

Spurenelement- und Vitaminversorgung laktierender Kühe

W. WINDISCH

Spurenelemente und Vitamine zählen zu den Mikrokomponenten im Tierfutter, die im Stoffwechsel des Organismus unentbehrliche Funktionen innehaben und über die Nahrung zugeführt werden müssen. Bei unzureichender Aufnahme kommt es zu Ausfallerscheinungen im Stoffwechsel mit negativen Folgen für Leistung und Gesundheit der Tiere. Die spezifischen Symptome einer Unterversorgung mit einem Spurenelement oder Vitamin sind aus Fallstudien und gezielten Tierversuchen gut belegt. Unter normalen Fütterungsbedingungen sind klassische Anzeichen eines Mangels jedoch eher selten anzutreffen. Wahrscheinlicher sind dagegen suboptimale Versorgungssituationen mit mutmaßlicher Beteiligung an multifaktoriellen Störungen der Leistungsbereitschaft und Gesundheit, wie etwa Probleme mit Fruchtbarkeit, Klauen oder Mastitis. Aufgrund der enormen wirtschaftlichen Bedeutung dieser Problemkreise und der zumeist diffusen Ursachenspektren halten auch die Diskussionen um die Versorgung der Tiere mit essentiellen Spurenelementen und Vitaminen an. Gegenwärtig werden im Bereich der Spurenelemente insbesondere die organischen Verbindungen von Zink, Kupfer, Mangan und Selen diskutiert, und bei den Vitaminen hauptsächlich die B-Vitamine. In diesem Zusammenhang sollen nachfolgend die Aspekte des Stoffwechsels sowie der Fütterung bzw. Bioverfügbarkeit der gegenwärtig diskutierten Spurenelemente und Vitamine kurz dargestellt werden.

Zink, Kupfer und Mangan

Biologische Bedeutung und Intermediärstoffwechsel

Zink, Kupfer und Mangan bilden eine Gruppe von essentiellen Spurenelementen mit ähnlichen Eigenschaften in bezug auf ihre biochemischen Funktionen

und Stoffwechselwege. Sie zählen zu den sogenannten Übergangsmetallen, die aufgrund ihrer Elektronenkonfiguration zur Bildung von stabilen Chelaten mit mehreren Liganden neigen. Auf diese Weise entstehen beispielsweise Komplexe mit Proteinen, die erst durch den gezielten Einbau dieser Metalle ihre biologische Funktion erhalten. Ähnlich wie das Eisen im Häm-Molekül des Hämoglobins bilden auch Zink, Kupfer und Mangan in einer Vielzahl von Metalloenzymen die Schlüsselatome der aktiven Zentren. Beim Zink kommen strukturelle Funktionen hinzu, wie etwa beim sogenannten Zinkfinger-Motiv, einem weit verbreiteten Bauprinzip in Regulatorproteinen der Genaktivität. Insgesamt übernehmen die Spurenelemente höchst spezifische Stoffwechselfunktionen, deren Beeinträchtigung, etwa durch eine unzureichende Versorgungssituation, in weiterer Folge zu Ausfallerscheinungen des gesamten Organismus beitragen kann. Die betroffenen Problemkreise sind jedoch durchwegs multifaktoriell, was die Identifizierung einer suboptimalen Versorgungssituation an einem oder mehreren Spurenelementen als mutmaßlichen Auslöser oder Co-Faktor stark erschwert. Aus den spezifischen Funktionen von Zn, Cu und Mn im Stoffwechsel erwächst gleichzeitig auch ein erhebliches toxisches Potential. So können Biomo-

leküle durch unkontrollierte Komplexbildungen mit diesen Metallen ihre physiologische Funktion einbüßen. Für die Funktionstüchtigkeit biologischer Systeme ist es deshalb essentiell, die Mengen an Zn, Cu und Mn in den stoffwechselaktiven Bereichen der Zellen genauestens zu regulieren. So kommt beispielsweise Zink in der Zelle fast ausschließlich in spezifischen Trägerproteinen vor, deren Wechselwirkungen untereinander einer hochpräzisen molekularbiologischen Steuerung unterliegen. Auf der Ebene der Gewebe, Organe sowie des Ganzkörpers wird der Umsatz von Zn, Cu und Mn sehr genau reguliert, um die Balance zwischen einem hinreichenden metabolischen Angebot und der Vermeidung eines toxischen Überschusses zu wahren. Diese sogenannte homöostatische Regulation erfolgt hauptsächlich durch aktive Anpassung der Absorption aus dem Verdauungstrakt an den jeweiligen metabolischen Bedarf sowie teilweise auch durch Steuerung der endogenen fäkalen Exkretion (KIRCHGESSNER 1993, WINDISCH und KIRCHGESSNER 1995). Bei Kupfer und Mangan fungiert darüber hinaus auch noch die Leber als zusätzlicher Puffer (Deponierung bzw. Mobilisierung) zur Aufrechterhaltung des metabolischen Gleichgewichts.

Die homöostatischen Regulationsmechanismen sorgen dafür, dass der Netto-

Tabelle 1: Rahmenbedingungen der Fütterung von Zink, Kupfer, Mangan sowie mögliche Auswirkungen eines Mangels

Element	Versorgungsempfehlungen ¹⁾ (ppm)	Zulässiger Höchstwert (ppm)	Mögliche Auswirkungen einer Unterversorgung
Zink	50	250	Fressunlust, Klauenprobleme, Parakeratose, Fruchtbarkeitsstörungen, Anfälligkeit für Mastitis
Kupfer	10	35	Fruchtbarkeitsstörungen, Klauenprobleme, Störungen der Haarpigmentierung, Anämie
Mangan	50	250	Störungen der Fruchtbarkeit und Skelettentwicklung

¹⁾ GfE 2001

Autor: Univ.-Prof. Dr. Wilhelm WINDISCH, Institut für Nutztierwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 WIEN, email: windisch@boku.ac.at

strom an Zn, Cu und Mn vom Verdauungstrakt in das Körperinnere hinein den tatsächlichen metabolischen Bedarf nicht überschreitet, während überschüssige Mengen an Spurenelementen über den Kot wieder ausgeschieden werden. Dieses Prinzip ist Bestandteil der normalen Ernährungssituation, denn die Versorgungsempfehlungen beinhalten stets Sicherheitszuschläge.

Zufuhr über die Nahrung und Verdauung

Die durchschnittlichen Spurenelementgehalte der Futtermittel liegen bei Zink und Kupfer sowie teilweise auch bei Mangan zumeist unter den Versorgungsempfehlungen. Dies gilt insbesondere für die Maissilage. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Spurenelementgehalte vor allem bei Grundfuttermitteln eine enorme Schwankungsbreite aufweisen (WITTKOWSKI und SPANN 1993, GRUBER et al. 1994, FACHBERGER et al. 1997). Besonders auf trockenen Standorten und bei hohem pH-Wert muss aufgrund einer starken Festlegung im Boden mit niedrigen Konzentrationen an Zink, Kupfer und Mangan in der Pflanze gerechnet werden.

Weitere Störfaktoren der tatsächlich realisierten Spurenelementversorgung sind Interaktionen während der Verdauung und Absorption. Für das Spurenelement Kupfer treten die ersten antagonistischen Wirkungen bereits auf der Stufe der ruminalen Umsetzungen auf. Unter den reduktiven Verhältnissen der Vormägen entstehen aus schwefelhaltigen Verbindungen des Futters Sulfide, die ihrerseits schwerlösliches Kupfersulfid bilden. Dieser Effekt wird durch die Gegenwart von Molybdän noch weiter verstärkt (Bildung schwerlöslicher Cu-Komplexe mit Tetrathiomolybdat). Eisen steht ebenso in Verdacht, die Bildung schwerlöslicher Kupfersulfid-Komplexe zu fördern. Darüber hinaus ist Eisen ein Antagonist der Kupferabsorption im Dünndarm. Hohe Mengen an Eisen werden häufig über betriebseigenes Tränkewasser sowie über Erde aufgenommen (z.B. bei Weidegang). All diese Faktoren führen dazu, dass die Absorption von Kupfer bei Wiederkäuern im Vergleich zu Monogastriden sehr niedrig ist (1 - 5 %). Im Gegensatz zu Kupfer werden Zink und Mangan von ruminalen Interaktio-

nen kaum beeinflusst. Eine gewisse Ausnahme stellt der Abbau des Phytats durch die Vormagenflora dar. Diese Verbindung ist ein starker Komplexbildner für mehrwertige Kationen und trägt bei monogastrischen Spezies maßgeblich zur relativ niedrigen Bioverfügbarkeit des Zinks praxisüblicher Rationen bei (LANTZSCH 1990, WINDISCH und KIRCHGESSNER 1999). Wiederkäuer-Rationen scheinen jedoch weitere Komplexbildner mit ähnlich negativer Wirkung zu enthalten, die von der Vormagenflora nicht in dem Maße abgebaut werden wie Phytat (NRC 2001). Auf der Ebene der Absorption unterliegt insbesondere Zink der antagonistischen Wirkungen einer überhöhten Zufuhr von Eisen und Calcium (SOLOMONS 1986, WINDISCH und KIRCHGESSNER 1994).

Sicherstellung einer ausreichenden Versorgung

Die schwankenden Zn-, Cu- und Mn-Gehalte im Futter und die vielfältigen Störfaktoren entlang der Verdauungsvorgänge sind in den Versorgungsempfehlungen (Tabelle 1) bereits berücksichtigt, indem über den tatsächlichen Bruttobedarf hinaus angemessene Sicherheitszuschläge in die Empfehlungen eingearbeitet wurden. Unter normalen Fütterungsverhältnissen sollten diese Werte somit eine stets ausreichende Versorgung der Tiere mit Zn, Cu und Mn gewährleisten. Im Vergleich zu diesen Empfehlungen reichen die nativen Spurenelementgehalte insbesondere bei Zink und Kupfer sowie teilweise auch bei Mangan zumeist nicht aus. Eine Ergänzung über das Mineralfutter ist somit stets zu empfehlen (insbesondere bei Maissilage).

Bei der gezielten Spurenelementergänzung des Futters kommt auch die Bioverfügbarkeit der eingesetzten Mineralstoffquellen zum Tragen. So stehen derzeit vor allem die organischen Spurenelement-Verbindungen zur Diskussion, denen im Vergleich zu anorganischen Quellen eine überlegene Bioverfügbarkeit nachgesagt wird. Im Wiederkäuer-Bereich werden im wesentlichen folgende Gruppen an organischen Verbindungen verwendet:

• Metall-Aminosäure-Komplexe: Metallsalz + Aminosäure(n)

• Metall-Aminosäure-Chelate: Metallion + 1 bis 3 Aminosäuren

• Metall-Proteinat: Metallsalz + hydrolysiertes Protein

Studien zur Bioverfügbarkeit dieser Spurenelementquellen liegen hauptsächlich aus dem Bereich der monogastrischen Nutztiere vor. Sie lassen den allgemeinen Schluss zu, dass die organischen Verbindungen als „milde“ Komplexbildner wirken. Auf diese Weise werden die Spurenelemente vor negativen Interaktionen mit anderen Nahrungskomponenten geschützt und gelangen so in größerer Menge an den Ort der Absorption (z.B. WINDISCH 2002). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass auch innerhalb der anorganischen Quellen erhebliche Unterschiede in der Bioverfügbarkeit bestehen. Besonders niedrig rangieren die Oxide und Carbonate, während den Chloriden und Sulfaten in der Regel bereits gute Bioverfügbarkeiten zugewiesen werden (z.B. NRC 2001, WINDISCH 2002).

Die Befunde zur Bioverfügbarkeit werden allerdings vielfach fehlinterpretiert. So lassen unterschiedliche Bioverfügbarkeiten lediglich den Schluss zu, dass eine hochverfügbare Verbindung den metabolischen Bedarf des Organismus mit einer geringeren Menge deckt als eine Quelle mit niedriger Bioverfügbarkeit. Sobald jedoch der metabolische Bedarf gedeckt ist, sind die Spurenelementquellen als physiologisch gleichwertig zu betrachten, denn die homöostatische Gegenregulation des Stoffwechsels verhindert den Einstrom überschüssiger Mengen an Zink, Kupfer und Mangan in das Körperinnere unabhängig von deren ursprünglichen Bioverfügbarkeit im Futter (WINDISCH et al. 2003). Die Verwendung besonders hochverfügbarer Spurenelementquellen (z.B. organische Verbindungen) dient somit weniger der „Verbesserung“ der Versorgungslage über den Bedarf hinaus, sondern vielmehr der erhöhten Sicherheit einer ausreichenden Versorgung angesichts einer Vielzahl schwer kalkulierbarer Störfaktoren während der Verdauung und Absorption (v.a. beim Kupfer).

Selen

Biologische Bedeutung und Intermediärstoffwechsel

Der Stoffwechsel des Selen unterscheidet sich grundlegend von jenem der zuvor besprochenen Übergangsmetalle. So sind die biologischen Funktionen des

Selens nicht dem einzelnen Atom zuzuordnen (wie etwa einem Zn^{2+} in einem Proteinkomplex) sondern dem *Selenol* als Molekül ($-Se-H$), also einer funktionellen Gruppe, die dem Schwefelanalogon *Thiol* ($-S-H$) chemisch und funktionell nahe verwandt ist. Alle Selen-Verbindungen mit biologischer Funktion im Stoffwechsel sind Selenoproteine. Sie tragen das Selen stets in Form von Selenocystein, dem Analogon der schwefelhaltigen Aminosäure Cystein.

Selenoproteine sind wichtige Bestandteile von Antioxidations- und Redoxsystemen, die zumeist in Zusammenarbeit mit Vitamin E der Abwehr von oxidativem Stress dienen. Aus dieser Bedeutung im Stoffwechsel resultiert beispielsweise das Se-Mangelsymptom der Muskeldystrophie sowie der mutmaßliche Beitrag für eine verstärkte Anfälligkeit für Fruchtbarkeitsprobleme (z.B. MILLER et al. 1993). Eine weitere Querverbindung von spezifischen Funktionen des Selens zu multifaktoriellen Gesundheitsaspekten führt über den Stoffwechsel von mehrfach ungesättigten Fettsäuren zur Aktivität von Immunzellen und von da aus zur Ausprägung von Mastitiden bei unzureichender Selenversorgung (z.B. SMITH et al. 1984).

Die Gegenwart von Selenocystein (SeCys) in allen funktionellen Selenoproteinen verleitet häufig zur Annahme, dass SeCys oder ähnliche organische Selenverbindungen in der Nahrung eine hohe Bioverfügbarkeit aufweisen sollten. Der Einbau von SeCys in das funktionelle Selenoprotein erfolgt jedoch nicht direkt als Aminosäure während des ribosomalen Syntheseprozesses, sondern durch „Nachbesserung“ eines bereits synthetisierten Vorläuferproteins. Hierbei wird zunächst aus Serin und anorganischem Selenid extern das SeCys synthetisiert, das dann an einer bestimmten Aminosäuresequenz in das Vorläuferprotein eingefügt wird. Der Stoffwechsel des Selens arbeitet demnach grundsätzlich auf der Basis von anorganischem Selenid.

Wie die meisten essentiellen Spurenelemente ist auch Selen potentiell toxisch. Die Konzentration an Selenid im Inneren des Organismus unterliegt deshalb der homöostatischen Regulation. Hierbei stellt die Se-Absorption aus der Nahrung im Gegensatz zu den zuvor be-

schriebenen Übergangsmetallen keine regulative Barriere dar. So wird beispielsweise Selen aus anorganischem Selenit nahezu vollständig absorbiert, und zwar unabhängig von Versorgungsstatus an Selen (KIRCHGESSNER et al. 1997). Die homöostatische Regulation arbeitet dagegen auf der Basis der renalen Exkretion, die im Überschuss absorbiertes Selen über den Harn aus dem Körper eliminiert. Das hat zur Folge, dass eine bedarfsüberschreitende Zufuhr an Selen in anorganischer Form innerhalb des homöostatischen Regulationsbereichs (ca. 150 - 600 ppm Nahrungsselen) nur vergleichsweise geringe Wirkungen auf die Se-Konzentrationen im Gewebe hat (KIRCHGESSNER et al. 1997). Dies wird häufig als Ausdruck einer niedrigen Bioverfügbarkeit fehlinterpretiert. Die Tatsache, dass der Se-Stoffwechsel anorganisches Selen als Se-Quelle erkennt und auf eine Änderung der Zufuhr sofort und quantitativ adäquat reagiert, zeigt vielmehr, dass derartige Se-Verbindungen in hohem Maße bioverfügbar sind.

Zufuhr über die Nahrung und Verdauung

Die Versorgungsempfehlungen für Selen liegen bei 200 ppb in der Trockenmasse (GfE 2001), die maximal zulässige Obergrenze bei 500 ppb.

Im Futter kommt Selen hauptsächlich als Selenomethionin (SeMet) vor, dem Selen-Analogon der schwefelhaltigen Aminosäure Methionin. Die Se-Konzentration in der Pflanze hängt neben den Se-Gehalten des Untergrunds stark vom pH-Wert und der Belüftung des Bodens ab. Bei hohem pH-Wert und guter Durchlüftung bildet sich im Boden hauptsächlich Selenat, das von der Pflanze aufgenommen wird. In der Pflanze wird Selenat zu Selenid reduziert, in SeCys übergeführt und von da aus in SeMet. Letzteres reichert sich hauptsächlich in Proteinen mit niedrigem Turn-over an, wie etwa in Körnern und Samen (SCHRAUZER 2000). Auf diese Weise können proteinreiche Nebenprodukte der Verarbeitung von Körnern und Samen (z.B. Sojaextraktionsschrot) je Herkunft (Bodenbeschaffenheit) erhebliche Se-Gehalte in Form von SeMet aufweisen. Hefekulturen, die in Se-reichem Nährmedium wachsen, enthalten sogar bis zu 1000

ppb Se mit über 90 % SeMet (KELLY und POWER 1995). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Akkumulation von SeMet im Protein nicht etwa die gezielte Speicherung eines essentiellen Spurenelements darstellt. Es handelt sich vielmehr um eine Art Entgiftungsreaktion, mit der die Pflanze überschüssiges Selenid aus den stoffwechselaktiven Bereichen der Zelle eliminiert.

Als native Inhaltsstoffe von Futtermitteln unterliegen SeMet und SeCys dem gleichen Schicksal wie ihre schwefelhaltigen Analoga. Sie werden im Zuge der Verdauung aus dem Proteinverband gelöst und wie normale Aminosäuren mit sehr hoher Effizienz absorbiert (WINDISCH et al. 1997). Dies wird vielfach als Beleg für eine hohe Se-Bioverfügbarkeit angeführt. Es ist jedoch festzuhalten, dass Selen in dieser Form dem eigentlichen Se-Stoffwechsel nicht unmittelbar zur Verfügung steht, sondern als Aminosäure erkannt und in den Protein-stoffwechsel geschleust wird. Da der Organismus bei der ribosomalen Protein-synthese zwischen den Selenoamino-säuren und ihren Schwefelanaloga nicht unterscheiden kann, gelangen SeCys und SeMet irrtümlich an Positionen, die eigentlich für Cys und Met vorgesehen sind. Auf diese Weise kann sich Se in Proteinen mit niedriger Turn-over-rate anreichern, also in Haut, Haaren, Horn und Muskelgewebe sowie im Milch-eiweiß (WINDISCH et al. 1997). Die betroffenen Austauschpositionen zwischen Schwefel und Selen büßen hierbei ihre Funktionen ein, wie etwa die Quervernetzungen über Disulfidbrücken im Keratin. So hat chronischer Se-Überschuss typischerweise die Brüchigkeit von Haut, Haaren und Horn zur Folge. Das vielzitierte Potential organischer Selenquellen zur Anreicherung von Selen im Gewebe ist somit Ausdruck einer irrtümlichen Akkumulation, während das betroffene Selen durch Einbau in Proteine dem eigentlichen Se-Stoffwechsel entzogen wird (WINDISCH et al. 1997). Erst durch den Proteinabbau im Zuge des Turnovers und der Oxidation von Se-Aminosäuren wird das gebundene Selen freigesetzt und steht dem Se-Stoffwechsel als anorganisches Selenid nun zur Verfügung.

Se-Ergänzungen über das Mineralfutter erfolgen zumeist über anorganisches Se-

lenit oder Selenat. Aus Versuchen an Monogastriern ist bekannt, dass Selen aus diesen beiden Quellen sehr hoch absorbierbar ist (KIRCHGESSNER et al. 1997, WOLFFRAM et al. 1986). Nach der Absorption wird anorganisches Selen sofort zu Selenid reduziert und steht dem Se-Stoffwechsel damit unmittelbar zur Verfügung. Am Ort der Absorption (Dünndarm) stellt anorganisches Selen somit grundsätzlich eine hochverfügbare Se-Quelle dar. Beim Wiederkäuer unterliegt jedoch anorganisches Nahrungselens zuvor den Umsetzungen in den Vormägen. Aufgrund der dort herrschenden reduktiven Verhältnisse kann Selenit bzw. Selenat in größerem Umfang zu elementarem Selen bzw. Selenid reduziert werden, das entweder gar nicht oder nur noch schlecht absorbierbar ist. Auf diese Weise kann ein Großteil des metabolisch gut verfügbaren anorganischen Selens vor der eigentlichen Absorption verloren gehen. Dem gegenüber wird organisch gebundenes Futterselelen (hauptsächlich SeMet) in erheblichem Umfang unmittelbar in Bakterienprotein inkorporiert und der ruminalen Transformation rasch entzogen. Zwar können einige Mikroorganismen auch aus anorganischen Quellen Selenoaminosäuren synthetisieren (vor allem SeCys), aber im Vergleich zur direkten Übernahme von SeMet aus dem Futter scheint dieser Weg eine geringere quantitative Bedeutung zu haben (KOENIG et al. 1997).

Sicherstellung der Versorgung

Bei der bedarfsgerechten Fütterung von Milchkühen mit Selen steht man vor dem Dilemma, dass anorganische Verbindungen zwar grundsätzlich eine hohe Bioverfügbarkeit aufweisen, aufgrund der ruminalen Umsetzungen jedoch vor der Absorption in großen Mengen verloren gehen können. Andererseits gelangt über organische Se-Verbindungen zwar mehr Selen an den ruminalen Umsetzungen vorbei bis zum Dünndarm, das absorbierte Selen (vor allem SeMet) steht dem Se-Stoffwechsel jedoch nicht unmittelbar zur Verfügung. Dies betrifft insbesondere Milchkühe, die einen Großteil der absorbierten Aminosäuren (und damit des organischen gebundenen Selens) unmittelbar zur Synthese von Milcheiweiß heranziehen und über die Milch wieder ausscheiden. Eine Se-Versorgung über or-

ganisch gebundenes Selen arbeitet deshalb nur langfristig, denn das Körperprotein muss zunächst mit Selenoaminosäuren angereichert werden, damit es im Zuge des Protein-turn-overs über die Oxidation von SeMet bzw. SeCys fortlaufend anorganisches Selen an den Se-Stoffwechsel abgibt. Dieser Vorgang ist unspezifisch und kann auf eine Änderung der Bedarfssituation nicht angemessen reagieren. Dennoch scheint er eine gewisse Grundversorgung des intermediären Se-Stoffwechsels sicherzustellen, zumal die nativen Futterkomponenten ohnehin hauptsächlich organisch gebundenes Selen enthalten. Über die gezielte Auswahl der verfügbaren Futtermittel (vor allem Eiweißträger) anhand ihrer Se-Gehalte sollte diese Grundversorgung langfristig durchaus steuerbar sein. Gleiches gilt für die Verwendung von SeMet-reichen Produkten (z.B. Se-Hefen) in Kombination mit Futtermitteln, die aufgrund einer ungünstigen Bodenbeschaffenheit wenig natives Selen enthalten. Eine gezielte Supplementierung über diese Grundversorgung hinaus erfordert jedoch Se-Quellen, die für den Stoffwechsel unmittelbar verfügbares Selen bereitstellen. Anorganische Se-Quellen erfüllen diese Anforderung ohne Zweifel am besten. Insgesamt ist davon auszugehen, dass eine Supplementierung der Ration innerhalb der zulässigen Grenzen den Se-Bedarf der Tiere in der Regel deckt. Dass dies auch für anorganische Se-Quellen gilt, wurde kürzlich erneut demonstriert (GIERUS et al. 2002).

B-Vitamine

Eine ausreichende Versorgung mit fett- und wasserlöslichen Vitaminen ist eine wesentliche Voraussetzung für Gesundheit, Leistungsbereitschaft und Fruchtbarkeit von Milchkühen. Bei den fettlöslichen Vitaminen A, D und E und ihren Vorstufen ist der Bedarf und die Technik einer ausreichenden Versorgung (z.B. über vitaminisiertes Mineralfutter) gut dokumentiert (z.B. GfE 2001, NRC 2001). Darüber hinaus unterliegen die fettlöslichen Vitamine der Futtermittelverordnung (Art der supplementierten Verbindung, Höchstmengen). Für wasserlösliche Vitamine (B₁, B₂, B₆, B₁₂, Biotin, Cholin, Folsäure, Niacin, Pantothensäure) sowie für Vitamin K wurden dagegen keine Versorgungsempfehlungen

oder Obergrenzen im Wiederkäuerfutter ausgesprochen. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Mikroflora eines funktionstüchtigen Pansens normalerweise ausreichende Mengen jener Vitamine synthetisiert. Nur bei Rationen im Grenzbereich einer wiederkäuergerechten Zusammensetzung (verminderte ruminale Syntheseleistung) und in Verbindung mit einer sehr hohen Leistung des Wirtstieres (hoher metabolischer Vitaminbedarf) sind Versorgungsengpässe an diesen Vitaminen nicht auszuschließen. Aus diesem Grunde enthalten neuere Versorgungsempfehlungen auch Hinweise zu einigen wasserlöslichen Vitaminen (z.B. GfE 2001, NRC 2001). Darüber hinaus sind in jüngster Zeit umfangreiche Übersichtsarbeiten zu diesem Thema erschienen (GIRARD 1998, FLACHOWSKY 1999).

Niacin trägt als Bestandteil der Coenzymen NAD und NADP maßgeblich zum Energiestoffwechsel bei. Bei einer wiederkäuergerechten Rationszusammensetzung wird normalerweise ausreichend Niacin gebildet. Bei Milchkühen mit sehr hohen Leistungen und negativer Energiebilanz scheinen gelegentlich Versorgungsengpässe aufzutreten, die über eine leistungssteigernde Wirkung zusätzlicher Niacingaben über das Futter indirekt zum Ausdruck kommen (GIRARD 1998, FLACHOWSKY 1999). Daneben existiert aber auch eine Reihe von Studien, in denen die Supplementierung von Niacin wirkungslos blieb (siehe GfE 2001 sowie NRC 2001). Hochleistungskühe scheinen somit nicht generell auf eine Supplementierung des Futters mit Niacin angewiesen zu sein.

Biotin wird im Stoffwechsel für Carboxylierungsreaktionen benötigt (z.B. bei der Gluconeogenese). Es scheint in ausreichender Menge in den Vormägen gebildet zu werden. Einigen Untersuchungen zufolge könnten jedoch hohe Biotingaben möglicherweise die Klauenstabilität fördern (z.B. FITZGERALD et al. 2000). Für die Ableitung von Empfehlungen ist die Datengrundlage jedoch noch zu gering.

Vitamin B₁₂ (Cobalamin) ist am Stoffwechsel von Methylgruppen beteiligt (z.B. Gluconeogenese, Methionin-Stoffwechsel). Da Pflanzen kein Cobalamin enthalten, sind Wiederkäuer auf die mi-

krobielle Synthese in den Vormägen angewiesen. Letztere erfordert eine ausreichende Versorgung mit dem Spurenelement Cobalt von mindestens 0,2 mg Co/kg T (GfE 2001), bei kraftfutterreichen Rationen möglicherweise sogar mehr (GIRARD 1998).

Folsäure ist ein Coenzym des Methylgruppen-Stoffwechsels und steht in engem Zusammenhang mit Vitamin B₁₂. Bei knappem Angebot an Folsäure wird vermehrt Methionin verbraucht. Dies könnte erklären, dass bei zusätzlicher Gabe von Folsäure gelegentlich von einer Steigerung der Milchleistung berichtet wird (GIRARD und MATTE 1998). Normalerweise scheint jedoch ausreichend Folsäure über die ruminale Synthese bereitgestellt zu werden.

Cholin ist eine vitaminähnliche Substanz und wird für den Lipid- und Methylgruppen-Stoffwechsel benötigt. In diesem Zusammenhang wird zusätzlichen Cholingaben ein Methionin-sparender Effekt zugeschrieben, der sich in einer erhöhten Milchleistung äußern kann (z.B. ERDMAN und SHARMA 1991, SHARMA und ERDMAN 1989). Hierzu muss das Cholin allerdings in pansengeschützter Form vorliegen, denn natives Cholin wird in den Vormägen praktisch vollständig abgebaut. Letzteres zeigt jedoch, dass Wiederkäuer auf eine Cholinergänzung grundsätzlich nicht angewiesen sind.

Von den übrigen Vitaminen der B-Gruppe wird *Thiamin* (B₁) und *Pyridoxin* (B₆) für den Stoffwechsel der Kohlenhydrate bzw. Aminosäuren benötigt, *Riboflavin* (B₂) und *Pantothensäure* sind Bestandteile von Coenzymen (FAD, Coenzym A). Mangelsymptome sind bei ruminierenden Wiederkäuern nicht bekannt. Eine Supplementierung erscheint deshalb nicht erforderlich.

Schlussbetrachtungen

Eine Versorgung von Milchkühen mit den Spurenelementen Zink, Kupfer, Mangan und Selen allein über die nativen Futterkomponenten ist insgesamt als sehr unsicher zu bezeichnen. Dies beruht sowohl auf den niedrigen Durchschnittswerten der Spurenelementgehalte vor allem in Grundfuttermitteln (z.B. Maisilage) als auch auf deren großen Schwankungsbreiten. Weitere Unsicher-

heitsfaktoren stellen die negativen Interaktionen mit anderen Inhaltsstoffen des Futters dar, insbesondere mit den häufig sehr hohen Eisengehalten von Grundfuttermitteln. Eine Supplementierung des Futters mit Spurenelementen ist somit grundsätzlich zu empfehlen.

Hinsichtlich der Bioverfügbarkeit scheinen organische Verbindungen von Zink, Kupfer und Mangan bei limitierter Supplementierung durchaus die Sicherheit einer ausreichenden Versorgung zu steigern. Es ist jedoch anzunehmen, dass eine entsprechend höhere Supplementierung über anorganische Quellen letztendlich einen vergleichbaren Effekt hat. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Verwendung von Sulfaten oder Chloriden anstelle von Carbonaten und insbesondere von Oxiden bereits eine beträchtliche Steigerung der Bioverfügbarkeit erwarten lässt. Bei Selen stellen anorganische Verbindungen generell hoch verfügbare Se-Quellen dar, wenngleich die Versorgungssicherheit des Tieres durch ruminale Verluste beeinträchtigt sein kann.

Bei den B-Vitaminen lassen die vorliegenden Befunde keine generelle Notwendigkeit für eine Supplementierung des Futters erkennen. Falls die Versorgung mit B-Vitaminen dennoch knapp sein sollte, weisen die Versorgungsempfehlungen stets darauf hin, dass die Futterration auch auf ihre wiederkäuergerechte Zusammensetzung zu prüfen und gegebenenfalls zu korrigieren ist.

Literatur

- ERDMAN, R.A. und B.K. SHARMA, 1991: Effect of dietary rumen-protected choline in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74, 1641-1647.
- FACHBERGER, H., G. WIEDNER und R. LEITGEB, 1997: Nähr- und Mineralstoffgehalt von Grundfuttermitteln in Österreich Datenbasis des Futtermittellabors Rosenau der Nö. Landwirtschaftskammer. Alpenländisches Expertenforum „Grundfutterqualität und Grundfutterbewertung“. BAL Gumpenstein, 21. - 22. Jänner 1997, 27-36.
- FITZGERALD, T., B.W. NORTH, R. EKKIOTT, H. PODLICH und O.L. SVENDSEN, 2000: The influence of long-term supplementation with biotin on the prevention of lameness in pasture fed dairy cows. *J. Dairy Sci.* 83, 338-344.
- FLACHOWSKY, G., 1999: Zur Vitaminversorgung von Milchkühen. Übers. *Tierernährg.* 27, 29-64.
- GfE, 2001: Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzucht-rinder. Ausschuss für Bedarfsnormen der Ge-

sellschaft für Ernährungsphysiologie. Frankfurt am Main, DLG-Verlag.

- GIERUS, M., F.J. SCHWARZ und M. KIRCHGESSNER, 2002: Selenium supplementation and selenium status of dairy cows fed diets based on grass, grass silage or maize silage. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 86, 74-82.
- GIRARD, C.L., 1998: B-complex vitamins for dairy cows: A new approach. *Can. J. Anim. Sci.* 78 (Suppl.), 71-90.
- GIRARD, L.C. und J.J. MATTE, 1998: Dietary supplements of folic acid during lactation: effects on performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81, 1412-1419.
- GRUBER, L., G. WIEDNER, A. VOGEL und Th. GUGGENBERGER, 1994: Nähr- und Mineralstoffgehalt von Grundfuttermitteln in Österreich. *Die Bodenkultur* 45 (Heft 1), 57-73.
- LANTZSCH, H.J., 1990: Untersuchungen über ernährungsphysiologische Effekte des Phytats bei Monogastriern (Ratte, Schwein). Übers. *Tierernährg.* 18, 187-211.
- MILLER, J.K., E. BRZEZINSKA-SLEBODZINSKA und F.C. MADISON, 1993: Oxidative stress, antioxidants, and animal function. *J. Dairy Sci.* 76, 2812-2823.
- NRC, 2001: Nutrient requirements of dairy cattle. 7th ed. National Academy Press. Washington D.C., NW, USA.
- KELLY, M.P. und R.F. POWER, 1995: Fractionation and identification of the major selenium-containing compounds in selenized yeast. *J. Dairy Sci.* 78 (Suppl. 1), 237.
- KIRCHGESSNER, M., 1993: Homeostasis and homeorhesis in trace element metabolisms. In: *Trace Elements in Man and Animals - TEMA 8*. Eds. Anke, M., Meissner, D. und Mills, C.F. Verlag Media Touristik, Gersdorf, Germany, 4-21.
- KIRCHGESSNER, M., S. GABLER und W. WINDISCH, 1997: Homeostatic adjustments of selenium metabolism and tissue selenium to widely varying selenium supply in ⁷⁵Se labeled rats. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 78, 20-30.
- KOENIG, K.M., L.M. RODE, L.M. COHEN und W.T. BUCKLET, 1997: Effects of diet and chemical form of selenium on selenium metabolisms in sheep. *J. Anim. Sci.* 75, 817-827.
- SCHRAUZER, G.N., 2000: Selenimethionine: A review of its nutritional significance, metabolism, and toxicity. *J. Nutr.* 130, 1653-1656.
- SHARMA, B.K. und R.A. ERDMAN, 1989: Effect of dietary added and abomasally infused choline on milk production responses of lactating dairy cows. *J. Nutr.* 119, 248-254.
- SMITH, K.L., J.H. HARRISON, D.D. HANCOCK, D.A. TODHUNTER und H.R. CONRAD, 1984: Effect of vitamin E and selenium supplementation on incidence of clinical mastitis and duration of clinical symptoms. *J. Dairy Sci.* 67, 1293-1300.
- SOLOMONS, N.W., 1986: Competitive interactions of iron and zinc in the diet: Consequences for human nutrition. *J. Nutr.* 116, 927-935.
- WINDISCH, W., 2002: Organische contra anorganische Zink- und Kupferverbindungen in der Schweinefütterung. Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwerme-

- tallen in Wirtschaftsdüngern. Darmstadt. KTBL-Schrift 410, 89-97.
- WINDISCH, W. und M. KIRCHGESSNER, 1994: Calcium- und Zinkbilanz ⁶⁵Zn-markierter Ratten bei defizitärer und moderat hoher Ca-Versorgung. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 72, 184-194.
- WINDISCH, W. und M. KIRCHGESSNER, 1995: Anpassung des Zinkstoffwechsels und des Zn-Austausches im Ganzkörper ⁶⁵Zn-markierter Ratten an eine variierende Zinkaufnahme. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 74, 101-112.
- WINDISCH, W. und M. KIRCHGESSNER, 1999: Zn absorption and excretion in adult rats at Zn deficiency induced by dietary phytate additions. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 82, 106-115.
- WINDISCH, W., S. GABLER und M. KIRCHGESSNER, 1997: Effect of selenite, seleno cysteine and seleno methionine on the selenium metabolism of ⁷⁵Se Labeled rats. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 78, 67-74.
- WINDISCH, W., A. VIKARI und C. HILZ, 2003: Homeostatic response of Zn metabolism to dietary Zn supplements from sulfate, gluconate, orotate, aspartate or histidine in ⁶⁵Zn labeled non-growing rats as a model to adult individuals. *Trace Elements and Electrolytes* 19, in press.
- WITTKOWSKI, G. und B. SPANN, 1993: Mineralstoffe: erst analysieren, dann dosieren. *Tierzüchter* 45 (Heft 7), 40-43.
- WOLFFRAM, S., E. ANLIKER und E. SCHARRER, 1986: Uptake of selenate and selenite by isolated intestinal brush border membrane vesicles from pig, sheep and rat. *Biol. Trace Elem. Res.* 10, 293-306.