

Aktuelle Entwicklungen in der Energie- und Proteinbewertung für Wiederkäuer

Current progress of energy and protein evaluation for ruminants

Karl-Heinz Südekum^{1*}

Zusammenfassung

Neuere Untersuchungen zum Energieumsatz von Milchkühen sowie Auswertungen älterer Daten zeigen, dass die von der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GfE) im Jahre 2001 gegebenen Empfehlungen zur Energieversorgung auf Basis der Nettoenergie Laktation (NEL) nicht mehr dem heutigen Kenntnisstand entsprechen. Zukünftig werden das Energielieferungsvermögen von Futtermitteln und der Bedarf der Milchkühe auf der Stufe der Umsetzbaren Energie (ME, metabolisable energy) angegeben. Verbunden damit sind wesentliche Änderungen in der Ermittlung der ME von Futtermitteln, die im Beitrag skizziert werden. Ein neues Proteinbewertungssystem wird ebenfalls 2023 eingeführt mit der zentralen Kenngröße „dünnarmverdauliches Protein“, ausgedrückt als Gesamt-Aminosäuren (AA, amino acids) multipliziert mit 6,25. Das neue System erlaubt die Berücksichtigung erstlimitierender AA ähnlich wie bei Schweinen und Geflügel. Weitere Variablen im System betreffen die Kinetik des ruminalen Abbaus von Rohprotein und AA, das AA-Muster des in den Dünndarm fließenden mikrobiellen Proteins und die Dünndarmverdaulichkeit sowohl der mikrobiellen AA als auch der AA im pansenstabilen Futterprotein. Das neue System erlaubt eine präzisere Rationsgestaltung, verbessert die Passfähigkeit von AA-Versorgung und -Bedarf und letztendlich auch die Stickstoffnutzungseffizienz.

Schlagwörter: Aminosäuren, Bedarf, Kinetik, Milchkühe, Versorgung

Summary

Recent progress and re-evaluation of previous data were major reasons for the Committee for Requirement Standards (AfBN) of the Society of Nutrition Physiology (GfE) to change the net energy for lactation (NEL) system for dairy cattle to a metabolisable energy (ME) system. Significant changes in the process of estimating ME values of feedstuffs will be addressed in this contribution. Based on extended data and knowledge a new protein evaluation system will be introduced in 2023 with the key variable small intestinally digestible protein, expressed as total amino acids (AA) multiplied with 6.25. The new system also allows accounting for first-limiting AA similar to the approaches used in pig and poultry nutrition. Ruminal degradation kinetics of feed crude protein and AA, the AA composition of microbial protein flowing to the duodenum and small intestinal digestibility of ruminally undegraded and microbial AA are variables of the new system, which will be briefly addressed. The new system helps to improve ration calculation, allows a better match of amino acid supply with requirements and will also improve nitrogen use efficiency.

Keywords: Amino acids, requirements, kinetics, dairy cattle, supply

¹ Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Institut für Tierwissenschaften, Endenicher Allee 15, D-53115 Bonn

* Ansprechpartner: Univ.-Prof. Dr. Karl-Heinz Südekum, email: ksue@itw.uni-bonn.de

1. Einleitung

Die aktuellen Versionen von Futterbewertungssystemen für landwirtschaftliche Nutztiere und die damit zusammenhängenden Energie- und Nährstoffbedarfsangaben geben in der Regel den Stand des Wissens wieder, der von den Verfassern der Systeme als experimentell soweit gesichert angesehen wird, dass er als tragfähige Basis für verallgemeinerungsfähige Empfehlungen zur Rationsgestaltung dienen kann. Dies bedeutet implizit, dass zum einen grundsätzlich alle Futterbewertungssysteme Veränderungen und Weiterentwicklungen offenstehen und zum anderen, dass in besonderen Einzelfällen – etwa bei Rationen mit sehr hohen Anteilen einzelner Futtermittel – die Empfehlungen die realen Anforderungen nicht adäquat abzudecken vermögen. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass seit dem Erscheinen der „blauen Broschüre“ für Milchkühe und Aufzuchtrinder (GfE 2001) vielfach diskutiert wurde, ob die dort abgeleiteten Versorgungsempfehlungen noch hinreichend genau für die Versorgung von Milchkühen sind. Der Ausschuss für Bedarfsnormen (AfBN) der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GfE) hat in den vergangenen Jahren sowohl die Bedarfsableitung als auch die Versorgungsempfehlungen für Energie und Nährstoffe und weitere Themen grundlegend überarbeitet, so dass das oben zitierte Werk von 2001 im Jahr 2023 durch eine neue, wesentlich erweiterte Ausgabe ersetzt wird.

Nachfolgend werden wesentliche neue Kenngrößen der Energie- und Proteinbewertung für Milchkühe in knapper Form vorgestellt und kurz erläutert, die im AfBN der GfE erarbeitet und kürzlich auf der 77. Jahrestagung der GfE in Göttingen (07.-09.03.2023) im Rahmen eines Workshops erstmals in einem Überblick vorgestellt wurden. Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrags liegt auf den Neuerungen in der Futtermittelbewertung, vor allem für das Protein. Veränderungen im Bedarf und dessen Ableitung, die es ebenfalls geben wird, sind nicht Inhalt dieses Beitrags. Die GfE wird die vollständig überarbeiteten Ableitungen zu Bedarf und Versorgungsempfehlungen für Energie und Nährstoffe in diesem Jahr veröffentlichen und im Herbst in einer Veranstaltung ausführlich vorstellen und mit allen Interessierten diskutieren. Der exakte Termin und der Veranstaltungsort werden rechtzeitig kommuniziert.

2. Energiebewertung

Das Energielieferungsvermögen der Futtermittel für Milchkühe wird zukünftig auf der Stufe der Umsetzbaren Energie (ME, metabolisable energy) abgebildet. Damit gilt zukünftig nicht nur für alle Wiederkäuerspezies unter den Nutztieren, sondern für alle Nutztierarten, einschließlich der Pferde, die Bewertungsstufe ME für die Futtermittelbewertung und entsprechend auch für die Angabe des Energiebedarfs. Das hat auch für den Vergleich relativer Vorzüglichkeiten der Verwendung von Futtermitteln für verschiedene Tierarten erhebliche Vorteile. Durch die Verwendung der ME wird auch sichergestellt, dass zukünftig neue Erkenntnisse zum Bedarf auf der einen und zur Futtermittelbewertung auf der anderen Seite unabhängig voneinander und in einfacher Weise berücksichtigt werden können, da mit der ME eine klare Trennung von Futtermittelbewertung und Bedarfsableitung vorgenommen wird. Die Umstellung vom bisherigen System der Nettoenergie Laktation (NEL) auf die ME ist relativ unproblematisch, da auch die NEL die ME als Grundlage hat und standardisierte, etablierte Verfahren zur routinemäßigen Bestimmung des Futterwertes ihre Gültigkeit behalten.

Neben der Verlagerung der Bewertungsstufe von NEL auf ME wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der ME-Konzentrationen von Futtermitteln verändert, die bisher auf der Basis der Konzentration an verdaulichen Rohnährstoffen berechnet wurde. Zukünftig wird ein dreistufiges Verfahren angewendet. Zentraler Ausgangspunkt ist die Verdaulichkeit der Organischen Masse (OMD, organic matter digestibility). Da sich die Verdaulichkeit der Energie (ED, energy digestibility) durch eine konstante Differenz von der OMD unterscheidet, lässt sich die Konzentration an Verdaulicher Energie (DE, digestible energy)

auch aus dem Brennwert bestimmen. Um von der DE zur ME zu gelangen, wird der Verlust an Harnenergie aus der Konzentration des Futters an Rohprotein (CP, crude protein) abgeleitet und die Verluste an Methanenergie aus der OMD. Die ME-Konzentration einer Ration ist damit allein auf Basis der Bestimmung des Brennwertes, der OMD und der CP-Konzentration ableitbar. Dieser ME-Wert repräsentiert den standardisierten, d.h. bei einem Futteraufnahmeniveau nahe dem energetischen Erhaltungsbedarf, beim Rind oder Schaf ermittelten energetischen Futterwert.

3. Proteinbewertung

Von der GfE (2001) wurde das nutzbare Rohprotein am Duodenum (nXP) als zentrale Größe des Proteinbewertungssystems für Milchkühe und Aufzuchtrinder festgelegt, d.h. sowohl der Bedarf der Tiere als auch die durch eine gegebene Ration maßgebliche Versorgung werden in der Größe nXP angegeben. Zur Schätzung des nXP aus Rationskenngrößen wurden von Lebzién et al. (1996) Gleichungen publiziert, die als wichtigste Einflussfaktoren die Aufnahme an ME oder verdaulicher OM und an Futter-CP enthalten. Eine moderate Verbesserung der Schätzgenauigkeit ergab sich bei Einbeziehung des im Pansen nicht abgebauten Futter-CP (UDP, ruminally undegraded crude protein) als Anteil am CP.

Bei den Ableitungen zum nXP-System der GfE (2001) wurde nicht berücksichtigt, dass sowohl die nXP- als auch die UDP-Werte von der Geschwindigkeit des Nährstoffumsatzes in den Vormägen und der Passage des Chymus in den Dünndarm verändert werden. Die Versuche, die zur Ableitung des Systems verwendet wurden, wiesen eine Variation dieser Faktoren auf – z.B. bedingt durch stark unterschiedliche Trockenmasse-(TM)-Aufnahmen –, die jedoch nur selten gezielt als Faktor verwendet wurde. Darüber hinaus beinhaltet das nXP-System, dass Eigenschaften des Futtermittels, die Bestandteile der Futtermittelbewertung sein sollten, bisher als Konstanten bei der Schätzung des Bedarfs an nXP berücksichtigt werden. So werden im nXP-System der Aminosäuren- (AA, amino acid) -N-(AAN)-Anteil am Duodenal-Nicht-Ammoniak-N (NAN) und dessen Absorbierbarkeit im Dünndarm – im Wesentlichen durch Eigenschaften des Futters bedingte Größen – als Komponente des Bedarfs angegeben. Nach der Erweiterung des Kenntnisstandes hinsichtlich futtermittelspezifischer oder durch technische Bearbeitung verursachter Unterschiede (z.B. Verfahren des Proteinschutzes) in der Dünndarmverdaulichkeit der AA aus dem UDP erwies sich dieses Vorgehen als ungünstig, weil dadurch keine flexible Anpassung der Vorgehensweise an neue Daten möglich ist. Gleiches gilt für das AA-Muster im Duodenalchymus, das im nXP-System als konstant angesehen wird. Dies ist jedoch angesichts variabler UDP-Anteile und AA-Gehalte im CP von Futtermitteln nicht schlüssig, weil sich diese Variation auch auf die Zusammensetzung der pansenstabilen AA (UDAA) und das gesamte AA-Muster im Duodenalchymus auswirkt.

3.1 Neue Merkmale

Der AfBN hat sich aus den oben geschilderten Gründen dafür entschieden, zukünftig die Summe der dünndarmverdaulichen AA zur Angabe des Bedarfs der Tiere und des Lieferungsvermögens von Futtermitteln zu verwenden. Ausgedrückt wird dies als dünndarmverdauliches Protein (sidP, small intestinally digestible protein) und kalkuliert als AAN multipliziert mit 6,25. Zusätzlich wird der Bedarf und das Lieferungsvermögen für einzelne dünndarmverdauliche AA (sidAA) kalkuliert, wodurch es möglich ist, die limitierende Wirkung einzelner essenzieller AA für die Proteinsynthese des Tieres zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise lässt eine präzisere, besser dem Bedarf der Tiere entsprechende Versorgung der Milchkühe mit AA erwarten, wodurch vermeidbare N-Ausscheidungen vermindert und die N-Nutzungseffizienz verbessert werden kann.

3.2 Ruminaler Rohprotein- und Aminosäurenabbau

Der Fluss an CP am Duodenum bei Fütterung einer bestimmten Ration ist nicht konstant, sondern hängt wesentlich von der Passagerate bzw. Verweildauer der Ingesta im Pansen ab. Eine Änderung der Passagerate bewirkt entsprechend der Abbaukinetik des CP eine Änderung im UDP und in den UDAA und somit auch im Fluss an CP und AA am Duodenum. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, auch für das UDP und die UDAA Werte für bestimmte Passageraten anzugeben. Der AfBN geht für den Zweck dieser Ableitung generell davon aus, dass das UDP vollständig aus AA besteht. Eine Schätzung des UDP *in situ* ist bereits integraler Bestandteil des Vorgehens (GfE 2022) und lässt sich auch mit laborbasierten Verfahren wie dem erweiterten Hohenheimer Futterwerttest (eHFT), der chemischen CP-Fraktionierung oder dem enzymatischen CP-Abbau vornehmen (siehe dazu STEINGASS und SÜDEKUM 2013).

Bezüglich der Schätzung des UDAA-Flusses am Duodenum erfolgte eine meta-analytische Auswertung von Daten aus 61 *in situ*-Studien mit 329 Beobachtungsmittelwerten, die sowohl Daten zur ruminale CP- als auch AA-Abbaubarkeit enthielten. Die ruminale Abbaubarkeit der essenziellen AA wurde aus der CP-Abbaubarkeit für den gesamten Datensatz und separat für proteinreiche Futtermittel (Rapsextraktionsschrote (n = 48) Sojaextraktionsschrote (n = 47), Getreideschlempen (n = 43) und andere Futtermittel mit mehr als 10 % UDP in der TM (n = 62)) geschätzt (WILD et al. 2022). Die sich ergebenden linearen Regressionsgleichungen ermöglichten eine Schätzung der ruminale AA-Abbaubarkeit mit hoher Genauigkeit. Bei Anwendung der Schätzgleichungen betragen die geschätzten AA-Abbaubarkeiten – unter Annahme einer mittleren ruminale CP-Abbaubarkeit von 60 % – 58 % (Isoleucin, Leucin) bis 63 % (Histidin). Die Differenzierung zwischen den proteinreichen Futtermitteln ergab eine ähnliche Schätzgenauigkeit und bei Anwendung der ermittelten Gleichungen nur eine geringe Variation der geschätzten AA-Abbaubarkeiten in der Größenordnung des Schätzfehlers. Differenzen zwischen der ruminale CP- und AA-Abbaubarkeit sind also überwiegend sehr gering und scheinen in erster Linie methodenbedingt zu sein. Der AfBN hat sich daher entschieden, in diesen Empfehlungen nicht zwischen einzelnen AA zu differenzieren, sondern den für die CP-Abbaubarkeit ermittelten Wert für alle AA derselben Proteinquelle zu verwenden. Eine differenzierte Vorgehensweise für verschiedene Futtermittelgruppen lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht begründen und erfolgt deshalb nicht.

Eine bedeutende Herausforderung bei der Bestimmung des UDP ist die Festlegung realistischer Passageraten in Abhängigkeit vom Futteraufnahme- und Leistungsniveau, um einen konsistenten Bewertungsrahmen zu erhalten. Dabei erscheint eine Differenzierung zwischen dem Grobfutter und dem Fluss kleiner Partikel (hauptsächlich Konzentrate) notwendig. Für Grobfutter dürften Passageraten auch im Hochleistungsbereich weniger als 5 %/h betragen (ZEBELI et al. 2007), während bei kleinen Partikeln eine raschere Passage angenommen werden kann. Dass diese jedoch, wie vom AFRC (1993) unterstellt, bis über 10 %/h betragen kann, erscheint aufgrund der vorliegenden experimentellen Befunde allerdings eine deutliche Überschätzung zu sein (siehe dazu etwa zahlreiche Quellenangaben bei ROTHFUSS et al. 1997).

Die Ableitung der Passagerate erfolgt zukünftig auf Basis der Schätzgleichungen von SAUVANT und NOZIÈRE (2016), in welchen die Höhe der Futteraufnahme sowie der Konzentratanteil als Haupteinflussgrößen auf die Passagerate ermittelt wurden. Der AfBN sieht jedoch von der Berücksichtigung des Konzentratanteils in der Ration bei der Ermittlung der Passagerate ab, da in Anbetracht der zugrundeliegenden Streuung der Schätzung der Einfluss des Konzentratanteils von untergeordneter Bedeutung zu sein scheint. Es erfolgt eine Differenzierung zwischen Grobfuttermitteln, Konzentraten und Rationen in Abhängigkeit von der Futteraufnahme, wobei ein mittlerer Konzentratanteil von 30 % unterstellt wird. Für Futtermittel, bei denen eine eindeutige Zuordnung zu Grobfuttermitteln oder Konzentraten nicht möglich ist (z.B. Saftfuttermittel), wird mit den Werten für Rationen gerechnet.

3.3 Fluss an mikrobiellen Aminosäuren aus dem Pansen

Grundsätzlich sind das mikrobielle CP (MCP) und darin gebundene AA am Duodenum in jedem Proteinbewertungssystem aufgrund ihres Beitrages zum duodenalen Proteinfluss die wichtigste, zugleich aber die am schwierigsten zu quantifizierende und mit der größten Unsicherheit behaftete Größe. Alle anderen mit der Proteinbewertung zusammenhängenden Aspekte wie der Fluss an UDP und die Verdaulichkeit der UDAA sowie der mikrobiellen AA sind demgegenüber als nachrangig zu erachten.

Neben dem UDP und den UDAA ist auch die Masse des MCP von der Passagerate betroffen. Eine höhere Passagerate verringert die Masse der gesamten in den Vormägen abgebauten OM, entsprechend wie es zuvor für den CP-Abbau beschrieben wurde. Da die mikrobielle Biomasse- und somit auch CP-Synthese von der Masse der im Pansen fermentierten OM abhängt, geht das MCP mit steigender Passagerate theoretisch zunächst zurück. Allerdings kann bei Erhöhung der Passagerate die Effizienz des mikrobiellen Wachstums, definiert als gebildetes MCP je Einheit fermentierter OM (g/kg; z.B. BRODERICK et al. 2010), verbessert sein, da unter diesen Bedingungen weniger mikrobielle Lysis sowie ein geringerer Anteil Erhaltungsbedarf am Energiebedarf der Mikroben zu Buche schlagen. Zumindest teilweise scheint dieser Effekt zu überwiegen, so dass es bei sehr hohen TM-Aufnahmen sogar zu einer höheren Effizienz mit größeren Mengen an MCP bzw. mikrobiellen AA am Duodenum kommen kann (zahlreiche Studien, erstmals ROBINSON et al. 1985).

In verschiedenen Proteinbewertungssystemen werden außerdem differenzierte Aussagen zum Umfang der gebildeten Mikrobenmasse in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der OM bzw. der Kohlenhydrate getroffen (VAN DUINKERKEN et al. 2011, SAUVANT und NOZIÈRE 2016). Dabei besteht für die gebildete MCP-Masse eine weitgehende Additivität der Werte der Einzelfuttermittel in der Ration (RUPP et al. 2021).

Eine umfangreiche Auswertung der Literatur zeigte zunächst, dass der MCP-Fluss mit Hilfe der DOM präziser vorherzusagen war als mit der im Pansen fermentierten OM, bereinigt um mikrobielle Masse (FOM, fermented organic matter; N. GRESNER, K. WILD, M. RODEHUTSCORD und K.-H. SÜDEKUM, unveröffentlicht). Allerdings wurde gleichzeitig deutlich, dass es sich bei dem Quotienten aus MCP und DOM um einen Wert mit großer Streuung handelt, die auch unter Zuhilfenahme zahlreicher Rationscharakteristika nicht systematisch vermindert werden konnte.

3.4 Dünndarmverdaulichkeit der mikrobiellen Aminosäuren und der Aminosäuren des im Pansen nicht abgebauten Futterrohproteins

Im nXP-System wird die Absorbierbarkeit des AAN aus MCP und UDP im Dünndarm einheitlich mit 85 % angenommen (GfE 2001). Für die AA im MCP erscheint die Annahme einer konstanten Dünndarmverdaulichkeit auch unter Berücksichtigung neuerer Befunde gerechtfertigt. Die absolute Höhe der Dünndarmverdaulichkeit der mikrobiellen AA wurde unter Einbeziehung weiterer Literaturdaten (STORM et al. 1983, HVELPLUND und HESSELHOLT 1987, FESSENDEN et al. 2017) überprüft, wobei Daten, die mit caecotomierten Hähnen modellhaft für Rinder erhoben wurden (FONSECA et al. 2014), unberücksichtigt blieben. Demnach beträgt die mittlere Dünndarmverdaulichkeit des AAN von Pansenbakterien 85 %. Für einige mikrobielle AA wie beispielsweise Arginin, Isoleucin, Leucin und Methionin wurden höhere Werte für die Dünndarmverdaulichkeit angegeben. Die Unterschiede in der Dünndarmverdaulichkeit zwischen den AA ist jedoch relativ gering und der Datenumfang sehr begrenzt, so dass derzeit keine Differenzierung in der Dünndarmverdaulichkeit bakterieller AA vorgenommen wird. Die Verdaulichkeit einzelner protozoärer AA ist zwar niedriger als die der bakteriellen AA (FESSENDEN et al. 2017), dies ist jedoch auf Grund des mit 15 % geringen Beitrags der Protozoen zum MCP (N. GRESNER, K. WILD, M. RODEHUTSCORD und K.-H. SÜDEKUM, unveröffentlicht) von untergeordneter Bedeutung. Auch ist die Variation zwischen den Datensätzen

für Bakterien und Protozoen nicht größer als innerhalb der einzelnen Gruppen, sofern mehrere Messungen zu Grunde lagen (HVELPLUND und HESSELHOLT 1987, FESSENDEN et al. 2017). Eine Differenzierung der Dünndarmverdaulichkeit zwischen AA bakteriellen und protozoären Ursprungs wird daher nicht vorgenommen.

Bei der Schätzung der Dünndarmverdaulichkeit des UDP und der UDAA gibt es eine größere Variation. Die in der Literatur angegebenen Daten zur Dünndarmverdaulichkeit reichen von unter 40 % bei einzelnen UDAA im UDP von Kleien bis hin zu über 95 % bei Sojaextraktionsschrot. Folglich werden Angaben zur Dünndarmverdaulichkeit nicht nur für einzelne Futtermittel, sondern idealerweise auch für einzelne AA benötigt. Hierzu wurde bereits eine Übersicht erstellt, die bisher 25 Studien zu insgesamt 51 Futtermitteln enthält und kontinuierlich um neue Erkenntnisse ergänzt werden wird.

4. Schlussfolgerungen

Das nXP-System für Milchkühe und Aufzuchtrinder, hat sich mehr als 20 Jahre in vielen praktischen Anwendungen bewährt und auch im internationalen Vergleich gut abgeschnitten. Im vorliegenden Beitrag wurde vorgestellt, wie im neuen, kürzlich erstmals vorgestellten Proteinbewertungssystem mit dem dünndarmverdaulichen Protein als zentralem Merkmal bisherige Schwachstellen abgestellt, neue Variablen zur detaillierteren Charakterisierung des Protein- und Aminosäurenlieferungsvermögens von Futtermitteln gründlich geprüft und eingeführt wurden. Mit dem neuen System kann flexibel auf Herausforderungen reagiert werden, so dass es auch bei weiter verändernden Leistungen und Rationen leistungsfähig bleibt und zu einer Verbesserung der N-Nutzungseffizienz bei der Erzeugung von Milch als Lebensmittel tierischer Herkunft beitragen kann.

5. Literatur

AFRC (Agricultural and Food Research Council), 1993: Energy and Protein Requirements of Ruminants. CAB International, Wallingford, UK.

BRODERICK, G.A., P. HUHTANEN, S. AHVENJÄRVI, S.M. REYNAL und K.J. SHINGFIELD, 2010: Quantifying ruminal nitrogen metabolism using the omasal sampling technique in cattle—a meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 93, 3216-3230.

FESSENDEN, S.W., T.J. HACKMANN, D.A. ROSS, A. FOSKOLOS und M.E. VAN AMBURGH, 2017: Ruminal bacteria and protozoa composition, digestibility, and amino acid profile determined by multiple hydrolysis times. *J. Dairy Sci.* 100: 7211-7226.

FONSECA, A.C., S.M. FREDIN, L.F. FERRARETTO, C.M. PARSONS, P.L. UTTERBACK und R.D. SHAVER, 2014: Short communication: Intestinal digestibility of amino acids in fluid- and particle-associated rumen bacteria determined using a precision-fed cecectomized rooster bioassay. *J. Dairy Sci.* 97: 3855-3859.

GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie), 2001: Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchtrinder. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.

GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) 2022: Recommended protocol for the determination of nutrient disappearance in situ for estimation of ruminal degradation. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* 31, 177-189.

HVELPLUND, T. und M. HESSELHOLT, 1987: Digestibility of individual amino acids in rumen microbial protein and undegraded dietary protein in the small intestine of sheep. *Acta Agric. Scand.* 37, 469-477.

- LEBZIEN, P., J. VOIGT, M. GABEL und D. GÄDEKEN, 1996: Zur Schätzung der Menge an nutzbarem Rohprotein am Duodenum von Milchkühen. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 76, 218-223.
- ROBINSON, P.H., C.J. SNIFFEN und P.J. VAN SOEST, 1985: Influence of level of feed intake on digestion and bacterial yield in the forestomachs of dairy cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 65, 437-444.
- ROTHFUSS, H., K.-H. SÜDEKUM und M. STANGASSINGER, 1997: Ermittlung der Passage eines Markers im Verdauungstrakt von Milchkühen mit Hilfe unterschiedlicher Schätzverfahren: Einfluss von Laktationsstadium, Fütterungsniveau und Rationszusammensetzung. *Arch. Anim. Nutr.* 50, 43-61.
- RUPP, C., E. WESTREICHER-KRISTEN und A. SUSENBETH, 2021: *In situ* and *in vitro* determination of the protein value of feeds for ruminants. *Arch. Anim. Nutr.* 75, 329-344.
- SAUVANT, D. und P. NOZIÈRE, 2016: Quantification of the main digestive processes in ruminants: The equations involved in the renewed energy and protein feed evaluation systems. *Animal* 10, 755-770.
- STEINGASS, H. und K.-H. SÜDEKUM, 2013: Proteinbewertung beim Wiederkäuer – Grundlagen, analytische Entwicklungen und Ausblick. *Übers. Tierernährg.* 41, 51-73.
- STORM, E., D.S. BROWN und E.R. ØRSKOV, 1983: The nutritive value of rumen microorganisms in ruminants. 3. The digestion of microbial amino and nucleic acids in, and losses of endogenous nitrogen from, the small intestine of sheep. *Br. J. Nutr.* 50, 479-485.
- VAN DUINKERKEN, G., M. BLOK, A. BANNINK, J. CONE, J. DIJKSTRA, A. VAN VUUREN und S. TAMMINGA, 2011: Update of the Dutch protein evaluation system for ruminants: The DVE/OEB₂₀₁₀ system. *J. Agric. Sci.* 149, 351-367.
- WILD, K.J., K.-H. SÜDEKUM und M. RODEHUTSCORD, 2022: Meta-analysis on the estimation of ruminal amino acid degradability from crude protein degradability. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* 31, 91.
- ZEBELI, Q., M. TAJAJ, I. WEBER, J. DIJKSTRA, H. STEINGASS und W. DROCHNER, 2007: Effects of varying dietary forage particle size in two concentrate levels on chewing activity, ruminal mat characteristics, and passage in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 90, 1929-1942.