

Die Milchkuh im Spannungsfeld zwischen Leistung, Gesundheit und Nährstoffeffizienz

Dairy cows among conflicting goals of high performance, health status, and nutrient efficiency

Annabella Khol-Parisini¹ und Qendrim Zebeli^{1*}

Zusammenfassung

Eine nachhaltige und erfolgreiche Produktion der Milchviehbetriebe ist von der Gesundheit der Kühe, ihrer Lebensleistung und der Effizienz der Nährstoffverwertung stark abhängig. Grundvoraussetzung dafür ist neben einer ausgewogenen und bedarfsgerechten Fütterung auch die Erhaltung eines gesunden und stabilen Pansenmilieus. Dafür spielt die Berücksichtigung der Prinzipien einer wiederkäuergerechten Fütterung eine wichtige Rolle. Zur Aufrechterhaltung der Pansengesundheit sind vor allem zwei Maßnahmen nötig, nämlich erstens, die Pansenmukosa der Kuh vor der Hochlaktation ausreichend auf die bevorstehende Zeit der intensiven Fütterung vorzubereiten, und zweitens, die Fütterung so zu gestalten, dass ein zu starker und zu langer Abfall des Pansen-pH-Wertes vermieden werden kann. Es ist eine große Herausforderung, eine Ration zusammenzustellen, welche die Pansen- und Tiergesundheit trotz einer hohen Energiedichte gewährleistet und damit eine optimale Nährstoffeffizienz und Leistung ermöglicht. Dazu ist die Balance zwischen dem Strukturanteil der Ration und dem Anteil von im Pansen schnell abbaubaren Nicht-Faser-Kohlenhydraten notwendig. Der vorliegende Artikel legt den Fokus auf Pansenstoffwechsel und -gesundheit und liefert Hintergründe, Zusammenhänge und ganz praktische Faustzahlen hinsichtlich der Fütterung und Gesunderhaltung der hochleistenden Milchkuh.

Schlagwörter: Pansen, subakute Pansenazidose (SARA), Strukturbedarf, Partikellänge, Neutral-Detergenzien-Faser (NDF), Faserverdauung

Abstract

Maintaining production efficiency and the length of productive life of dairy cows are the most important variables in the equation of a high profitability of dairy farms. Accordingly, the maintenance of a healthy rumen ecosystem by providing sufficient physically effective fiber, while feeding energy-dense diets is regarded as a key factor. This can be achieved by adapting rumen microbial communities and the mucosa slowly to the energy dense diets used in early lactation and by balancing the fiber- and starch content of the ration to prevent the development of rumen disorders. Formulating a diet that meets the requirements of a healthy rumen ecosystem and host on one hand, and of a high energy density to assure maximum performance and feed efficiency on the other hand, poses a continuous challenge to dairy nutritionists. This can be achieved by balancing the fiber- and rumen degradable starch content of the ration. Focussing on rumen metabolism and health, this article gives background information, explains interactions and provides practical guidelines for promoting health and production efficiency of high-yielding dairy cows.

Keywords: Rumen, sub-acute rumen acidosis (SARA), fiber requirement, particle size, neutral detergent fiber (NDF), fiber degradation

1. Einleitung

Eine ausgewogene und wiederkäuergerechte Ernährung der Milchkuh ist die Grundvoraussetzung für eine stabile Gesundheit, das Wohlbefinden der Tiere und eine nachhaltige Produktion der Milchviehbetriebe. Die heutigen ökonomisch-politischen Rahmenbedingungen fordern höhere Leistungen pro Tier, um die Produktionseffizienz der Milchkuhe zu erhöhen. Auch eine lange Lebens- und damit Produktionsdauer der Kühe ist eine Voraussetzung für die Bewältigung der immer größer werdenden Herausforderungen in der Milchproduktion.

Um hohe Leistungen zu erzielen und damit den hohen Energiebedarf für die Milchproduktion zu decken, werden Milchkuhe im Allgemeinen mit großen Mengen an Kraftfutter oder anderen schnell verdaulichen, faserarmen Nebenprodukten gefüttert. Diese Fütterungsstrategie ist sinnvoll, um Tiere für die hohe Leistung bedarfsdeckend zu füttern, jedoch wird sie den verdauungsphysiologischen Vorgängen der Wiederkäuer nicht gerecht (ZEBELI et al. 2010). Die Fütterung von Wiederkäuern mit großen Mengen an Kraftfutter, die reich an rasch fermentierbarer Stärke sind, resultiert in einem schnellen Absinken des Pansen-pH-Wertes in den azidotischen Bereich, da der Anteil an kurz-

¹ Veterinärmedizinische Universität Wien, Institut für Tierernährung, Department für Nutztiere und öffentliches Gesundheitswesen in der Veterinärmedizin, Veterinärplatz 1, A-1210 Wien

* Ansprechpartner: Univ.-Prof. Dr.sc.agr. Qendrim Zebeli, email: qendrim.zebeli@vetmeduni.ac.at



kettigen Fettsäuren im Pansensaft steigt (NOCEK 1997). Halten diese Bedingungen im Pansen über einen längeren Zeitraum an, kann dies zu einer subakuten Pansenazidose (SARA, Engl. sub-acute rumen acidosis) führen (ZEBELI et al. 2008).

Die SARA ist eine sehr kritische Stoffwechselkrankheit, die mit schwer erkennbaren klinischen Zeichen assoziiert ist und eine schlechte Futteraufnahme und Reduktion der Verdaulichkeit mit sich bringt, was zu einer geringeren Futterverwertung führt (PLAIZIER et al. 2008). Darüber hinaus konnten aktuelle Studien zeigen, dass SARA oft eine größere Permeabilität der Pansenmukosa verursacht und daher schädliche Komponenten, wie z.B. mikrobielle Endotoxine (ZEBELI et al. 2011, PLAIZIER et al. 2012), in den systemischen Blutkreislauf gelangen können (ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012). Dadurch können systemische Entzündungsreaktionen und diverse metabolische Störungen wie Futterverweigerung, Klauenrehe, Fettleber, Leberabszesse, Ketose, Labmagenverlagerung begünstigt bzw. hervorgerufen werden (NAGARAJA und LECHTENBERG 2007, PLAIZIER et al. 2008, AMETAJ et al. 2010). Es ist allgemein bekannt, dass das Auftreten von Stoffwechselstörungen bei Milchkühen schwerwiegende Konsequenzen für die Leistung, das Wohlbefinden und die Gesundheit des Tieres hat (PLAIZIER et al. 2008) und schließlich die Nährstoffeffizienz der Kuh und die allgemeine wirtschaftliche Effizienz von Milchkuhbetrieben negativ beeinflusst (ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012).

Ziel dieser Literaturübersicht ist es daher, Zusammenhänge zwischen Fütterung, Gesundheit, Futterverwertung und Produktionseffizienz bei Milchkühen näher zu erläutern und darauf aufbauend praxisrelevante Lösungen zu erarbeiten.

2. Anforderungen an eine Milchkuh-Ration

Die hochleistende moderne Milchkuh ist auf eine adäquate Versorgung mit Energie, Nährstoffen und Wasser angewiesen, um die Leistungen bringen zu können, für die der genetische Grundstein gelegt ist. Der Erhaltungsbedarf einer Kuh mit 650 kg Körpermasse (KM) beträgt 37,7 MJ Netto Energie Laktation (NEL) und knapp 450 g im Dünndarm nutzbares Rohprotein (nXP). Für die Leistung schlagen weitere 3,3 MJ NEL und 85 g nXP pro kg Milch (fat corrected milk, FCM: 4 % Milchlaktat, 3,4 % Milcheiweiß) zu Buche. Daraus resultiert ein Bedarf von 104 MJ NEL, also dem knapp 3-fachen Erhaltungsbedarf, und 2.150 g nXP für eine Kuh mit einer Leistung von 20 kg FCM/Tag und von 170 MJ NEL (dem 4,5-fachen Erhaltungsbedarf) und 3.850 g nXP für eine Kuh mit der doppelten Milchleistung. Da die Futteraufnahme physiologischen Grenzen in Form der Trockenmasse (TM)-Aufnahmekapazität unterliegt, die im Erhaltungsbedarf 2 %, laktierend jedoch 3 – 3,5 %, in der Hochlaktation sogar bis zu 4 % der KM betragen kann (GRUBER et al. 2001), muss bei steigender Leistung neben der Futtermenge auch die Energiedichte erhöht werden (KAMPHUES et al. 2009). Die rechnerisch nötige Energiedichte der Ration beträgt daher bei einer Leistung von ca. 20 kg Milch etwa 6,0 MJ NEL/kg TM und setzt eine TM-Aufnahme von 17 kg TM/Tag voraus. Bei 30 kg Milch soll die Ration sogar mindestens 6,8 MJ NEL/kg TM enthalten und die Kuh erreicht eine TM-Aufnahme von knapp 20 kg/Tag um den Tagesbedarf zu decken. Bei

höheren Leistungen werden noch höhere Werte der Energiedichte und TM-Aufnahme benötigt (GRUBER et al. 2001), was die Milchkuh immer wieder an ihre physiologischen Grenzen bringt (BREVES und RODEHUTSCORD 1999). Eine derart hohe Energiedichte wird je nach verwendeten Futtermitteln und dem Verhältnis von Gras- zu Maissilage mit einem Kraftfutter-Anteil von etwa 45 – 60 % erzielt, wogegen für Leistungen um 20 kg FCM ein Kraftfutteranteil von etwa 20 – 30 % in der TM nötig ist.

Dem Erreichen einer hohen Energie- und Nährstoffdichte steht der Strukturbedarf der Kuh gegenüber, also die nötige Wiederkäuergerechtheit der Ration. Die zuzuführenden Faserstoffe liefern nur wenig Energie und Nährstoffe und „verdünnen“ daher die erreichte Energie- und Nährstoffdichte der Ration wieder. Außerdem reduzieren zu hohe Anteile an strukturierter Faser in der Ration nicht nur die Futteraufnahme sondern auch die Futterverwertung auf Grund einer reduzierten mikrobiellen Proteinsynthese im Pansen (YANG und BEAUCHEMIN 2006). Bei unzureichender Strukturversorgung jedoch, ist die adäquate Pansenfunktion nicht gewährleistet, da die Schichtung der Inhalte, die Abpufferung der entstehenden kurzkettigen Fettsäuren durch entsprechenden Speichelfluss und die Verweildauer grober Partikel im Pansen nicht gewährleistet und die Pansenmotorik beeinträchtigt ist (ZEBELI et al. 2010). Die Herstellung von Rationen, die den Ansprüchen an die Energie- und Nährstoffdichte entsprechen und eine adäquate Menge an strukturierten Faserstoffen enthalten, um eine optimale Pansenfunktion zu ermöglichen, ist die wohl größte Herausforderung in der modernen Milchviehfütterung. Dafür bedarf es einer optimalen Balance zwischen schnell abbaubaren Kohlenhydraten und strukturierter Faser in der Ration (ZEBELI et al. 2010).

Neben der Zusammenstellung einer solchen Ration, ist die Aufnahme der Gesamtration ohne nennenswerte Selektion des Kraftfutteranteils durch die Tiere ein kritischer Faktor, da Kühe bei steigenden Konzentratanteilen diese mehr und mehr auf Kosten des Raufutteranteils aufnehmen und das aufgenommene Futter daher dem Strukturbedarf der Tiere nicht mehr entspricht (Grundfutterverdrängung). Für die praktische Rationsgestaltung stehen Faustzahlen zur Verfügung: Mindestens 400 g „strukturwirksame Rohfaser“/100 kg KM, ein „kritischer Strukturwert“ von mindestens 1 (STEINGASS und ZEBELI 2008), oder mindestens 40 – 45 % Halmfutter in der Gesamt-TM und 18 % Rohfaser in der TM, davon 2/3 mit $\geq 3,7$ cm Faserlänge (KAMPHUES et al. 2009) müssen in einer wiederkäuergerechten Ration enthalten sein. Da sich die Erfüllung dieser Voraussetzungen in der Praxis insbesondere in der Fütterung der Hochleistungsmilchkuh nur schwer gestalten lässt (STEINGASS und ZEBELI 2008), gibt es Anstrengungen, diese Angaben durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Fütterung, Pansengesundheit und Leistung zu relativieren und damit neuere und präzisere Empfehlungen für die gesunde Rationsgestaltung der Hochleistungskuh geben zu können (ZEBELI et al. 2008), wie später dargelegt. Zur Beurteilung der Wiederkäuergerechtheit einer Ration muss neben dem analytisch beurteilbaren Faseranteil der Aspekt der Kaufähigkeit oder Struktur durch Faserlänge, -härte, -feuchtigkeit und der Aspekt der ruminalen Abbaubarkeit der Faser und des Konzentratanteils herangezogen werden. Auf analytischer Basis wird meist die Neutrale

Detergenzfaser (NDF) beurteilt, welche die Summe der Zellwandbestandteile wiedergibt. In letzter Zeit wurde auch das Konzept der physikalisch-effektiven Faser (peNDF) diskutiert, welches die chemische Zusammensetzung der Ration mit der vorhandenen Partikelverteilung in einem Parameter zusammenfasst und damit eine bessere Vorhersage der Wiederkäuergerechtigkeit einer Ration erreicht (STEINGASS und ZEBELI 2008, ZEBELI et al. 2012). Limitierungen bei der genauen Vorhersage der Verträglichkeit eines Futters im Pansen entstehen vor allem durch Variationen der anderen relevanten Rationskomponenten und -eigenschaften und deren Interaktion, v.a. die Abbaueigenschaften des Konzentratanteils, da ein hoher Anteil schnell abbaubarer Kohlenhydrate einen Abfall des Pansen-pH-Wertes verursacht, wodurch der Bedarf an peNDF steigt (ZEBELI et al. 2010). Die endgültige Beurteilung der Strukturwirksamkeit der aufgenommenen Ration findet nach wie vor am Tier statt und beinhaltet Parameter wie Wiederkauaktivität und -verhalten einer Herde, die Beurteilung des Pansensaftes (pH-Wert-Entwicklung in Abhängigkeit von der Futteraufnahme) und die Beurteilung der Vormagenverdauung (KAMPHUES et al. 2009).

3. Pansenphysiologische Kenndaten der Milchkühe

Der Pansen nimmt allein durch seine Größe im wahren Sinne des Wortes eine zentrale Rolle in der Kuh ein. Mit seinem Volumen von etwa 150 – 200 l und der Füllung mit grob 10^7 – 10^{12} Mikroben pro ml Inhalt hat der Pansen das Potential, als einzigartige Gärkammer aus für andere Tiere schwerverdaulichen Futtermitteln, eine große Menge an Energie und hochwertigen Nährstoffen bereitzustellen. Auf der anderen Seite birgt eine Entgleisung des Pansenmilieus ernste Gefahren für den Wiederkäuer, da die enorm große Resorptionsoberfläche der Pansenzotten nicht nur Nährstoffe, sondern auch Toxine in großem Ausmaß resorbieren kann (PLAIZIER et al. 2012, ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012).

Unter physiologischen Fütterungsbedingungen herrscht ein Fließgleichgewicht zwischen Futteraufnahme und Weiterleitung des Inhaltes, das durch die regelmäßige, intensive Durchmischung des Panseninhaltes und seine Schichtung gewährleistet wird und eine optimale Inkubation der Nahrungsbestandteile mit den Mikroben, sowie die Retention unzureichend verdauter Bestandteile ermöglicht. Ist die Fasermenge und -länge der Ration ausreichend, bildet sich eine Schicht fester, noch weitgehend unverdauter Bestandteile in der Mitte des Pansens, die auf dem „Pansensee“, dem flüssigen ventralen Panseninhalt, der bereits stark fermentierte kleine Partikel enthält, schwimmt. In dieser festen Phase, der Pansenmatte, auch Fasermatte genannt, zeigt sich die größte Mikrobendichte und -vielfalt. Hier findet der Großteil der Faserfermentation statt, aber auch stärkereiche Partikel werden durch die Fasermatte gehalten und hier fermentiert, wodurch ein vorzeitiger Verlust dieser Partikel verhindert wird (ZEBELI et al. 2012). Ist die physiologische Konsistenz der Fasermatte nicht gewährleistet, wird diese Funktion beeinträchtigt und die Verdaulichkeit sinkt durch die erhöhte Passagerate der Digesta. Die Fasermatte und die dorsale Gasblase sind so lokalisiert, dass durch den Ruktus Gas abgegeben und Futter wiedergekaut werden kann.

Durch die mechanische Reizung der Pansenzotten durch faseriges Material der Fasermatte werden sowohl die Pansenkontraktionen, als auch die Wiederkautätigkeit angeregt, und damit die Verdaulichkeit verbessert und der Fluss von Bikarbonat aus dem Speichel zur Pufferung des Panseninhaltes gefördert. Pansenkontraktionen erhöhen zusätzlich die Absorption kurzkettiger Fettsäuren über die Pansenzotten und leisten damit einen weiteren wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des ruminalen pH-Wertes. Je fester die Konsistenz dieser Phase, umso effektiver sind sowohl die Retention unverdauter Bestandteile und damit deren Verdaulichkeit, als auch die Stabilität des ruminalen pH-Wertes (ZEBELI et al. 2012).

4. Pansen-pH-Wert und die Subakute Pansenazidose (SARA)

Die Pansenschleimhaut ist in der Lage, sich an veränderte Bedingungen, z.B. an einen höheren Energie- und Stärkegehalt des Futters anzupassen, indem die dann vermehrt produzierten kurzkettigen Fettsäuren das Wachstum der Pansenzotten stimulieren, um die Resorptionsoberfläche zu erhöhen. Gleichzeitig passt sich die Pansenflora an die neuen Gegebenheiten an. Ändert sich die Futterzusammensetzung zu schnell oder zu stark im Sinne einer Erhöhung des Kraftfutteranteils, von vorne herein oder durch Selektion bei der Futteraufnahme, entsteht ein Ungleichgewicht zwischen Bildung und Resorption der kurzkettigen Fettsäuren – es kommt zur Pansenazidose. Im Falle der subakuten Pansenazidose (SARA) fällt der pH-Wert nicht dauerhaft ab, wie bei der akuten Pansenazidose, die Periode mit einem pathologischen pH-Wert von unter 5,5 oder 5,8 beginnt vielmehr wenige Stunden nach der Aufnahme der konzentratreichen Futtermittel und hält nur einige Stunden an (KLEEN et al. 2003). Es besteht keine Einigkeit über den pH-Wert, der ein gerade noch funktionierendes Milieu anzeigt und dessen Unterschreitung Zeichen einer SARA ist, meist wird jedoch pH 5,6 oder 5,8 herangezogen (KLEEN und CANNIZZO 2012, ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012).

Der ruminale pH-Wert fluktuiert physiologischer Weise bei intensiv gefütterten Kühen, sodass er vor der Morgenfütterung bei etwa 6,6 – 7,0 liegt um in der Zeit der intensiven Fermentation unter Tags auf Werte zwischen 5,0 und 5,3 abzusinken, wobei der Durchschnittswert bei etwa 6,0 oder 6,2 liegt (KRAUSE und OETZEL 2006). Bei intensiv gefütterten Kühen fällt der ruminale pH-Wert für mindestens 1 Stunde unter 5,8, auch wenn sie gesund sind. Selbst wenn dieser Zustand 3 – 5 Stunden anhält, verändert sich die Zahl und Aktivität der faserverdauenden Mikroflora noch nicht (ÖLSCHLÄGER et al. 2006). Zur Sicherstellung der Pansengesundheit ist ein mittlerer pH-Wert von unter 6,16, sowie eine Dauer von über 5 Stunden/Tag mit pH-Wert unter 5,8 zu vermeiden (ZEBELI et al. 2008). Die Prävalenz der SARA liegt in verschiedenen Studien in Europa bei 11 – 33 % und kann durch die gefütterte Ration einerseits, aber auch durch Fehler im Fütterungs- und Stallmanagement, wie eine massive negative Energiebilanz, ein limitiertes Fressplatzangebot, eine zu lange Mischzeit der TMR, sozialen Stress, oder das Aussortieren einzelner TMR-Bestandteile erklärt werden (KLEEN und CANNIZZO 2012).

5. Folgen und Begleiterscheinungen der SARA

5.1 SARA und Futteraufnahme

Der Rückgang der TM-Aufnahme, die mit der schwächeren Pansenmotilität und der höheren Osmolarität des Inhaltes zu tun hat, wird als sensibler Indikator für eine Pansenazidose betrachtet (KLEEN et al. 2003). Die reduzierte TM-Aufnahme in einer Zeit der hohen Milchleistung und die reduzierte Fermentation der Stärke und Faser und verminderte Bereitstellung mikrobiellen Proteins im Pansen führt zur Reduktion der KM (KLEEN und CANNIZZO 2012). Entsteht eine chronische Entzündung im Zuge der SARA, steigt einerseits der Energiebedarf und damit die negative Energiebilanz weiter an (ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012), auf der anderen Seite beeinträchtigt die Entzündungsreaktion die Futteraufnahme noch mehr (KHAFIPOUR et al. 2007, PLAIZIER et al. 2008).

5.2 SARA und Nährstoffabbau

Die Abbaubarkeit der Faser wird durch eine Reduktion des pH-Wertes während der SARA stark beeinträchtigt. Das ist vor allem durch die Hemmung der Aktivität und einen Rückgang der Zahl der zellulolytischen Pansenmikroben im Zuge der SARA zu erklären (MOURIÑO et al. 2001). Während andere Nährstoffe wie beispielsweise Stärke und andere Nicht-Faser Kohlenhydrate auch in den weiteren Segmenten des Verdauungstraktes abgebaut werden können und somit eine Kompensation möglich ist, wird Faser hauptsächlich in den Vormägen und insbesondere im Haube-Pansenraum abgebaut (ZEBELI et al. 2008).

Obwohl man von einer Erhöhung der Passagerate der Pansendigesta während einer SARA ausgeht (ZEBELI et al. 2012), gibt es zurzeit unzureichende Daten, die auch eine Reduktion der proteolytischen Aktivität im Pansen während einer SARA zeigen. Eine Reduktion der Anflutung von nXP im Dünndarm während der SARA wird daher momentan eher auf eine Verschlechterung des Pansenmilieus und damit einhergehender Prozesse (z.B. schlechte Bedingungen für Mikrowachstum und mikrobielle Proteinsynthese) zurückgeführt, als auf eine geringere proteolytische Aktivität. Dasselbe gilt auch für die Synthese und Resorption anderer Nährstoffe wie beispielsweise verschiedener Vitamine, wobei Vitamin B₁ (Thiamin) eine Ausnahme darstellt. Thiamin wird von Pansenbakterien synthetisiert, somit kann der Wiederkäuer seinen Bedarf nahezu ohne zusätzliche Zufuhr decken. Während einer SARA wird Thiamin jedoch vermehrt durch thiaminolytische Aktivitäten im Pansen abgebaut, weshalb betroffene Tiere schnell einen Thiaminmangel entwickeln (TAF AJ et al. 2006).

Der Faserabbau ist nicht nur von der Faser selbst abhängig, nämlich von der chemischen Zusammensetzung sowie von ihrer Partikelgröße (TAF AJ et al. 2007), sondern es spielt auch die Pansenfunktion eine entscheidende Rolle, allem voran der pH-Wert, der die Zusammensetzung der Mikrobepopulation (FERNANDO et al. 2010) und damit die gesamte Pansenfunktion maßgeblich bestimmt. Auch die Schichtung des Panseninhaltes, die eine adäquate Verweildauer der Faserpartikel und damit eine gute Verdaulichkeit gewährleisten soll, wird vom pH-Wert beeinflusst. Eine

erhöhte Passagerate der Digesta führt ebenso wie ein Abfall des Pansen-pH-Wertes zu einer Reduktion der Faserverdaulichkeit (ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012).

CALSAMIGLIA et al. (2002) zeigten, dass bei pH-Werten zwischen 6,4 und 5,7 die Verdaulichkeit um 2 – 3 % reduziert wird, wenn der pH-Wert um 0,1 sinkt. Dabei kommt es vor allem auf die Dauer der pH-Wert Senkung unter einen bestimmten Wert an, da kurze pH-Reduktionen noch keine Auswirkung auf die Verdaulichkeit zeigen. Interessanterweise zeigte eine Metaanalyse eines großen Datenpools, dass die Voraussetzungen zur Entstehung einer SARA und zur Reduktion der Faserverdaulichkeit nahezu ident sind. Die Dauer einer pH-Wert Reduktion unter 5,8 von 5 Stunden führte zur Reduktion der Faserverdaulichkeit, bestand dieser pH-Wert länger als 5,2 Stunden, kam es zur Entstehung einer SARA (ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012). Man kann davon ausgehen, dass auch unter den oben genannten Bedingungen eine zellulolytische Aktivität vorliegt, jedoch nur zu Zeitpunkten und in Bereichen des Pansens, die von der pH-Reduktion nicht betroffen sind. Auf der Grundlage unterschiedlicher Daten wurden verschiedene Beziehungen zwischen pH-Wert und Faserverdaulichkeit beobachtet, die sich jedoch weitgehend ähneln: Zwischen pH 6,1 – 6,2 und etwa 5,6 – 5,7 gibt es einen steilen Abfall der Faserverdaulichkeit von etwa 60 – 80 % auf etwa 0 – 20 % der maximalen Verdaulichkeit, bei pH 6,7 liegt die Faserverdaulichkeit bei 90 % des Maximums. Die praktische Relevanz der Faserverdaulichkeit ist groß: Eine Reduktion um 20 % resultiert in einer um etwa 10 % reduzierten Bereitstellung von Energie und Protein aus der Ration (DIJKSTRA et al. 2012).

5.3 SARA und Milchfettgehalt

Der Milchfettgehalt korreliert mit der Kauaktivität, ist direkt proportional zum Pansen-pH-Wert und wird oft als Indikator für die Pansengesundheit herangezogen (ZEBELI et al. 2010). Die Balance zwischen Faser- und Stärkefermentation im Pansen beeinflusst die Mikrobepopulation und damit das Muster der gebildeten kurzkettigen Fettsäuren, die für die *de novo* Synthese von Milchfett zur Verfügung stehen sowie die Bildung bestimmter Isomere der Trans-Fettsäuren als Zwischenprodukte der Fermentationswege. Eine Abpufferung des Panseninhaltes verhindert den Abfall des Milchfettgehaltes, da die Bildung von trans-C18:1 und trans-10, cis-12 C18:2 Fettsäuren reduziert wird, welche die Bildung von Milchfett in der Milchdrüse hemmen (ALZAHAL et al. 2010). In der Praxis stellt der Milchfettgehalt einen Anhaltspunkt bei der Einschätzung der Strukturversorgung von Milchkühen dar, obwohl ein Milchfettabfall auf Grund eines Struktur Mangels durch eine negative Energiebilanz und den damit verbundenen starken Körperfettabbau während der Hochlaktation weniger deutlich ausfällt, als bei ausgeglichener Energiebilanz (STEINGASS und ZEBELI 2008, ZEBELI et al. 2008).

5.4 SARA und Herdengesundheit

Im Zusammenhang mit SARA werden oft weitere Probleme der Herdengesundheit beobachtet, wie etwa ein erhöhtes Auftreten von Ketose, Fettleber, Labmagenverlagerung, Klauenreihen, Rumenitis oder systemischen Entzündungsreaktionen der Tiere (AMETAJ et al. 2010). Die Belastung des Pansenepithels durch die gestörte mikrobielle Symbiose

und die im Übermaß vorhandenen kurzkettigen Fettsäuren und bakteriellen Endotoxine während anhaltenden Phasen einer Pansenazidose kann zur Parakeratose und lokalen Entzündungsreaktionen führen, wodurch die Resorption der Fettsäuren reduziert und damit das Pansenmilieu und die Energiebilanz weiter belastet wird (KLEEN et al. 2003). Hohe Mengen an akkumulierendem Endotoxin im Pansen ziehen zudem eine Beeinträchtigung des intensiv belasteten Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels der Hochleistungskuh nach sich (ZEBELI et al. 2011). Man geht davon aus, dass die Beeinträchtigung der Pansenschleimhaut und Schleimhautbarriere den Übertritt von Endotoxinen in die Blutbahn ermöglicht und eine systemische Entzündungsreaktion hervorrufen kann (ZEBELI und METZLER-ZEBELI 2012). Bei betroffenen Tieren wird die Bildung von Mikroabszessen in der Leber begünstigt, von wo aus im ganzen Körper durch Keime der physiologischen Pansenflora Abszesse gebildet werden können (NAGARAJA 2000). Wird SARA durch einen erhöhten Anteil leicht fermentierbarer Kohlenhydrate hervorgerufen, kommt es zu einer systemischen Entzündungsreaktion, die nicht beobachtet werden kann, wenn Luzernepellets die Azidose auslösen (KHAFIPOOR et al. 2007, PLAIZIER et al. 2008 und 2012). Das zeigt, dass die Entstehung einer Entzündungsreaktion im Zuge der SARA ein sehr komplexes Geschehen ist, das über einen reduzierten pH-Wert und eine Akkumulation von Endotoxin im Pansen hinaus zahlreiche weitere Faktoren involviert.

In der Praxis ist es schwierig, einen tatsächlichen kausalen Zusammenhang zwischen den verschiedenen klinischen Veränderungen und SARA zweifelsfrei zu belegen, da SARA in Feldstudien nicht notwendiger Weise zu den erwarteten klinischen Veränderungen führt oder eine allgemeine Entzündungsreaktion hervorruft (KLEEN und CANNIZZO 2012). Es ist daher unklar, ob SARA als ein Indikator für Herden- und Tiergesundheitsprobleme verstanden werden muss, die alle dieselbe Ursache haben, oder als Herdenproblem per se, mit einer Reihe klinischer Folgeerscheinungen. Auf jeden Fall hat ein Abfall des ruminalen pH-Wertes negative Folgen für die Fermentation und die Bildung mikrobiellen Proteins und damit auf die Futteraufnahme, Körperkondition und Leistung, wodurch SARA eine zentrale Rolle im Komplex der negativen Energiebilanz spielt (KLEEN und CANNIZZO 2012) und der ruminale pH-Wert das zentrale Ziel von Maßnahmen zur Optimierung von Futterverwertung, Leistung und Gesundheit sein muss (ZEBELI et al. 2010).

6. Prävention der SARA – Fütterung auf Gesundheit, Nährstoffeffizienz und Leistung

Zur Prävention der SARA sind vor allem zwei Maßnahmen nötig, nämlich erstens die Pansenmukosa der Kuh vor der Hochlaktation ausreichend auf die bevorstehende Zeit der intensiven Fütterung vorzubereiten, und zweitens die Fütterung so zu gestalten, dass ein zu starker und zu langer Abfall des Pansen-pH-Wertes vermieden werden kann (KLEEN et al. 2003).

Die Vorbereitungs fütterung nimmt 6 Wochen in Anspruch, in denen ein gradueller Anstieg des Kraftfutteranteils der Ration stattfindet, bis die maximale Kraftfuttermenge

etwa in der 4. Laktationswoche erreicht ist (SPIEKERS und POTTHAST 2004). Die größere Herausforderung ist das Zusammenstellen einer Laktationsration, welche die Pansen- und Tiergesundheit trotz einer hohen Energiedichte gewährleistet und damit eine optimale Futterverwertung und Leistung ermöglicht. Dazu ist einerseits die Bereitstellung eines ausreichenden Anteils von peNDF nötig, die maßgeblich für die Aufrechterhaltung eines gesunden Pansenmilieus ist, dem Grundstein für eine gute Verdauungs- und damit auch Milchleistung. Auf der anderen Seite reduziert zu viel Faser die Futteraufnahme und -verwertung. Der Faserbedarf muss immer im Zusammenhang mit der zugeführten Menge an Stärke und mit der TM-Aufnahme gesehen werden, da eine große Menge schnell im Pansen abbaubarer Stärke, bedingt durch den Anteil der Stärke und die Gesamtfuttermenge, den pH-Wert negativ beeinflusst und damit den Faserbedarf erhöht (ZEBELI et al. 2010). Eine größere TM-Aufnahme erhöhte in verschiedenen Studien das Risiko für die Entstehung von SARA, da sie die Fermentation mehr zu fördern scheint, als die neutralisierenden Prozesse (ZEBELI et al. 2008).

6.1 Stärkegehalt in der Ration optimieren

Die aus Stärke entstehende Glukose dient nicht nur dem Wiederkäuer selbst, sondern wird auch von den Pansenmikroben zur Erhaltung und zum Aufbau mikrobiellen Eiweißes benötigt. Je nach Getreide- und Verarbeitungsart variiert die Pansenabbaubarkeit der Stärke erheblich, da die chemische Struktur der Stärke zwischen Getreidearten und -sorten unterschiedlich ist und der Grad der Gelatinisierung der Stärkegranula durch die Verarbeitung verändert wird. Generell ist unbehandelte Maisstärke deutlich resistenter gegen den Abbau im Pansen als Gerste oder Weizen, wobei die Abbaubarkeit durch verschiedene Verarbeitungstechnologien jeweils noch verringert oder erhöht werden kann (OFFNER et al. 2003). Auch die Qualität, die Konservierungsart, der Zerkleinerungsgrad und die gefütterte Menge beeinflussen den Stärkeabbau im Pansen erheblich, sowie natürlich die Passagerate. Ein hoher Anteil im Pansen abbaubarer Stärke in der Ration erhöht den Bedarf an peNDF (SILVEIRA et al. 2007), auf der anderen Seite erhöht ein hoher Anteil an peNDF die Passagerate in den Dünndarm, wodurch die ruminale Abbaubarkeit der Stärke sinkt (ZEBELI et al. 2008) und der Pansen entlastet wird. Wird der Anteil der im Dünndarm abzubauenen Stärke jedoch zu hoch, besteht die Gefahr der unzureichenden Stärkeverdauung mit einhergehender Fermentation der Stärke im Dickdarm und dem Verlust des dort entstehenden mikrobiellen Proteins, sowie der Beeinträchtigung des Dickdarmmilieus und der Reduktion der Verdaulichkeit der Stärke, da im Dünndarm nur ein limitierter Stärkeabbau möglich ist (MATTHE et al. 2000). Zudem ist die ausreichende Versorgung der Pansenflora mit Glukose zur Bildung von genug mikrobiellem Protein nötig. Es ist also anzustreben, dass eine optimale Menge ruminal abbaubarer Stärke bereitgestellt wird, ergänzt durch nicht mehr als 1,3 – 1,8 kg pansenresistenter Stärke pro Tier und Tag (MATTHE et al. 2001). Das Bereitstellen von etwa 15 % der Trockenmasse einer TMR als pansenabbaubare Stärke aus Getreide (ruminally degradable starch from grains, RDSG) wurde, in Abhängigkeit von der peNDF Versorgung, als Richtwert für die optimale Stärkeversorgung vorgeschlagen (ZEBELI et al. 2008).

6.2 Faserqualität der Ration beachten

Nicht nur die Menge und Struktur der verwendeten Stärke, auch die Qualität der faserreichen Futtermittel selbst ist mitbestimmend für die Balance zwischen Stärke und Fasergehalt der Ration. Bei Verwendung hochwertiger Raufutterquellen mit hoher ruminaler Abbaubarkeit der Faser, kann der Raufutteranteil unter Beibehaltung der hohen Energiedichte angehoben bzw. der Kraftfutteranteil gesenkt werden, da Futter- und Energieaufnahme bei besserer Raufutterqualität steigen. Eine hohe Faserabbaubarkeit im Pansen hat positive Effekte auf die Futteraufnahme und die Leistung, ohne eine Beeinträchtigung der Pansenfunktion hervorzurufen. Ein erhöhter Anteil solcher Grundfuttermittel auf Kosten von Kraftfutter, aber unter Beibehaltung der Energiedichte, erhöht die Kau- und Wiederkauaktivität, stimuliert die Fresslust, verbessert das Fressverhalten und verringert somit das Risiko für eine Beeinträchtigung der Pansenfunktion (ZEBELI et al. 2006). Hier sind vor allem Maissilage mit ihrem hohen Energiegehalt und dem hohen Anteil pansenabbaubarer Faser, früh geerntete Grassilage mit ihrem hohen Futter- und Strukturwert, sowie Luzernsilage wegen ihres hohen Gehaltes an leicht abbaubarer Faser und Protein, aber auch faserreiche Nebenprodukte zu nennen (ZEBELI et al. 2010).

6.3 Faserlänge in der Ration überprüfen

Neben der Qualität der faserreichen Futtermittel, spielt vor allem die Faserlänge eine entscheidende Rolle. Eine zu geringe Partikellänge führt zur schlechteren Schichtung des Panseninhaltes und damit zu geringerer Wiederkauaktivität und Pansenmotorik, was zur Reduktion von ruminalem pH-Wert und Futteraufnahme, Faserabbau und Futtermittelverwertung führt (TAF AJ et al. 2007). Im Gegensatz dazu kann eine moderate Abnahme der Partikellänge (z.B. eine theoretische Häcksellänge von etwa 8 mm bei Maissilage bzw. 11 mm bei Grassilage) durch die höhere Oberfläche der Faserpartikel deren Verdaulichkeit im Pansen und die Futteraufnahme verbessern, ohne den Strukturwert negativ zu beeinflussen (ZEBELI et al. 2012). Eine moderate Reduzierung der Partikellänge des Grundfutters führt zudem zu einer besseren Homogenität der TMR mit geringerer Selektion einzelner Komponenten. Eine geringere Selektion der Ration hat positive Auswirkungen auf die zirkadiane Verteilung der Futter- und Faseraufnahme, was sich nicht nur positiv auf die Pansenfermentation auswirken kann, sondern auch auf die Futteraufnahme (ZEBELI et al. 2009). Um die optimale Partikelgröße der Faser festzulegen, muss diese im Zusammenhang mit dem Raufutter-, Faser- und Stärkeanteil der



Abbildung 1: Penn State Particle Separator („Schüttelbox“) mit 2 Sieben und Wanne

Ration sowie mit den technologischen Gegebenheiten bei der Herstellung und Fütterung der Ration beurteilt werden (TAF AJ et al. 2007).

Zur Bestimmung der Partikellänge wird meist der Penn State Particle Separator (PSPS), auch als „Schüttelbox“ bezeichnet, eingesetzt (Abbildung 1), der im Zuge einer definierten Schüttelbewegung auf 2 (19 und 8 mm) oder 3 (19, 8 und 1,18 mm) Sieben mit definierter Lochung und in der darunter befindlichen Wanne nach Partikellänge aufgeteilte Fraktionen des überprüften Futtermittels auffängt und damit eine objektive Beurteilung der Partikelverteilung zulässt (KONONOFF et al. 2003). Mit diesem Instrument ist es relativ leicht möglich, die Partikelgrößenverteilung von TMR und Grobfutter vor Ort zu bestimmen. KONONOFF et al. (2003) empfehlen die Anwendung eines Gerätes mit drei Siebböden (19 mm, 8 mm Rundloch und 1,18 mm Quadratloch) und definieren die Anwendung bezüglich Hublänge (17 cm), Frequenz ($\geq 1,1$ Hz) und Zahl der Bewegungen (40, 2×5 in jede Richtung), um eine bessere Standardisierung der Ergebnisse zu erzielen. Folgende Faustzahlen sollen dazu dienen, die Partikelverteilung der Ration besser abzuschätzen und die Verfütterung einer Ration mit zu geringer Faserlänge zu vermeiden: Die Fraktion der Partikel > 19 mm sollte mehr als 5 % der Ration ausmachen und die der Partikel $< 1,18$ mm nicht weniger als 20 % der Ration darstellen (KONONOFF et al. 2003). Außerdem kann anhand des NDF-Gehaltes des Futtermittels und des prozentualen Anteiles der Fraktionen im 19-, 8- und 1,18 mm Sieb der Gehalt an $\text{peNDF}_{>8}$ (Inhalt aus dem 8- und 19 mm Sieb, LAMMERS et al. 1996), oder $\text{peNDF}_{>1,18}$ (Inhalte aus dem 1,18-, 8- und 19 mm Sieb, KONONOFF et al. 2003) errechnet werden. Dabei handelt es sich um Parameter, die den Gehalt an strukturierter Faser gut und relativ einfach charakterisieren und zur Beurteilung und Korrektur von Rationen in der Praxis verwendet werden können (ZEBELI et al. 2012).

6.4 Effekte des Strukturgehaltes in der Ration auf die Futteraufnahme beachten

Der Faseranteil in der Ration hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Futteraufnahme, indem ein hoher Gehalt an peNDF die Futteraufnahme durch eine hohe Pansenfüllung mechanisch limitieren könnte, eine sehr niedrige Faseraufnahme jedoch die Fermentation schnell abbaubarer Produkte erhöhen und das Pansenmilieu so beeinträchtigen kann, dass die Futteraufnahme metabolischen Grenzen unterliegt. Der tatsächliche Effekt der Partikelgröße auf die TM-Aufnahme hängt im Einzelfall von den verwendeten Futtermitteln und deren ruminaler Abbauraten, sowie vom Verhältnis von faserreichen zu stärkereichen Futtermitteln ab (TAF AJ et al. 2007). Ein Anheben der peNDF in Rationen mit einem hohen Anteil ruminal abbaubarer Stärke mag zwar die TM-Aufnahme reduzieren und damit negative Effekte auf die Milchleistung haben, es wurde aber beobachtet, dass sich der dadurch ansteigende Milchfettgehalt positiv auf die FCM-Leistung auswirkte und damit die Futtermittelverwertung insgesamt anstieg (SILVEIRA et al. 2007). Diese Beobachtung wurde durch ZEBELI et al. (2008) bestätigt, in deren Studie ein Anstieg der peNDF auf bis zu 32 % der TM zwar die TM-Aufnahme und die Milchleistung reduzierte, der Ertrag der FCM und die Energieeffizienz der Milchbildung wurden dadurch jedoch signifikant erhöht.

Je nach zu Grunde liegender Ration wurden bisher Empfehlungen von mindestens 19 % bzw. 22 % $\text{peNDF}_{>1,18}$ in der TM zum Erhalt eines durchschnittlichen ruminalen pH-Wertes von etwa 6,0 abgegeben. Wie *Abbildung 2* zeigt, führt ein Gehalt von $< 14,9\%$ $\text{peNDF}_{>8}$ zu einem erhöhten SARA Risiko (ZEBELI et al. 2012). Da eine große Menge peNDF in der Ration die Futteraufnahme und -verwertung sowie die Energiedichte der Ration reduzieren, ist auch die Bestimmung einer Obergrenze von Faser in der Ration sinnvoll. Bei einem Gehalt von etwa 30 % $\text{peNDF}_{>1,18}$ in der TM und einem pH-Wert von ca. 6,2 scheint es durch eine weitere Steigerung des strukturierten Faseranteils keine Verbesserung des ruminalen pH-Wertes zu geben (ZEBELI et al. 2006), obwohl der Milchfettgehalt bei höheren peNDF Gehalten weiter steigt. Es zeigte sich jedoch durch die Erhöhung des peNDF Gehaltes von 29 auf 33 % eine Steigerung der Frequenz der Mahlzeiten von 8 auf 10 pro Tag (YANG und BEAUCHEMIN 2007), wobei die höhere Mahlzeitenfrequenz geringere pH-Wert Schwankungen und eine kürzere Periode mit $\text{pH} < 5,8$ zur Folge hatte.

Obwohl das Konzept von peNDF die chemische Zusammensetzung der Faser und deren Partikellänge in einem Parameter vereint, werden Aspekte der ruminalen Abbaubarkeit der Futtermittel, vor allem der in der Ration enthaltenen Stärke, nicht berücksichtigt, weshalb peNDF nur unter Berücksichtigung dieser Aspekte ein vollständiges Bild der Ration und ihrer Effekte auf die Pansengesundheit zulässt. Das Verhältnis von peNDF zu pansenabbaubarer Stärke aus Getreide (RDSG) ist direkt proportional zum Pansen-pH-Wert, wobei auch hier ab einem Verhältnis von 1,45 und dem korrespondierenden pH-Wert von 6,2 keine weitere Erhöhung des pH-Wertes möglich ist. Das bedeutet, dass zur Sicherstellung des optimalen ruminalen pH-Wertes ein peNDF zu RDSG Verhältnis von 1,45 nicht unterschritten werden soll, da bei einem höheren Stärke- oder geringeren Faseranteil der pH-Wert im Pansen sinkt (ZEBELI et al. 2008). Man muss jedoch sagen, dass dieses Verhältnis unter

praktischen Bedingungen bei Hochleistungskühen nicht einfach zu erzielen ist.

In *Abbildung 2* kann man 3 verschiedene Risikogruppen für SARA definieren, die sich durch unterschiedliche Leistungsstadien auszeichnen. Der Bereich, in dem sich die Rationen für die Hochlaktation befinden, ist durch einen niedrigen ruminalen pH-Wert aber eine maximale TM-Aufnahme ($> 23,5$ kg/Tag) auf Grund eines geringen Faser-Anteils in der Ration gekennzeichnet. Diese Tiere haben ein sehr hohes Risiko, SARA zu entwickeln. Der Bereich, der die Rationen für Tiere mit geringerer Leistung zeigt, ist durch einen mittleren Pansen pH-Wert von etwa 6,2 gekennzeichnet, begleitet von einer reduzierten TM-Aufnahme (< 22 kg/Tag) auf Grund des ausgesprochen hohen peNDF Anteils in der Ration. Im Überschneidungsbereich sind die Rationen anzusiedeln, deren peNDF Gehalt nicht hoch genug für einen optimalen Pansen pH-Wert ist, der aber die Futteraufnahme nur wenig beeinflusst. Tiere, die solche Rationen erhalten, haben ein deutlich geringeres Risiko, an SARA zu erkranken, als die hochleistenden Tiere. Hier wird einmal mehr deutlich, dass in der Formulierung von Rationen für die hochleistende Milchkuh Kompromisse zwischen Faserversorgung und Kohlenhydrat- bzw. Futteraufnahme gemacht werden müssen.

7. Schlussfolgerungen

Die Aufrechterhaltung eines physiologischen Pansen-pH-Wertes ist von großer Wichtigkeit, da die Begleiterscheinungen und Folgen einer SARA in Form von systemischen Entzündungen und Stoffwechsellentgleisungen sowohl die Gesundheit als auch das Wohlbefinden und die Leistung der Milchkuh in der Hochlaktation stark beeinträchtigen können. Der ruminale pH-Wert, die Versorgung mit strukturierter Faser und pansenabbaubarer Stärke, die TM-Aufnahme und die Passagerate stehen in engem Zusammenhang. Unter Berücksichtigung dieser Interaktionen können Rationen zusammengestellt werden, die ein günstiges Verhältnis zwischen pansenabbaubarer Stärke und Faser aufweisen und diese in hoher Qualität bereitstellen. So lässt sich der ruminale pH-Wert, die Passagerate, die Verdaulichkeit der Einzelkomponenten und damit die Nährstoffeffizienz und Leistung optimieren und Krankheitserscheinungen vorbeugen.

8. Literatur

- ALZHALO, M.M. OR-RASHID, S.L. GREENWOOD und B.W. MCBRIDE, 2010: Effect of subacute ruminal acidosis on milk fat concentration, yield and fatty acid profile of dairy cows receiving soybean oil. *J. Dairy Res.* 77, 376-384.
- AMETAJ, B.N., Q. ZEBELI und S. IQBAL, 2010: Nutrition, microbiota, and endotoxin-related diseases in dairy cows. *Rev. Bras. Zootec.* 39, 433-444.
- BREVES, G. und M. RODEHUTSCORD, 1999: Gibt es Grenzen in der Zucht auf Leistung? – Aus der Sicht der Physiologie. *Züchtungskde.* 71, 420-427.
- 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.

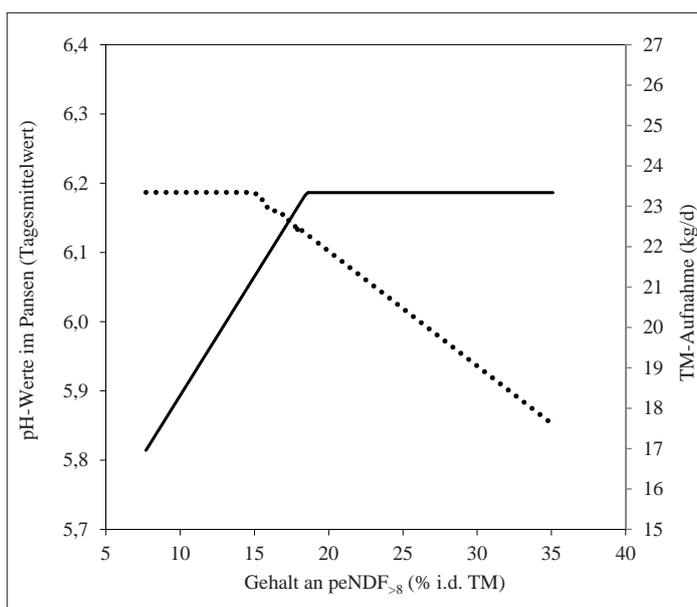


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen peNDF (Partikel über 8 mm) und dem täglichen mittleren Pansen pH-Wert bzw. der resultierenden Trockenmasseaufnahme; Täglicher mittlerer pH-Wert (—) und TM-Aufnahme (--) bei Milchkühen (ZEBELI et al. 2012)

- DIJKSTRA, J., J.L. ELLIS, E. KEBREAB, A.B. STRATHE, S. LÓPEZ, J. FRANCE und A. BANNINK, 2012: Ruminant pH regulation and nutritional consequences of low pH. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172, 22-33.
- FERNANDO, S.C., H.T. PURVIS II, F.Z. NAJAR, L.O. SUKHARNIKOV, C.R. KREHBIEL, T.G. NAGARAJA, B.A. ROE und U. DeSILVA, 2010: Rumen microbial population dynamics during adaptation to a high-grain diet. *Appl. Environ. Microbiol.* 76, 7482-7490.
- GRUBER, L., T. GUGGENBERGER, A. STEINWIDDER, J. HÄUSLER, A. SCHAUER, R. STEINWENDER und B. STEINER, 2001: Vorhersage der Futteraufnahme von Milchkühen auf Basis der Fütterungsversuche der BAL Gumpenstein. Bericht 28. Viehwirtschaftliche Fachtagung, BAL Gumpenstein, 2.-3. Mai 2001, 11-36.
- KAMPHUES, J., M. COENEN, C. IBEN, E. KIENZLE, J. PALLAUF, O. SIMON, M. WANNER und J. ZENTEK, 2009: Supplemente zu Vorlesungen und Übungen in der Tierernährung, 11. Aufl, M.&H. Schaper Verlag, Alfeld (Leine), 386 S.
- KHAFIPOUR, E., D.O. KRAUSE und J.C. PLAIZIER, 2007: Induction of subacute ruminal acidosis (SARA) by replacing alfalfa hay with alfalfa pellets does not stimulate inflammatory response in lactating dairy cows. *J. Anim. Sci.* 85 (Suppl. 1)/*J. Dair. Sci.* 90 (Suppl. 1)/*Poult. Sci.* (Suppl. 1), 654.
- KLEEN, J.L., G.A. HOOIJER, J. REHAGE und J.P. NOORDHUIZEN, 2003: Subacute ruminal acidosis (SARA): a review. *J. Vet. Med. A Physiol. Pathol. Clin. Med.* 50, 406-414.
- KLEEN, J.L. und C. CANNIZZO, 2012: Incidence, prevalence and impact of SARA in dairy herds *Anim. Feed Sci. Technol.* 172, 4-8.
- KONONOFF, P.J., A.J. HEINRICHS und D.A. BUCKMASTER, 2003: Modification of the Penn State forage and TMR separator and the effects of moisture content on its measurements. *J. Dairy Sci.* 86, 1858-1863.
- KRAUSE, K.M. und G.R. OETZEL, 2006: Understanding and preventing ruminal acute acidosis in dairy herds: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126, 215-236.
- LAMMERS, B.P., D.R. BUCKMASTER und A.J. HEINRICHS, 1996: A simplified method for the analysis of particle sizes of forage and total mixed rations. *J. Dairy Sci.* 79, 922-928.
- MATTHE, A., P. LEBZIEN und G. FLACHOWSKY, 2000: On the relevance of bypass starch for glucose supply of high-producing dairy cows. *Übers. Tierernährg.* 28, 1-64.
- MATTHE, A., P. LEBZIEN, I. HRIC, G. FLACHOWSKY und A. SOMMER, 2001: Effect of starch application into proximal duodenum of ruminants on starch digestibility in the small and total intestine. *Arch. Anim. Nutr.* 55, 351-369.
- MOURIÑO, F., R. AKKARAWONGSA 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.
- NAGARAJA, T.G., 2000: Liver abscesses in beef cattle – potential for dairy monitoring? *Proc. 33rd Annual Convention of the Americ. Assoc. of Bovine Pract.*, Rapid City, 65-68.
- NAGARAJA, T.G. und K.F. LECHTENBERG, 2007: Liver abscesses in feedlot cattle. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 23, 351-369.
- NOCEK, J.E., 1997: Bovine acidosis: implications on laminitis. *J. Dairy Sci.* 80, 1005-1028.
- OFFNER, A., A. BACH und D. SAUVANT, 2003: Quantitative review of in situ starch degradation in the rumen. *Anim. Feed Sci. Technol.* 106, 81-93.
- ÖLSCHLÄGER, V., I. WEBER, W. VAHJEN, M. TAJFAJ, O. SIMON und W. DROCHNER, 2006: Effect of hay particle size and concentrate level on the main cellulolytic bacteria in the rumen of dairy cows. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.*, 147
- PLAIZIER, J.C., D.O. KRAUSE, G.N. GOZHO und B.W. McBRIDE, 2008: Subacute ruminal acidosis in dairy cows: the physiological causes, incidence and consequences. *Vet. J.* 176, 21-31.
- PLAIZIER, J.C., E. KHAFIPOUR, S. LI, G.N. GOZHO und D.O. KRAUSE, 2012: Subacute ruminal acidosis (SARA), endotoxins and health consequences. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172, 9-21.
- SILVEIRA, C., M. OBA, K.A. BEAUCHEMIN und J. HELM, 2007: Effect of grains differing in expected ruminal fermentability on the productivity of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 90, 2852-2859.
- SPIEKERS, H. und V. POTTHAST, 2004: Erfolgreiche Milchviehfütterung, 4. Aufl., DLG-Verlag.
- STEINGASS, H. und Q. ZEBELI, 2008: Strukturbewertung von Rationen für Milchkühe. 35. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 9.-10. April 2008, 19-25.
- TAJFAJ, M., M. SCHOLLENBERGER, J. FEOFLOWA, Q. ZEBELI, H. STEINGASS und W. DROCHNER, 2006: Relationship between thiamine concentration and fermentation patterns in the rumen fluid of dairy cows fed with graded concentrate levels *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 90, 335-343.
- TAJFAJ, M., Q. ZEBELI, CH. 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.
- YANG, W.Z. und K.A. BEAUCHEMIN, 2006: 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, 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. TAJFAJ, H. STEINGASS, B. METZLER und W. DROCHNER, 2006: 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., J. DIJKSTRA, M. TAJFAJ, 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, 2046-2066.
- ZEBELI, Q., B.N. AMETAJ, B. JUNCK und W. DROCHNER, 2009: Maize silage particle length modulates feeding patterns and milk composition in loose-housed lactating Holstein cows. *Livest. Sci.* 124, 33-40.
- ZEBELI, Q., D. MANSMANN, H. STEINGASS und B.N. AMETAJ, 2010: Balancing diets for physically effective fibre and ruminally degradable starch: A key to lower the risk of sub-acute rumen acidosis and improve productivity of dairy cattle. *Livest. Sci.* 127, 1-10.
- ZEBELI, Q., S.M. DUNN und B.N. AMETAJ, 2011: Perturbations of plasma metabolites correlated with the rise of rumen endotoxin in dairy cows fed diets rich in easily degradable carbohydrates *J. Dairy Sci.* 94, 2374-2382.
- ZEBELI, Q., J.R. ASCHENBACH, M. TAJFAJ, J. BOGUHN, B.N. AMETAJ und W. DROCHNER, 2012: Invited Review: Role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95, 1041-1056.
- ZEBELI, Q. und B. METZLER-ZEBELI, 2012: Interplay between rumen digestive disorders and diet-induced inflammation in dairy cattle. *Res. Vet. Sci.* (in Press).