutral detergent fiber whole linted cottonseed relative to that of alfalfa silage at two lengths of cut. J. Dairy Sci., 80, 2052-2061.
- MOORE, J. A., K. R. POND, M. N. POORE und T. G. GOODWIN (1992): Influence of model and marker on digesta kinetic estimates for sheep. J. Anim. Sci., 70, 3528-3540.
- MOORE, J. H. und W. W. CHRISTIE (1979): Lipid metabolism in the mammary gland of ruminant animals. In: Progress in Lipid Research. (Ed. HOLMAN R. T.), 17, 347-395.
- MOSELEY, J. E., C. E. COPPOCK und G. B. LAKE (1976): Abrupt changes in forage-concentrates ratios of complete feeds fed ad libitum to dairy cows. J. Dairy Sci., 59, 1471-1483.

- MOURINO, F., R. AKKARAWONGOSA und P. J. WEIMER (2001): Initial pH as a determinant of cellulose digestion rate by mixed ruminal microorganisms in vitro. J. Dairy Sci., **84**, 848-859.
- MURDOCH, F. R. und A. S. HODGSON (1977): Cubed complete rations for lactating dairy cows. J. Dairy Sci., **60**, 1921-1931.
- MURPHY, M. R. und P. M. KENNEDY (1993): Particle dynamics. In: Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. (Eds.: FORBES, J. M. und J. FRANCE). CAB International, Oxon, UK, 87-106.
- NAUMANN, K. und R. BASLER (1997): VDLUFA-Methodenbuch (1976), Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Ergänzungslieferungen von 1983, 1988, 1993, 1997. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Germany.
- NRC, NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2001): Nutrient requirements of dairy cattle. 7th rev. Ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- NEEL STEETER, J. P., E. C. PRIGGE und E. C. TOWNSEND (1995): Influence of moisture content of forage on ruminal functional specific gravity and passage of digesta. J. Anim. Sci., **73**, 3094 – 3101.
- NELSON, W. F. und L. D. SATTER (1992): Impact of alfalfa maturity and preservation of alfalfa on production by cows in early lactation. J. Dairy Sci., **75**, 1562-1570.
- NIJE, M. und J. D. REED (1995): Potential crop residues and agricultural by-products for feeding sheep in a Gambian village. Anim Feed Sci. Technol, **52**, 313-323.
- NOCEK, J. E., R. L. STEELE und D. G. BRAUND (1986): Performance of dairy cows fed forage and grain separately versus a total mixed ration. J. Dairy Sci., **69**, 2140-2147.
- NOCK, J. E. R., L. STEELE und D. G. BRAUND (1985): Effect of mixed ration nutrient density on milk of cows transferred from high production group. J. Dairy Sci., **68**, 133-139.
- NØRGAARD, P. (1989): The influence of physical form of ration on chewing activity and rumen motility in lactating cows. Acta Agri. Scand., **39**, 187-202.
- OBA, M. und M. S. ALLEN (2000): Effects of brown midrib 3 mutation in corn silage on productivity of dairy cows fed two concentrations of dietary neutral detergent fiber: 2. Chewing activity. J. Dairy Sci., **83**, 1342-1349.
- OKINE, E. K. und G. W. MATHISON (1991): Effects of feed intake on particle distribution, passage of digesta and extent of digestion in the gastrointestinal tract of cattle. J. Anim. Sci., **69**, 3435-3445.
- ONETTI, S. G.; R. D. SHAVER, S. J. BERTICS und R. R. GRUMMER (2003): Influence of corn silage particle length on the performance of lactating dairy cows fed supplemental tallow. J. Dairy Sci., **86**, 2949-2957.

- ÖLSCHLÄGER, V., I. WEBER, W. VAHJEN, M. TAJAJ, O. SIMON und W. DROCHNER (2006): Einfluss der Heupartikelgröße und Kraftfuttermenge auf die hauptcellulolytischen Bakterien im Pansen von Milchkühen. Proc. Soc. Nutr. Physiol., 15, 147.
- ÖLSCHLÄGER, V. (2007): Molekularbiologische und enzymatische Untersuchungen zum Einfluss von Partikellänge und Konzentratanteil auf Parameter der fibrolytischen Pansenverdauung. Dissertation, Universität Hohenheim.
- ORTH, A. und W. KAUFMANN (1966): Über den Einfluss der Struktur des Futters auf die Verdauungsvorgänge im Pansen. Z. Tierphysiol., Tierernährg. U. Futtermittelkde., 25, 144-156.
- OWEN, J. B. (1979): Complete diets for cattle and sheep. Farming Press Ltd., London. 160- 168.
- OWEN, F. (1986): Complete Rations- Should you feed them? Feedstuffs, 5, 16-19.
- OWEN, F. N., D. S. SECRIST, W. J. HILL, D. R. GILL (1998): Acidosis in cattle: A review. J. Anim. Sci., 76, 275-298.
- PANDITHARANE, S., V. G. ALLEN, J. P. FONTENOT und M. C. M. JAYASURYA (1988): Effect of stage of growth and chopping length on digestibility and palatability of Guinea-A grass silage. J. Anim. Sci., 66, 1005-1009.
- PETIT, H. V., G. F. TREMBLAY, P. SAVOIE, D. TREMBLAY und J. M. WAUTHY (1993): Milk yield, intake und blood traits of lactating cows fed grass silage conserved under different harvesting methods. J. Dairy Sci., 76: 1365-1375.
- PFEIL, K. (2003): Rationen für 45kg Milch – bestes Grundfutter allein reicht nicht. Konzentratfutterkonzepte für hochleistender Milchkühe. Rinderpr., 6, 23-26.
- PHIPPS, R. H., J. A. BINES, R. J. FULFORD und R. F. WELLER (1984): Complete diets for dairy cows: a comparison between complete diets and separate ingredients. J. agric. Sci. Camb., 103, 171-180.
- PIATKOWSKI, B., J. VOIGT, G. BOLDAU und S. NAGEL (1974): Die Produktion flüchtiger Fettsäuren und die Verweildauer des Futters im Pansen bei Verabreichung von gehäckseltem und pelletiertem Grobfutter in versuchen an Milchkühen. Arch. Tierernährg., 24, 375-383.
- PIATKOWSKI, B. (1975): Nährstoffverwertung beim Wiederkäuer. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- PIATKOWSKI, B., S. NAGEL und E. BERGNER (1977): Das Wiederkauverhalten von Kühen bei unterschiedlicher Trockensubstanzaufnahme und verschiedener physikalischer Form von Grasheu. Arch. Tierernährg., 27, 563-569.
- PIATKOWSKI, B., H. GÜRTLER und J. VOIGT (1990): Wiederkäuer-Ernährung. Gustav Fischer Verlag, Jena.

- PIRKELMANN, H. (1994a): Moderne Fütterungssysteme im Milchviehstall. Mais, 22, 130-133.
- PIRKELMANN, H. und M. WAGNER (1994b): TMR geht nur mit Gruppenfütterung. Top Agrar, 6, R22-R27.
- PITT, R. E., J. S. VAN KESSEL, D. G. FOX, A. N. PELL, M. C. BARRY und P. J. VAN SOEST (1996): Prediction of ruminal volatile fatty acids and pH within the net carbohydrate and protein system. J. Anim. Sci., 74, 226-244.
- PITT, R. E. und A. N. PELL (1997): Modeling ruminal pH fluctuations. Interactions between meal frequency and digestion rate. J. Dairy Sci., 80, 2429-2441.
- PLAIZIER, J. C. (2004): Replacing chopped alfalfa hay with alfalfa silage in barley grain and alfalfa-based total mixed rations for lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 87, 2495-2505.
- POND, K. R., TOLLEY, E. A., ELLIS, W. C. und MATIS, J. H. (1984): A method for describing the weight distribution of particles from sieved forage. In: Techniques in particle size analysis of feed and digesta in ruminants, (Ed.: KENNEDY, P.M.). Canad. Soc. Anim. Sci., occ. publ., 1, 123-133.
- POPPI, D. P., B. W. NORTON, D. J. MINSON und R. E. HENDRICKSEN (1980): The validity of the critical size theory for particles leaving the rumen. J. agric. Sci., 94, 275-280.
- POPPI, J. C., R. E. HENDRICKSEN und D. J. MINSON (1985): The relative resistance to escape of leaf and stem particles from the rumen of cattle. J. Agric. Sci., 105, 9-14.
- POPPI, D. P., W. C. ELLIS, J. H. MATIS und C. E. LASCANO (2001): Marker concentration patterns of labeled leaf and stem particles in the rumen of cattle grazing Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) analyzed by reference to a raft model. Br. J. Nutr., 85, 553-563.
- POTTHAST, V. (1993): Brauchen wir total mixed ration? Tierzüchter, 2, 28-31.
- PREISSINGER, W. (1996): Fütterung der Hochleistungskuh unter aktuellen Gesichtspunkten einer wiederkäuergerechten Strukturierung des Grundfutters und einer bedarfsgerechten Energiezufuhr. Dissertation, Universität München.
- PREISSINGER, W., F. J. SCHWARZ und M. KIRCHGESSNER (1997a): Zum Einfluss der Häcksellänge von Grassilage auf Futteraufnahme, Milchleistung und Milchezusammensetzung von Milchkühen. Arch. Anim. Nutr., 51, 327-339.
- PREISSINGER, W., F. J. SCHWARZ und M. KIRCHGESSNER (1997b): Zum Einfluss der Häcksellänge von Grassilage auf Futteraufnahme und Leistung von Milchkühen. Das Wirtschaftseigene Futter, 43, 65-82.
- PRINZ, J. F. und P. W. LUCAS (1997): An optimization model for mastication and swallowing in mammals. Proc. R. Soc. Lond., 264, 1715-1721.

- QIU, X, M. L. EASTRIDGE und Z. WANG (2003): Effects of corn silage hybrid and dietary concentration of forage NDF on digestibility and performance by dairy cows. J. Dairy Sci., 86, 3667-3674.
- REID, C. S. W. (1984): The progress of solid feed residues through the rumino-reticulum: the ins and outs of particles. In: Ruminant physiology concepts and consequences. (Eds.: BAKER, S. K., J. M GAWTHORNE, J. B MACKINTOSH and D. B. PURSER). Univ. of Western Australia, Perth, 79-84.
- REIS, R. B., F. SAN EMETERIO, D. K. COMBS, L. D. SATTER und H. N. COSTA (2001): Effects of corn particle size and source on performance of lactating cows fed direct cut grass legume forage. J. Dairy Sci., 84, 429-441.
- ROBINSON, P. H., S. TAMMINGA, und A. M. VAN VUUREN (1987): Influence of declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on rumen ingesta quantity, composition and kinetics of ingesta turnover in dairy cows. Livest. Prod. Sci., 17, 37-62.
- RODE, L. M, und L. D. SATTER (1988): Effect of amount and length of alfalfa hay in diets containing barley or corn on site of digestion and rumen microbial protein synthesis in dairy cows. Can. J. Anim. Sci., 68, 445-454.
- ROHR, K., P. LEBZIEN, H. SCHAFFT und H. HONIG (1986): Zum Einfluss einer intensiven Nachzerkleinerung von Maissilage auf die Stoffumsetzungen in den Vormägen der Milchkühe. Z. Tierphys., Tierernähr. U. Futtermittelkde., 55, 121-128.
- ROSENBERGER, G. (1978): Krankheiten des Rindes. 2. Auflage, Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg.
- RUSSELL, J. B. und J. L. RYCHLIK (2001): Factors that alter rumen microbial ecology. Science, 292, 1119-1122.
- RUSTOMO, B., O. ALZAHAL, N. E. ODONGO, T. F. DUFFIELD und B. W. MCBRIDE (2006): Effects of rumen acid load from feed and forage particle size on ruminal pH and dry matter intake in the lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 89, 4758-4768.
- RUTTER, S. M., R. A. CHAMPION und P. D. PENNING (1997): An automatic system to record foraging behavior in free-ranging ruminants. Appl. Anim. Behav. Sci., 54, 185-195.
- SANTINI, F. J., A. R. HARDIE, N. A. JORGENSEN und M. F. FINNER (1983): Proposed use of adjusted intake based on forage particle length for calculation of roughage indexes. J. Dairy Sci., 66, 811-820.
- SAS, 2001. SAS User's guide. Statistics, Release 8.2. SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA
- SAUVANT, D., J. P. DULPHY und B. MICHALET-DOREAU (1990): Le concept d'indice de fibrosité des aliments des ruminants. INRA, Prod. Anim., 3, 309-318.

- SAUVANT, D., F. MESCHY und D. MERTENS (1999): Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. INRA Prod. Anim., 12, 49-60.
- SAVOIE, P., D. TREMBLAY, G. F. TREMBLAY, J. M. WAUTHY, P. M. FLIPOT und R. THÉRIAULT (1992): Effect of length of cut on quality of stack silage and milk production. Can. J. Anim. Sci., 72, 253-263.
- SCHÄFER, L. (2003): Ruminant Analysis Program, RAP, Version 1003.
- SCHROEDER, M. M., H. W. SOITA, D. A. CHRISTENSEN, G. R. KHORASANI und J. J. KENNELLY (2003): Effect of Total Mixed Ration particle size on rumen pH, chewing activity and performance in dairy cows. Asian-Aust. J. Anim. Sci., 16, 12, 1755-1762.
- SCHWAB, E. C., R. D. SHAVER, K. J. SHINNERS, J. G. LAUER, J. G. COORS (2002): Processing and chop length effects in brown-midrib corn silage on intake, digestion and milk production by dairy cows. J. Dairy Sci., 85, 613-623.
- SCHWARZ, F. J., S. KRÄCKL und M. KIRCHGESSNER (1990): Futterwert von unterschiedlich zerkleinerten Gersten-Ganzpflanzensilage. Bayr. Landw. Jahrbuch, 67, 569-580.
- SCHWARZ, F. J. (2000): Fütterung hochleistender Milchkühe (Energie- und Proteinversorgung, Wiederkäuergerechtigkeit). 27. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Gumpenstein, A, 19-25.
- SHAVER, R. D., A. J. NYTES, L. D. SATTER und N. A. JORGENSEN (1986): Influence of amount of feed intake and forage physical form on digestion and passage of prebloom alfalfa hay in dairy cows. J. Dairy Sci., 69, 1545-1559.
- SHAVER, R. D. (1990): Forage particle length in dairy rations. Proc. Dairy Feedinf. Syst. Symp., Harrisburg, PA, 58-64.
- SICILIANO-JONES, J. und M. R. MURPHY (1991): Specific Gravity of various feedstuffs as affected by particle size and in vitro fermentation. J. Dairy Sci., 74, 896-901
- SILVEIRA, C., M. OBA, W.Z. YANG und K.A. BEAUCHEMIN (2007): Selection of barley grain affects ruminal fermentation, starch digestibility and productivity of lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 90, 2860-2869.
- SIROHI, S. K., M. RAMAN und T. K. WALLI (2001): Development and evaluation of protected fat in wheat straw based total mixed ration. Asian-Aust. J. Anim. Sci., 14, 1405-1408.
- SMITH, N. E., G. R. UFFORD, C. E. COPPOCK und W. G. MERRILL (1978): one group versus two group system for lactating cows fed complete rations. J. Dairy Sci., 61, 1138-1145.

- SOITA, H. W., D. A. CHRISTENSEN, J. J. MCKINNON (2000): Influence of particle size on the effectiveness of the fiber in barley silage. J. Dairy Sci., **83**, 2295-2300.
- SOITA, H. W., D. A. CHRISTENSEN, J. J. MCKINNON und A. F. MUSTAFA (2002): Effects of barley silage of different theoretical cut length on digestion kinetics in ruminants. Can. J. Anim. Sci., **82**, 207-213.
- SOITA, H. W., M. FEHR, D. A. CHRISTENSEN, T. MUTSVANGWA (2005): Effects of corn silage particle length and forage: concentrate ratio on milk fatty acid composition in dairy cows fed supplemental flaxseed. J. Dairy Sci., **88**, 2813-2819.
- SPANN, B. (1997): Futtermischungen im Milchviehstall. Beraterfachtagung, Grub, 12-15.
- SPIEKERS, H., T. ENGELHARD und M. RODEHUTSCORD (2003): Strukturbewertung bei der Milchkuh. 9. Alpenländisches Expertenforum, BAL Gumpenstein, 1-7.
- STAMM, A. J. (1964): Wood and cellulose science. Ronald Press, New York, 122-125
- STEINGASS, H. und Q. ZEBELI (2008) Strukturbewertung von Rationen für Milchkühe. 35. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Gumpenstein, A, 19-25.
- STEINWIDDER, A. (2002): Einfluss der Futterkonservierung auf die Strukturwirksamkeit von Grundfutter. 8. Alpenländisches Expertenforum, BAL Gumpenstein, 7-10.
- STEINWIDDER, A. und E. ZEILER (2003): Einfluss von Partikellänge und Trockenmassegehalt von Grassilage bei unterschiedlichem Krafftutterniveau auf Pansenparameter, Verdaulichkeit und Futteraufnahme von Rindern. 30. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 25-45.
- STENSING, T. und P. H. ROBINSON (1997): Digestion and passage kinetics of forage fiber in dairy cows as affected by fiber free concentrate in the diet. J. Dairy Sci., **80**, 1339-1352.
- STOCKDALE, C. R. und G. W. BEAVIS (1994): Nutritional evaluation of whole plant maize ensiled at three chop lengths and fed to lactating dairy cattle. Aust. J. Exp., **34**, 709-716.
- STONE, W. C. (2004): Nutritional approaches to minimize subacute ruminal acidosis and laminitis in dairy cattle. J. Dairy Sci. (Suppl.), **87**, 12-26.
- ST-PIERRE, N. R. (2008): Examples of experimental designs to study production responses. J. Anim. Sci. (Suppl. 2), **86**, 185.
- STRYER, L. (1999): Biochemie. 4. Auflage, Spektrum Verlag Berlin.

- SUDWEEKS, E. M., M. E. MCCULLOUGH, L. R. SISK und S. E. LAW (1975): Effects of concentrate type and level and forage type on chewing time on steers. J. Anim. Sci., 41, 219-223.
- SUDWEEKS, E. M., M. J. ANDERSON und R. C. LAMB (1978): The relationship of roughage characteristics, chewing time and butterfat percentage in dairy cows. J. Dairy Sci. (Suppl.) 61, 190.
- SUDWEEKS, E. M., L. O. ELY, D. R. MERTENS und L. R. SISK (1981): Assessing minimum amounts and form of roughages in ruminant diets: roughage value index system. J. Anim. Sci., 53, 1406-1411.
- SUSENBETH, A., R. MAYER, B. KOEHLER und O. NEUMANN (1998): Energy requirement for eating in cattle. J. Anim. Sci., 76, 2701-2705
- SUSENBETH, A., T. DICKEL, K. H. SÜDEKUM, W. DROCHNER und H. STEINGASS (2004): Energy requirements of cattle for standing and for ingestion, estimated by a ruminal emptying technique. J. Anim. Sci., 82, 129-138.
- SUSMEL, P., M. SPANGHERO, B. STEFANSON, C. R. MILLS und C. CARGNELUTTI (1991): Effect of NDF concentration and physical form of fescue hay on rumen degradability intake and rumen turn over of cows. Anim. Prod., 53, 305-313.
- SUTHERLAND, T. M. (1988): Particle separation in the forestomachs of sheep. In: Aspects of digestive physiology in ruminants. (Eds.: DOBSON, A. and M. J. DOBSON). Cornell University Press, Ithaca, NY, 43-73.
- TAF AJ, M. (1996): Untersuchungen zu einigen fütterungstechnischen Maßnahmen zur Verbesserung der Ausnutzung faserreichen Grundfutters beim Wiederkäuer. Dissertation, Universität Hohenheim.
- TAF AJ, M., H. STEINGASS, A. SUSENBETH, G. U. LANG und W. DROCHNER (1999): Einfluss der Partikellänge von Heu auf Verdauungsvorgänge und Futteraufnahme bei Wiederkäuern bei Variation von Kraftfutter- und Fütterungsniveau. Arch. Anim. Nutr., 52, 167-184.
- TAF AJ, M., B. JUNCK, A. MAULBETSCH, H. STEINGASS und W. DROCHNER (2001a): Research Note: A method for studying of local differences in ruminal fermentation in dairy cattle. Arch. Anim. Nutr., 54, 341-347
- TAF AJ, M., H. STEINGASS und W. DROCHNER (2001b): Influence of hay particle size at different concentrate and feeding levels on digestive processes and feed intake in ruminants. 2. Passage, digestibility and feed intake. Arch. Anim. Nutr., 54, 243-259.
- TAF AJ, M., B. JUNCK, A. MAULBETSCH, H. STEINGASS, H. P. PIEPHO und W. DROCHNER (2004): Digesta characteristics of dorsal, middle and ventral rumen of cows fed with different hay qualities and concentrate levels. Arch. Anim. Nutr., 58, 325-342.

- TAJAJ, M., V. KOLANECI, B. JUNCK, A. MAULBETSCH, H. STEINGASS, und W. DROCHNER (2005): Influence of fiber content and concentrate level on chewing activity, ruminal digestion, digesta passage and nutrient digestibility in dairy cows. Asian Austr. J. Anim. Sci., 18, 1116-1124.
- TAJAJ, M., Q. ZEBELI, C. BAES, H. STEINGASS und W. DROCHNER (2007): A meta-analysis examining effects of particle size of total mixed rations on intake, rumen digestion and milk production in high yielding dairy cows in early lactation. Anim. Feed Sci. Technol., 138, 137-161.
- TEIMOURI YANSARI, A., R. VALIZADEH, A. NASERIAN, D. A. CHRISTENSEN (2004): Effects of alfalfa particle size and specific gravity on chewing activity, digestibility and performance of Holstein dairy cows. J. Dairy Sci., 87, 3912-3924.
- TELLER, E., M. VANBELLE, P. KAMATALI, G. COLLINGNON, B. PAGE und B. MATATU (1990): Effects of chewing behavior and ruminal digestion processes on voluntary intake of grass silages by lactating dairy cows. J. Anim. Sci., 68, 3897-3904.
- TERRY, R. A., J. M. A. TILLEY, und G.E. OUTEN (1969): Effect of pH on cellulose digestion under in vitro conditions. J. Sci. Fd. Agric., 20, 317-322.
- TOLKAMP, B. J., N. C. FRIGGENS, G. C. EMMANS, I. KYRIAZAKIS und J. D. OLDHAM (2002): Meal patterns of dairy cows consuming mixed foods with a high or a low ratio of concentrate to grass silage. J. Anim. Sci., 74, 369-382.
- UDEN, P., P. E. COLUCCI und P. J. VAN SOEST (1980): Investigation of chromium, cerium and cobalt as markers in digesta rate of passage studies. J. Sci. Food Agric., 31, 625-632.
- UEDA, K., T. ICHINOHE, M. OKUBO, und Y. ASAHIDA (2001): A method for estimating the rate size reduction, passage and fermentation of ruminal particles of sheep. J. Anim. Sci., 72, 306-314.
- ULBRICH, M., M. HOFFMAN und W. DROCHNER (2004): Fütterung und Tiergesundheit. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- ULYATT, M. J., D. W. DELLOW, A. JOHN, C. S. W. REID und G. C. WAGHORN (1986): Contribution of chewing during eating and rumination to the clearance of digesta from the ruminoreticulum. In: Control of digestion and metabolism in Ruminants. (Eds.: MILLIGAN L. P., W. L. GROVUM und A. DOBSON). Proc. 6th Internat. Symp. Ruminant Physiol., 498-515.
- VAN SOEST, P. J., J. B. ROBERTSON, B. A. LEWIS (1991): Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. J. Dairy Sci., 74, 3583-3597.
- VAN SOEST, P. J. (1994): Nutritional ecology of the ruminant. 2nd Edition. Cornell University Press, Ithaca, N. Y.

- VOIGT, J., B. PIATKOWSKI und R. KRAWIELITZKI (1978): Die Wirkung der Reihenfolge von Grobfutter und Konzentraten in der Kohlenhydratverdauung und bakterielle Proteinsynthese im Pansen der Milchkuh. Arch. Tierernährg., 28, 67-76.
- WAAGE, A. S. und J. A. SHELFORD (1986): Relationship between forage particle length and chewing behavior in steers. In: Comparative aspects of physiology of digestion in ruminants (Eds.: BERGMAN E. N., A. DOBSON und J. M. ELLIOT). Cornell University, Ithaca, N.Y., 8-20.
- WAGNER, A., K. LEURS und W. BÜSCHER (2004): Einfluss der Häcksellänge auf Verdichtbarkeit, Silierung und Nacherwärmung von Silomais. Agrartech. Forschung, 10, 54-61.
- WALSTRA, P., R. JENNESS und H. T. BADINGS (1984): Dairy chemistry and physics. New York, Wiley.
- WATTIAUX, M. A., D. R. MERTENS und L. D. SATTER (1992): Kinetics of hydration and effect of liquid uptake on specific gravity of small hay and silage particles. J. Anim. Sci., 70, 3597 – 3606.
- WEIDNER, S. J. und R. J. GRANT (1994): Altered ruminal mat consistency by high percentages of soybean hulls to lactating cows. J. Dairy Sci., 77, 522-532.
- WEIMER, P. J., D. M. STEVENSON, D. R. MERTENS und E. E. THOMAS (2007): Effect of monensin feeding and withdrawal on ruminal populations of individual bacterial species in cows fed high-starch diets. J. Dairy Sci. (Suppl.), 90, 175.
- WEISSBACH, F. und H. HONIG (1992): Ein neuer Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Silagen auf der Basis der chemischen Analyse. VDLUFA Schriftenreihe 35, 489-494.
- WEISS, W. P. und W. L. SHOCKEY (1991): Value of orchardgrass and alfalfa silage fed with varying amounts of concentrates to dairy cows. . J. Dairy Sci., 74, 1933-1943.
- WELCH, J. G. (1967): Appetite control in sheep by indigestible fibers. J. Anim. Sci., 54, 885-888.
- WELCH, J. G. und A. M. SMITH (1971a): Physical stimulation of rumination activity. J. Anim. Sci., 33, 1118-1123.
- WELCH, J. G. und A. M. SMITH (1971b): Milk fat percentage and ruminating activity. J. Dairy Sci. (Suppl.), 54, 804.
- WELCH, J. G. (1982): Rumination, particle size and passage from the rumen. J. Anim. Sci., 54, 885-894.
- WELCH, J. G. (1986): Physical parameters of fiber affecting passage from the rumen. J. Dairy Sci., 69, 2750-2754.

- WESTON, R. H. und J. P. HOGAN (1967): The digestion of chopped and ground roughages by sheep. I. The movement of digesta through the stomach. Austr. J. Agric. Res., 39, 789-801.
- WESTON, R. H. (1983): The effect of cold exposure on various aspects of digestion and metabolism in roughage fed sheep. Proc. Nutr. Soc. Aust., 8, 181-184.
- WESTON, R. H. und P. M. KENNEDY (1984): Various aspects of reticulorumen digestive function in relation to diet and digesta particle size. In: Techniques in particle size analysis of feed and digesta in ruminants, (Ed. P. M. KENNEDY), Canad. Soc. Animal Sci., occ. publ. no., 1, 1-17
- WESTON, R. H., J. R. LINDSAY, D. W. PETER und D. J. BUSCALL (1989): Factors limiting the intake of feed by sheep. XIV. Comparison of voluntary feed consumption and various transactions in the alimentary tract between lambs and sheep fed roughage diets. Aust. J. Agric. Res., 40, 625-642.
- WIECKERT, D. A. (1993): Komplett gemischte Rationen oder total mixed ration (TMR), wie die Amerikaner sagen. Veredlungsprodukt., 3, 10-11.
- WIECKERT, D. A. (1994): Mehr Milch pro Kuh durch TMR. Veredlungsprodukt., 1, 1-2.
- WIESER, M. F. (1972): Untersuchungen an ausgewachsenen Schafen über das Wiederkauverhalten, die Bildung flüchtiger Fettsäuren im Pansen und die Energieverwertung bei Verfütterung von Rationen unterschiedlicher Struktur. Dissertation, ETH Zürich.
- WILFONG, J. G. (1966): Specific gravity of wood substance. J. For. Prod., 16, 55-68
- WILKINS, R. J., C. R. LONSDALE, R. M. TETLOW und T. J. FORREST (1972): The voluntary intake and digestibility by cattle and sheep of dried grass wafers containing particles of different size. Anim. Prod., 14, 177-188.
- WILSON, R. H., D. E. AKIN, M. N. MCLEOD und D. J. MINSON (1989): Particle size reduction of the leaves of a tropical and temperate grass by cattle. II. Relation of anatomical structure to the process of leaf breakdown through chewing and digestion. Grass Forage Sci., 44, 55-63.
- WILSON, R. H. (1993): Organization of forage plant tissues. In: Forage cell wall structure and digestibility (Eds.: JUNG, H. G., D. R. BUXTON, R. D. HATFIELD, J. RALPH). Madison Wisconsin, USA, 1-31.
- WILSON, J. R. und P. M. KENNEDY (1996): Plant and animal constraints to voluntary feed intake associated with fiber characteristics and particle breakdown and passage in ruminants. Aust. J. Agric. Res., 47, 199-225.
- WOODFORD, J. A., N. A. JORGENSEN und G. P. BARRINGTON (1986): Impact of dietary fiber and physical form on performance of lactating cows. J. Dairy Sci., 69, 1035-1047.

- WOODFORD, S. T. und M. R. MURPHY (1988): Effect of forage physical form on chewing activity, dry matter intake and rumen function of dairy cows in early lactation. J. Dairy Sci., 71, 674-686.
- YANG, W. Z., K. A. BEAUCHEMIN und L. A. RODE (2001a): Effects of grain processing, forage to concentrate ration, and forage particle size on rumen pH and digestion by dairy cattle. J. Dairy Sci., 84, 2203-2216.
- YANG, W. Z., K. A. BEAUCHEMIN und L. A. RODE (2001b): Barley processing, forage: concentrate and forage length effects on chewing and digesta passage in lactating cows. J. Dairy Sci., 84, 2709-2720.
- YANG, W. Z., K. A. BEAUCHEMIN und L. A. RODE (2002): Effects of particle size of alfalfa-based dairy cow diets on site and extent of digestion. J. Dairy Sci., 85, 1958-1968.
- YANG, W. Z. und K. A. BEAUCHEMIN (2005): Effects of physically effective fiber on digestion and milk production by dairy cows fed diets based on corn silage. J. Dairy Sci., 88, 1090-1098.
- YANG, W. Z. und K. A. BEAUCHEMIN (2006a): Physically effective fiber: Method of determination and effects on chewing, ruminal acidosis, and digestion by dairy cows. J. Dairy Sci., 89, 2618-2633.
- YANG, W. Z. und K. A. BEAUCHEMIN (2006b): Increasing the physically effective fiber content of dairy cows diets may lower efficiency of feed use. J. Dairy Sci., 89, 2694-2704.
- YANG, W. Z. und K. A. BEAUCHEMIN (2006c): 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. und K. A. BEAUCHEMIN (2007): Altering physically effective fiber intake through forage proportion and particle length: chewing and ruminal pH. J. Dairy Sci., 90, 2826-2838.
- ZEBELI, Q., M. TAJAJ, B. JUNCK und W. DROCHNER (2005b): Effect of hay particle size and concentrate level on ruminal mat characteristics in dairy cows. Proc. Soc. Nutr. Physiol., 14, 120.
- ZEBELI, Q., M. TAJAJ, B. METZLER, H. STEINGASS und W. DROCHNER (2006a): Neue Aspekte zum Einfluss der Qualität der Faserschicht auf die Digestakinetik im Pansen der Hochleistungsmilchkuh. Übers. Tierernährg., 34, 165-196.
- ZEBELI, Q., M. TAJAJ, H. STEINGASS, B. METZLER und W. DROCHNER (2006b): Effects of physically effective fiber on digestive processes and milk fat content in early lactating dairy cows fed total mixed rations. J. Dairy Sci., 89, 651-668.

ZEBELI, Q. (2006c): Einfluss der Partikellänge von Totalen Mischrationen (TMR) auf die Digestaschichtung und Verdauungsvorgänge im Pansen bei Milchkühen. Dissertation, Universität Hohenheim.

ZEBELI, Q., J. DIJKSTRA, M. TAJAJ, H. STEINGASS, B. N. AMETAJ und W. DROCHNER (2008): Modeling the adequacy of dietary fiber in dairy cows based on the responses of ruminal pH and milk fat production to composition of the diet. J. Dairy Sci., 91, 2388-2398.

10. Anhang

10.1 Verzeichnis der Abkürzungen

ADF	Saure-Detergenzfaser, acid detergent fiber
ADL	Saures-Detergenzlignin, acid detergent lignin
bidest.	bidestilliert
Co	Cobald
CO ₂	Kohlendioxid
°C	Grad Celsius
d	Tag
dest.	destilliert
DG	Versuchsdurchgang
eNDF	effektive NDF
f	Strukturfaktor
Fa.	Firma
FECM	Fett-, Eiweiß- korrigierte Milchleistung
FFS	flüchtige Fettsäuren
FM	Frischmasse
FMRT	mittlere Verweilzeit post ruminal
FRL	freie ruminale Flüssigkeit
FSG	funktionelle spezifische Dichte, Funktional Specific Gravity
GF	Grundfutter
GLM	General Linear Modell
GS	Grassilage
h	Stunde
HFT	Hohenheimer Futterwerttest
IE	Internationale Einheit
k. a.	keine Angabe
KCl	Kaliumchlorid
KF	Krafftutter
k _f	fraktionelle post ruminalen Passagerate
kg	Kilogramm
k _s	fraktionelle Passagerate aus dem Pansen
LD	Laktationstag

LiCo-EDTA	Lithium-Cobald-Ethylendiamintetraacetat
LM	Lebendmasse
LM ^{0,75}	metabolische Lebendmasse
Lsmeans	Least Square Mean
min	Minuten
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
MPL	mittlere Partikellänge
MS	Maissilage
MSC	mechanoreceptor stimulating capacity
n	Anzahl der Beobachtungen
NDF	Neutrale-Detergenzfaser, neutral detergent fiber
NEL	Nettoenergie Laktation (MJ/kg TS)
NFC	Nicht-Faser-Kohlenhydrate
NPSPS	New Penn state particle separator
n.s.	nicht signifikant
OS	Organische Substanz
P	Irrtumswahrscheinlichkeit
PARL	Partikel assoziierte Flüssigkeit
peNDF	physikalisch effektive NDF
peNDF _L	physikalisch effektive NDF nach LAMMERS
peNDF _K	physikalisch effektive NDF nach KONONOFF
PL	Partikellänge
PSPS	Penn state particle separator
RAP	Rumination Analysis Program
RMRT	mittlere Verweilzeit im Reticulorumen
r. P.	retinierte Partikel
RW	Restwasserbestimmung
s	Standardabweichung
SARA	subakute Pansenacidose, subacute ruminal acidosis
SAS	Statistical Analysis System
sec	Sekunden
SEM	Standardfehler der Mittelwerte, Standard error of the mean
SW	Strukturwert

TD	Zeitverzögerung, Time delay
TM	Trockensubstanz
TMR	Totale Mischration, Gesamtmischration
TMRT	Verweilzeit im gesamten Verdauungstrakt
vs.	versus
VT	Vortrocknung
X	Mittelwert
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XX	N-freie Extraktstoffe
Yb	Ytterbium
Yb-NDF	Ytterbium markiertes NDF aus Heu
Zp	Zeitpunkt

Darüber hinaus verwendete Abkürzungen sind im Text erklärt.

10.2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1. Optimalverteilung von TMR- und Grundfutterpartikeln in der PSPS ¹ (LAMMERS et al., 1996) bzw. der NPSPS ² (KONONOFF et al., 2003b, e) (Mindestanteil in %).....	18
Tabelle 2.2. Literaturübersicht über den Einfluss der TPL des GF in einer TMR auf die Futteraufnahme, Milchleistung und -inhaltsstoffe (Lsmeans).	29
Tabelle 2.3. Literaturübersicht über den Einfluss der TPL des GF in einer TMR auf die Kauaktivität und den Kauindex von Milchkühen bezogen auf die Gesamtmischration (Lsmeans).....	37
Tabelle 2.4. Literaturübersicht über den Einfluss der TPL des Grundfutters in einer TMR auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage (Lsmeans).....	50
Tabelle 3.1. Versuchsschema	51
Tabelle 3.2. Versuchsablauf.....	52
Tabelle 3.3. Gärparameter ¹ (n = 1), Gärqualität und Partikelgrößenverteilung ² (n = 9) der Grassilage.....	54
Tabelle 3.4. Chemische Zusammensetzung der TMR-Komponenten (Mittelwerte) ..	54
Tabelle 3.5. Tierdaten, Komponenten, chemische Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung und Strukturbewertung der Rationen. (Mittelwerte)	55
Tabelle 3.6. Versuchsschema	58
Tabelle 3.7. Versuchsablauf.....	59
Tabelle 3.8 Chemische Zusammensetzung der gehäckselten Maispflanze (n = 4, Mittelwert).....	60
Tabelle 3.9. Tierdaten, chemische Zusammensetzung der TMR-Varianten und Komponenten.	61
Tabelle 4.1. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Futteraufnahme, Faseraufnahme, Energieaufnahme, Milchleistung und Milchinhaltsstoffe (Lsmeans ± SEM, n = 13).....	77

Tabelle 4.2. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Kauaktivität von Milchkühen (Lsmeans \pm SEM, n = 4).....	78
Tabelle 4.3. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Kauindices von Milchkühen, bezogen auf die Gesamtmischration (Lsmeans \pm SEM, n = 4).	79
Tabelle 4.4. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (retinierte TM in %) von TMR, Digesta und Kot (Lsmeans \pm SEM, n = 4).	80
Tabelle 4.5. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (retinierte TM in %) und die MPL (mm) der Digesta im dorsalen und ventralen Reticulorumen eine Stunde vor, 2 und 11 Stunden nach der Morgenfütterung (Lsmeans \pm SEM, n = 4).....	82
Tabelle 4.6. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die funktionelle spezifische Dichte der Digesta in unterschiedlichen Digestaschichten (D) des Pansens an drei verschiedenen Zeitpunkten (Lsmeans \pm SEM, n = 6 ²).....	83
Tabelle 4.7. Einfluss der PL der GS in einer TMR auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage sowie das Pansenvolumen (Lsmeans \pm SEM, n = 4).	84
Tabelle 4.8. Daten der Nährstoffanalyse, Gärparameter und Partikelgrößenverteilung der verschiedenen PL der MS (Lsmeans).	86
Tabelle 4.9. Daten der Partikelgrößenverteilung und der Strukturbewertung der TMR-Varianten (Lsmeans).	87
Tabelle 4.10. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Futteraufnahme, Faseraufnahme, Energieaufnahme, Milchleistung und Milchhaltsstoffe (Lsmeans \pm SEM, n ⁶ = 12)	88
Tabelle 4.11. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf das Futteraufnahmeverhalten (Lsmeans \pm SEM, n ⁵ = 12).	90
Tabelle 4.12. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Futterselektionsindices ¹ (Lsmeans \pm SEM, n ⁷ = 12).	91
Tabelle 4.13. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Kauaktivität von Milchkühen (Lsmeans \pm SEM, n ² = 4).	92
Tabelle 4.14. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Kauindices von Milchkühen bezogen auf die Gesamtmischration (Lsmeans \pm SEM, n ⁴ = 4).	93
Tabelle 4.15. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (Nasssiebanalyse, retinierte TM in %) von TMR, Digesta, und Kot (Lsmeans \pm SEM, n ⁴ = 4).	94

Tabelle 4.16. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Partikelgrößenverteilung (retinierte TM in %) und die MPL (mm) der Digesta im dorsalen und ventralen Reticulorumen eine Stunde vor, 2 und 10 Stunden nach der Morgenfütterung (Lsmeans \pm SEM, $n^7 = 4$).....	96
Tabelle 4.17. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die Partikel- und Flüssigkeitspassage (Lsmeans \pm SEM, $n^8 = 4$).	97
Tabelle 4.18. Einfluss der PL der MS in einer TMR auf die <i>in situ</i> -TM- und NDF-Verdaulichkeit der TMR und ihrer Komponenten (Lsmeans \pm SEM).	98

10.3 Tabellenanhang

Die in diesen Untersuchungen erfassten Einzeldaten sind sehr umfangreich und daher nicht als Anhang beigefügt. Sie sind am Institut für Tierernährung der Universität Hohenheim auf Datenträger vorhanden und einzusehen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Drs. Drs. h.c. Winfried Drochner für die Möglichkeit der Promotion und die Überlassung des Themas, sowie für die jederzeit gewährte Unterstützung und Diskussionsbereitschaft herzlich bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. Myqerem Tafaj und Herrn Dr. Steingaß die mir in allen Phasen der Arbeit immer mit wertvollem Rat zur Seite standen.

Bei Herrn Prof. Dr. Hans Schenkel bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates.

Herrn Prof. Dr. Jörn Bennewitz danke ich für die Übernahme der Aufgabe des Drittprüfers.

Mein persönlicher Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dr. Quendrim Zebeli für die gute Zusammenarbeit während der Untersuchungen und für die freundliche Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

Besonders möchte ich mich auch bei Frau Dr. H. Brehm für die Bereitschaft und die Durchführung der Fistulierung der Milchkühe bedanken.

Mein weiterer Dank geht an alle Mitarbeiter des Instituts für Tierernährung und der Versuchstation „Meiereihof“ der Universität Hohenheim, deren Mithilfe bei der Versuchsdurchführung und den Laboranalysen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Auch meinen Kolleginnen und Kollegen Dr. Caroline van Ackeren, Dr. Iris Weber, Dr. Anja Töpfer, Dr. Eva Bauer, Dr. Meike Eklund, Dr. Wolf Pelletier und Dr. Gerd Diebold möchte ich recht herzlich für die gute Zusammenarbeit und die schöne Zeit in Hohenheim danken

Mein ganz persönlicher und herzlicher Dank gilt meinen Eltern, Edeltraud und Hans-Peter Junck, die mich in allen Entscheidungen meiner Laufbahn stets unterstützt haben. Ohne Sie hätte ich diese Möglichkeiten nie gehabt und wäre nicht da wo ich jetzt bin.

Danksagung

Ein ganz spezieller Dank gilt meiner Frau Tina Junck. Sie war immer für mich da, hat mich entlastet und unterstützt, meine Launen ertragen und eine fast grenzenlose Geduld bewiesen, für die ich Ihr von ganzem Herzen danken möchte.

Diese Arbeit wurde von der H. Wilhelm Schaumann Stiftung gefördert. Dafür möchte ich meinen Dank aussprechen.

Hohenheim im Juni 2009

Benjamin Junck

Lebenslauf

ZUR PERSON

Benjamin Alexander Junck
Diplom-Agraringenieur
geboren am 09. Januar 1976
in Balingen

AUSBILDUNG

1982 - 1986	Grundschule Jungingen
1986 - 1995	Allgemeines städtisches Gymnasium Hechingen
10/1995 - 07/2001	Studium der Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim Fachrichtung: Tierproduktion
04/2000 - 07/2001 Thema	Diplomarbeit am Institut für Tierernährung: „Einfluss der Grundfutterqualität und des Kraffutterniveaus auf ausgewählte chemische und physikalische Parameter in verschiedenen Schichten des Pansens bei Milchkühen“
seit 01/2003 Thema	Promotion am Institut für Tierernährung: „Eine physiologische Bewertung der Auswirkungen der Partikellänge von Gras- und Maissilage in Gesamtmischrationen bei Milchkühen“

BERUFLICHE TÄTIGKEIT

08/2001 - 12/2002	Leitender Mitarbeiter auf dem Vornagelhof, Jungingen, Deutschland
seit 05/2004	Betriebsleiter von Vornagel Genetics, Jungingen, Deutschland

PRAKTIKA

10/1997 - 02/1998	James Fraser (M. Sc.), Pleasant Point, Neuseeland (Fleischrinder- und Schafzucht)
06/1998 - 09/1998	Jörg Zimmermann (Landw. Techniker), Bodelshausen, Deutschland (Mutterkuhhaltung mit Nachzucht, Bullenmast, Ackerbau und Lohnunternehmen)

Stuttgart-Hohenheim, 10. Juni 2009

