

Einsatz organischer Spurenelementverbindungen zur Versorgung landwirtschaftlicher Nutztiere

Prof. Dr. Hans Schenkel
Landesanstalt für Landwirtschaftliche Chemie,
Universität Hohenheim, Stuttgart

Einleitung

Essentielle Spurenelemente erfüllen vielfältige Funktionen im Organismus unserer landwirtschaftlichen Nutztiere. Sie müssen daher in ausreichender Menge mit dem Futter aufgenommen werden. In ihrem Stoffwechselverhalten unterliegen sie einer mehr oder weniger ausgeprägten homöostatischen Regulation, wobei Unterschiede sowohl zwischen den Tierarten als auch zwischen den einzelnen Elementen bekannt sind. Besondere Bedeutung bei der Regulation des stoffwechselkinetischen Verhaltens kommt dabei der enteralen Absorption sowie den unterschiedlichen Ausscheidungswegen zu. Meist sind die verschiedenen Mechanismen allerdings noch nicht im einzelnen bekannt (Kirchgessner, 1987).

Die Herleitung von Versorgungsempfehlungen erfolgt in der Regel anhand von Dosis-Wirkungsuntersuchungen. Hierbei spielen bekanntlich die Kriterien, die für die Herleitung herangezogen werden, die jeweiligen Versuchsbedingungen, die Bindungsform, in der das Element verabreicht wurde, und viele andere Faktoren eine Rolle. In der Regel wird daher ein gewisser Sicherheitszuschlag eingeräumt. Daher ist es nicht verwunderlich, dass gewisse Differenzen feststellbar sind, wenn man die Empfehlungen verschiedener wissenschaftlicher Gremien miteinander vergleicht. In der Abbildung 1 sind beispielhaft einige Empfehlungen für die Spurenelementversorgung bei Schweinen zusammengestellt und den derzeit geltenden Regelungen für die Höchstmengen an Zusatzstoffen (Spurenelementen) gegenübergestellt (Entel et al., 1999).

Häufig reichen die nativen Elementgehalte der verschiedenen Komponenten einer Futtermischung nicht aus, um den Bedarf zu decken, sei es weil der Gehalt zu gering ist oder die Elemente in einer schwer verfügbaren Bindungsform vorliegen, so dass eine zusätzliche Supplementierung notwendig wird (Abb.2). Für die einzelnen Spurenelemente sind im Rahmen der Futterzusatzstoffregelungen (Futtermittelverordnung Anlage 3, Punkt 9) die jeweili-

Abbildung 1:
Versorgungsempfehlungen und Höchstmengenregelung an Spurenelementen für Schweine (Zusammenfassung nach Schenkel, in Vorbereitung)

Element	NRC mg/kg TM	ARC mg/kg TM	INRA mg/kg TM	GfE mg/kg TM	Höchstwerte lt. FMV bzw. EU 70/524 mg/kg (88 % TM)
Fe	40-100*	10-40	80-100	80-120	1250
I	0,14	0,46-0,6	0,2-0,6	0,15-0,6	10
Co		0,14	0,1-0,5		10
Cu	3-6	4-15	10	4-10	35-175
Mn	2-10	10	40	15-25	250
Zn	50-100	50	100	50-100	250
Se	0,1-0,3	0,1-0,4	0,1-0,3	0,1-0,3	0,5

* wenn Bandbreite angegeben, je nach Alter und Nutzung

gen Spurenelementverbindungen, die zur Supplementierung herangezogen werden können, geregelt. Für die einzelnen Spurenelementzusätze sind, z. T. tierartsspezifisch Höchstgehalte (s. Abbildung 1) festgelegt, die sich jeweils auf den Gesamtgehalt im Alleinfutter bzw. der Tagesration beziehen. (Entel et al., 1999). Dies ist u.a. insofern von Interesse, da teilweise Spurenelemente in Dosierungen verabreicht werden, die mehr oder weniger über den Versorgungsempfehlungen liegen, um gewisse Sondereffekte zu erzielen (Abbildung 3). Bekanntes Beispiel ist die in der Vergangenheit häufiger praktizierte Cu-Supplementation von Schweinerationen, um einen wachstumsfördernden Effekt auszunutzen.

Abbildung 2:
Supplementierung von Spurenelementen

<p><i>Spurenelemente werden in einer futtermittelrechtlich zugelassenen Form vor allem dann supplementiert</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • wenn Elemente nicht in ausreichender Menge im Futter enthalten sind • wenn die Elemente in einer schwer verfügbaren Bindungsform vorliegen • wenn das Futter Inhaltsstoffe enthält, welche die Verwertung der Spurenelemente beeinträchtigen • wenn die Elemente in ungünstigen Verhältnissen zueinander vorliegen <p><i>Zum Teil auch</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • wenn aufgrund bestimmter Ursachen (z.B. Stress) ein erhöhter Bedarf vorliegt • wenn zusätzliche Effekte einer erhöhten Zufuhr genutzt werden sollen

Abbildung 3:
Mögliche Sondereffekte bei der Verabreichung bedarfsüberschreitender Spurenelementgaben (nach Schenkel und Flachowsky, 1999)

Element	Effekte	Tierart
Kupfer	Wachstum, Futteraufwand (Kotkonsistenz) Vermeidung von Aortenrupturen Cholesterin in Eiern und Fleisch	Ferkel, Mastschwein Mastputen Geflügel (Versuchsstadium)
Zink	Wachstum, Futtermittelverwertung Durchfall Eutergesundheit, Fruchtbarkeit Glanz, Geschmeidigkeit des Fells	Schwein Schwein, Ferkel Milchkuh Hund, Katze
Selen	Eutergesundheit, Fruchtbarkeit Gelenkprobleme	Milchkuh
Mangan	Fruchtbarkeit, Geschlecht der Nachkommen	Milchkuh
Chrom	Muskelfleischanteil Lebendgeborene Ferkel Stressresistenz Nachgeburtverhaltung	Schwein (Versuchsstadium) Zuchtsau (Versuchsstadium) Jungrinder (Versuchsstadium) Milchkuh (Versuchsstadium)

Intensiv in der Diskussion sind gegenwärtig v.a. hohe Zinkoxidgaben an Ferkel im Zusammenhang mit E.coli bedingten Durchfällen.

In der jüngsten Vergangenheit wird aus verschiedenen Gründen verstärkt der Einsatz sogenannter organischer Spurenelementverbindungen diskutiert. Eines der wesentlichen Argumente ist, dass die Elemente aus diesen speziellen Bindungsformen eine höhere Bioverfügbarkeit aufweisen bzw. die Elemente ein abweichendes Stoffwechselverhalten und verbunden damit ein spezifisches Wirkungsspektrum aufweisen (Spears, 1996, Flachowsky, 1997).

Wie umfangreich derzeit bereits organische Spurenelementverbindungen eingesetzt werden, läßt sich schwer abschätzen. In einer älteren Studie in 60 Milchviehbetrieben in den USA lag der Einsatz organischer Zinkverbindungen bei 47, 5 % (Jordan und Fourdraine, 1993). Bei einer neueren Umfrage in ausgewählten deutschen Milchviehbetrieben gaben je 2 Prozent der Betriebe an, organische Spurenelementverbindungen regelmäßig bzw. versuchsweise einzusetzen (Weiß et al., 1999).

Definitionen

Die Gruppe organischer Spurenelemente ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Häufig wird in der Literatur eine Beschreibung der Association of American Feed Control Officials (Spears, 1996; Ward et al., 1997) zitiert (Abbildung 4). Im Zentrum des Interesses stehen die Chelatverbindungen mit verschiedenen Aminosäuren, in denen das betreffende Spurenelement durch mindestens zwei Ligandatome meist in einem fünf- bis sechsgliedrigen Ring fest eingebunden ist .

Abbildung 4:

Definitionen für organische Spurenelementverbindungen in Anlehnung an die Association of American Feed Control Officials (zitiert nach Spears, 1996)

57.150	Metal amino acid complex: The product resulting from complexing of a soluble metal salt with an amino acid(s)
57.142	Metal amino acid chelate. The product resulting from the reaction of a metal ion from a soluble metal salt with amino acids with a mole ratio of metal to one to three (preferable two) moles of amino acids to form coordinate covalent bonds. The average weight of the hydrolyzed amino acids must be approximately 150 and the resulting molecular weight of the chelate must not exceed 800
57.32	Metal proteinate: The product resulting from the chelation of a soluble salt with amino acids and/or hydrolyzed protein
57.29	Metal polysaccharide complex: The product resulting from complexing of a soluble salt with polysaccharide solution

Die Gruppe der in der Abbildung 4 genannten Verbindungen kann allerdings erweitert werden. Beispiele hierfür sind u.a. die verschiedenen Chrom-III-Verbindungen, die in der Literatur sehr intensiv diskutiert werden (NRC, 1997). Ein anderes Beispiel wären die Selenaminosäuren. Ausgangspunkt hierfür sind die schwefelhaltigen Aminosäuren. Hier kann das Schwefelatom durch Selen, das ein ähnliches physikochemisches Verhalten aufweist, ersetzt werden (Wolffram, 1999). Für Chrom und Selen liegen darüber hinaus mit diesen Elementen angereicherte Hefen vor, in denen die Elemente an eine Reihe verschiedener Liganden gebunden sein können. Zu nennen sind natürlich auch die in der FMV zugelassenen Spurenelementverbindungen mit organischen Säuren (Entel et al., 1999).

Analytik

Die derzeitigen analytischen Arbeiten konzentrieren sich vor allem auf die Charakterisierung und Identifikation der einzelnen Substanzen (Leach und Patton, 1997; Pastore et al., 1999). Hierbei werden meist chromatographische und spektroskopische Verfahren (z.B. Circular Dichroismus) mit Methoden des Elementnachweises (Atomspektroskopie) kombiniert. Ein Gebiet, in dem noch einige Fragen offen sind, ist der analytische Nachweis bzw. die Identifikation solcher organischer Bindungsformen in der Futtermischung sowie die Reinheit und Stabilität der einzelnen komplexen Verbindungen.

Bioverfügbarkeit

Eine der wesentlichen Gründe, die für einen möglichen Einsatz organischer Spurenelementverbindungen sprechen, ist die häufig zitierte bessere Bioverfügbarkeit. In vielen Fällen wird hierunter eine verbesserte enterale Absorption verstanden. In der Praxis liegen allerdings kaum Untersuchungen vor, in denen vergleichend tatsächlich quantitativ die Absorption und gegebenenfalls die Verwertung des absorbierten Spurenelements, zum Beispiel im Hinblick auf den Einbau in spezifische Metalloenzyme, ermittelt wurde. In der Regel wurde die relative Verfügbarkeit im Vergleich mit einer Referenzsubstanz ermittelt. Hierzu wurden Test- und Referenzverbindung in einer oder mehreren Dosierungen der Ration zugelegt und nach einer gewissen Versuchsdauer die Retention in einem Indikatororgan und/oder die Reaktion eines biochemischen Parameters (Enzymaktivität) ermittelt und über eine „slope ratio-“ oder „parallel line“- Auswertung die relative „Verfügbarkeit“ ermittelt (Wedekind et al., 1992; Ammerman 1995). Manchmal wird auch, insbesondere wenn Wirkungsparameter erfasst worden sind, von „Biopotency“ gesprochen.

Ein Blick auf verschiedene zusammenfassende Auswertungen in der Literatur (z.B. Ammerman et al., 1995) ergibt für Aminosäurenkomplexe oder Elementproteinate eine mehr oder weniger ausgeprägte verbesserte Verfügbarkeit (Abb. 5). Als Referenzverbindungen werden meist die jeweiligen Elementsulfate herangezogen. Allerdings ist in Abhängigkeit von der jeweiligen Versuchsanstellung (Vordepletion der Tiere, Dosierung der Testverbindungen, Rationsgestaltung, Versuchsdauer etc.) eine erhebliche Variation zu beobachten. Auch scheinen deutliche tierartliche Unterschiede aufzutreten (Wedekind et al., 1992, Wedekind et al., 1994, Ammerman et al., 1995, Cheng et al., 1998, House, 1999).

Zum Teil wurden die Ergebnisse im hohen Dosierungsbereich ermittelt und können nicht ohne weiteres auf den „nutritiven Bereich“ übertragen werden. In der Regel lassen solche Untersuchungen nur bedingt erkennen, welche Mechanismen einer solchen verbesserten Bioverfügbarkeit zugrunde liegen.

Abbildung 5:
Relative Bioverfügbarkeit von Spurenelementen (nach Ammermann et al., 1995)

Element	Verbindung	Relative Verfügbarkeit Elementsulfat = 100
Kupfer	Cu-Sulfate	100
	Cu-Lysin	100-105
	Cu-Methionin	90-110
	Cu-Proteinat	130
	Basisches Cu-Carbonat	115
	Cu-Chlorid	110
	Cu-Oxid	0-30
Eisen	Fe (II)-Sulfat	100
	Fe-Methionin	185
	Fe-Proteinat	125
	Fe (II)-Carbonat	(85-95)
	Fe (II) Chlorid	100
	Fe (III)-Chlorid	60-91
	Fe (II)-Fumarat	100
Mangan	Mn-Sulfat	100
	Mn-Proteinat	110
	Mn-Methionin	120-125
	Mn-Carbonat	30-55
	Mn-Chlorid	100
Zink	Zn-Sulfat	100
	Zn-Proteinat	100
	Zn-Methionin	100-125
	Zn-Acetat	100
	Zn-Chlorid	100
	Zn-Carbonat	60-105
	Zn-Oxid	50-100

Stoffwechselverhalten und Wirkungen organischer Spurenelementverbindungen in verschiedenen Bereichen

Organische Spurenelementverbindungen können sich von anorganischen Verbindungen auf verschiedenen Ebenen hinsichtlich ihres stoffwechselkinetischen Verhaltens und ihrer Wirkungsentfaltung unterscheiden. Zum einen kann die Bindungsform wesentlichen Einfluß haben auf die Faktoren, welche die Elementemenge bestimmen, die potentiell für die Absorption zur Verfügung steht. Zum anderen kann der Anteil beeinflusst werden, der schließlich enteral absorbiert wird bzw. der, welcher postabsorptiv verwertet wird (House, 1999, Wolfram, 1999).

Bevor auf diese einzelnen Phasen der Elementverwertung näher eingegangen wird, soll kurz noch ein anderer Einflussbereich organischer Spurenelementverbindungen angesprochen werden. Bekanntlich besteht bei manchen Vormischungen die Gefahr, daß es durch freie Spurenelementionen zu Redoxreaktionen kommt, die zu einem Abbau von Vitaminen führen. Von Shurson et al. (1996) liegt eine Zusammenstellung von Untersuchungen vor, die zeigen, dass bei Verwendung von Spurenelementaminosäurenkomplexen eine verbesserte Stabilität von Vitaminen in entsprechenden Mischungen beobachtet werden konnte.

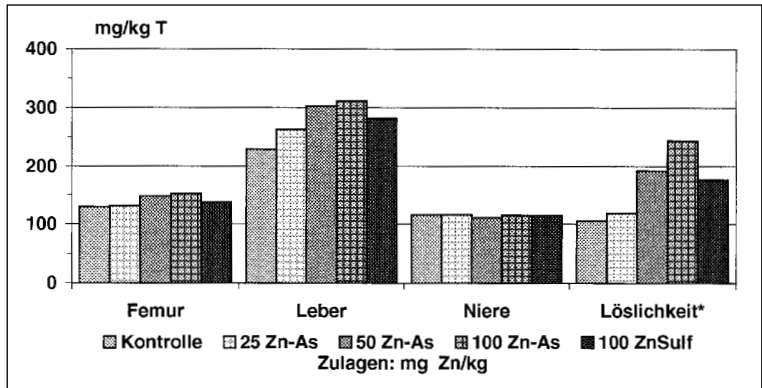
Zur Stoffwechselkinetik organischer Spurenelementverbindungen

Wechselwirkungen im Darmlumen

Matsui und Yano (1998) und Susaki et al. (1999) konnten bei Ferkeln, die Zinkzulagen als Zn-Aminosäurechelate oder als Zn-Sulfat erhielten, anhand der Zinkkonzentration im Plasma und verschiedenen Organen zeigen, dass das chelierte Zink eine verbesserte Verfügbarkeit aufwies. Zwischen den Zinkgehalten in den Organen und der Löslichkeit des Zinks in der Ingesta des Dünndarms ergab sich eine enge Beziehung (Abbildung 6).

Andererseits wurde bei in vitro Inkubation im Pansensaft gefunden, dass beispielsweise Kupfer aus organischen Verbindungen ebenfalls in Lösung geht. Zum anderen wird vermutet, dass Aminosäuren bzw. kurzkettige Peptide, an denen das Element gebunden war, von den Pansenbakterien als Substrat genutzt wurde und deshalb in einigen Untersuchungen keine Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit ermittelt werden konnten (Du et al., 1996).

Abbildung 6:
Zn in Organen und Zn-Löslichkeit in der Digesta



* Löslichkeit: $\frac{\text{Lösliches Zn}}{\text{Gesamt-Zn}} \times 100$
 Zn: Kontroll-Diät 45 mg/kg
 Schweine, Versuchsdauer 30 Tage

Quelle: Susaki et al., 1999

Spurenelemente stehen untereinander bzw. mit verschiedenen Mineralstoffen in enger Wechselbeziehung. Aber auch andere Nahrungsinhaltsstoffe können das Stoffwechselverhalten einzelner Spurenelemente wesentlich beeinflussen. Am Beispiel Eisen konnte vielfach gezeigt werden, dass die Zulage verschiedener Nahrungsbestandteile, Inhaltsstoffe wie Ascorbinsäure oder bestimmte Proteinabbauprodukte, (u.a. aus Fleisch) bewirken, dass Eisen im Gastrointestinaltrakt in einer für die Absorption günstigen Form gehalten werden (Forth und Rummel, 1992).

Es gibt eine Reihe von Versuchsergebnissen, die zeigen, dass organische Spurenelementverbindungen entsprechenden Wechselwirkungen teilweise entzogen sind.

Es ist bekannt, dass Phytate über eine Komplexbildung mit verschiedenen Spurenelementen, deren Absorbierbarkeit beeinträchtigen (House, 1999). Matsui und Yano (1998) konnten in Versuchen an Ratten zeigen, dass Zulagen steigender Mengen an Phytat das Stoffwechselverhalten von Zink bei Ratten wesentlich beeinträchtigten. Wurde Zn als Zn-Aminosäurechelat im Vergleich zu Zn-Carbonat supplementiert, wurde der Zinkstoffwechsel in geringerem Umfang gestört.

Wedekind et al. (1992) fanden bei Küken eine verbesserte Bioverfügbarkeit von Zn-Methionin gegenüber Zn aus Zinksulfat.

Allerdings war der Response deutlich von der Rationsgestaltung (synthetische, halbsynthetische Diät und konventionelle, phytathaltige Diät) abhängig. Cheng et al. (1998) konnten bei Ferkeln nach Verfütterung von Mais-Sojaschrot-Rationen keine Unterschiede in der Verfügbarkeit zwischen Zn-Sulfat und Zn-Lysin finden.

Beim Wiederkäuer führt eine erhöhte Aufnahme an Molybdän und Schwefel zur Bildung von Thiomolybdaten (Suttle, 1991). Diese wiederum können Kupfer binden und dadurch zu einer wesentlichen Beeinträchtigung des Kupferstoffwechsels führen. In einer Reihe von Untersuchungen an wachsenden Rindern konnte gezeigt werden, dass bei höherer Molybdänzufuhr gemessen an der Cu-Konzentration in der Leber oder der

Abbildung 7:
Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit verschiedener Kupferverbindungen beim wachsenden Wiederkäuer

Autoren	Tierart	Cu-Verbindungen	Cu-Antagonisten	Befunde
Olson et al., 1999	Jungkühe	Cu-Sulfat Cu.Aminosäure-Komplex	Gleichzeitige Gaben von Mn, Co, Zn	Cu-AS = Cu-Sulfat
Rabiansky et al., 1999	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Lysin	Fe, Mo, S	Cu-Lysin > Cu-Sulfat v.a. bei vordepletierten Tieren und Antagonisten
Du et al., 1996	Wachsende Rinder Jungkühe	Cu-Sulfat Cu-Proteinat		Cu-Prot. = Cu-Sulfat
Ward et al., 1996	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Carbonat Cu-Proteinat	Mo	Cu-Prot. = Cu-Sulfat Cu-Prot. > Cu-Sulfat wenn erhöhte Mo-Zufuhr
Kegley und Spears, 1994	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat, Cu-Oxid Cu-Lysin		Cu-Lysin = Cu-Sulfat CuLys, CuSul > CuO
Nockels et al., 1993	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Lysin		Cu-Lysin > Cu-Sulfat bei vordepl. Tieren
Ward et al., 1993	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Lysin	Mo, S	Cu-Lysin = Cu-Sulfat Auch bei Antagonisten
De Bonis et al., 1992	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Lysin	Mo	Cu-Lysin ≤ Cu-Sulfat
Wittenberg et al., 1986	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Proteinat		Cu-Prot. = Cu-Sulfat
Kincaid et al., 1986	Wachsende Rinder	Cu-Sulfat Cu-Proteinat	Mo	Cu-Prot. > Cu-Sulfat

Coeruloplasminaktivität im Blut bei Gaben von Cu-Lysin oder Cu-Proteinat eine deutlich geringere Beeinträchtigung des Kupferstoffwechsels ermittelt wurde (Abb.7). Demgegenüber konnte hinsichtlich der Bioverfügbarkeit von Kupfer teilweise kein Unterschied zwischen anorganischen und organischen Bindungsformen ermittelt werden, wenn kein Antagonist vorhanden war.

Neben einem unterschiedlichen Verhalten im Lumen des Gastrointestinaltraktes, das bestimmend für die potentielle absorbierbare Spurenelementmenge ist, kommen der Absorption und dem postabsorptiven Stoffwechselverhalten eine wichtige Bedeutung zu.

Absorption

Das Wissen über den Umfang der enteralen Absorption in Abhängigkeit von den vielfältigen Einflussfaktoren sowie die daran beteiligten Mechanismen ist begrenzt. So ergeben sich im Zusammenhang mit der Elementaufnahme in unterschiedlichen Bindungsformen eine Vielzahl von Fragen, z.B. ob unterschiedliche Absorptionsmechanismen zum Tragen kommen, ob dadurch Unterschiede in der Absorptionsrate auftreten und ob dadurch auch Veränderungen im postabsorptiven Stoffwechselverhalten stattfinden.

Dass organische Bindungsformen effizienter absorbiert werden können, zeigt das schon länger bekannte Beispiel der Absorption von Häm-Eisen im Vergleich mit der Absorption zwei- bzw. dreiwertiger Eisenionen (House, 1999). Wolfram (1999) verweist auf die verschiedenen Absorptionsmechanismen über welche die einzelnen Selenformen absorbiert werden. Offensichtlich haben die unterschiedlichen Absorptionswege keinen Einfluß auf die anschließende Verwertung des Selens in Form selen-spezifischer Proteine, z. B. Selenoenzyme.

Spears (1989) ermittelte in einem Versuch mit Lämmern, dass Zn aus Zn-Methionin und ZnO in ähnlichem Umfang absorbiert wurde, sich das postabsorptive Verhalten jedoch unterschied. Nockels et al. (1993) fanden bei vordepletierten Junggrindern ebenfalls keinen Unterschied bei der scheinbaren Absorption von Zink aus Zn-Methionin und Zn-Sulfat, während die Absorption von Kupfer aus Cu-Lysin wesentlich höher lag als für Cu aus Cu-Sulfat. Bei Schweinen ermittelten Cheng et al. (1998) keinen Unterschied in der scheinbaren Absorption aus Dünndarm und Dickdarm nach Gaben von Zn-Sulfat bzw. Zn-Lysin.

Speicherung und Verteilung

Nach der Verabreichung äquimolarer Dosen verschiedener Spurenelemente in unterschiedlicher Bindungsform konnte eine erhöhte Einlagerung des Elementes in verschiedene Gewebe und/oder ein vermehrter Übergang in Produkte wie Milch und Eier ermittelt werden. In den meisten Fällen läßt es sich nicht im einzelnen klären, ob hierfür Unterschiede in der enteralen Absorption, der Ausscheidung oder der Verteilungskinetik innerhalb des Organismus verantwortlich sind. Spears (1989) und Nockels et al. (1993) fanden beispielsweise eine geringere renale Ausscheidung nach Zn-Methioningaben an Lämmer bzw. Jungrinder als nach Applikation anorganischer Zinkverbindungen.

Eine erhöhte Retention in einzelnen Organen könnte bedingt durch eine erhöhte Konzentration am Targetorgan eine verbesserte Spurenelementwirkung nach sich ziehen. Sie könnte aber auch durch die Bildung mobilisierbarer Speicher dazu dienen, eine vorübergehende Unterversorgung zu überbrücken. Ein verstärkter Übergang in die sich entwickelnden Foeten, in die Milch oder Eier kann zu einer signifikanten Verbesserung des Versorgungsstatus der Jungtiere beitragen (Close, 1999). Schließlich führt die erhöhte Konzentration zu einer verbesserten Spurenelementversorgung der Konsumenten von Lebensmitteln tierischer Herkunft (Close, 1999, Wolffram, 1999).

Bekannte Beispiele, in denen durch eine Zufuhr organischer Spurenelementverbindungen der Versorgungsstatus der Jungtiere verbessert wurde, sind u.a. neue Studien von Pehrson et al. (1999), in denen eine Zufuhr von Selen als Selenhefe an laktierende Kühe zu einem Anstieg der Selenkonzentration im Blut und der Milch der Muttertiere und damit auch des Selenstatus der Saugkälber (erhöhte Konzentration im Blut, erhöhte Aktivität der Glutathionperoxidase im Blut) führte. Close (1999) weist auf eine verbesserte Eisenversorgung neugeborener Ferkel bei Gaben von Eisen-Aminosäurenkomplexe an die Muttersauen hin.

Nicht immer muss die Zufuhr organischer Spurenelementverbindungen mit einem vermehrten Anstieg der Elementkonzentration in verschiedenen Geweben verbunden sein. Bei neuen Untersuchungen von Eckert et al (1999) an Schafen mit hoher Cu-Exposition führten Cu-Sulfat-Zulagen dosisabhängig zu einer Steigerung der Kupfereinlagerung in die Leber, während bei entsprechenden Cu-Gaben als Cu-Proteinat keine adäquate Steigerung der Cu-Einlagerung in die Leber, verbunden mit dem Risiko einer Kupferbedingten Zellnekrose, zu beobachten war.

Statt dessen wurde eine effektivere Verwertung für die Caeruloplasminsynthese sowie eine Verbesserung von Parametern der Wollbildung festgestellt. Coffey et al. (1994) hatten bei hohen Zulagen an Cu-Lysin geringere Cu-Konzentrationen in der Leber ermittelt als nach Cu-Sulfatgaben, obwohl die Zuwachsleistung verbessert war.

Wirkungen organischer Spurenelemente im Stoffwechsel

Versucht man sich einen Überblick über die vorhandene Literatur zu verschaffen, ist festzustellen, dass Berichte über eine Vielzahl von Sonderwirkungen vorliegen. Eine Gewichtung dieser Befunde ist nicht immer einfach, da es sich zum Teil um Einzelbefunde handelt. Teilweise fehlt es an systematisch angelegten Versuchen mit entsprechenden Kontrollgruppen und Dosiswirkungsversuchen. Eine Reihe von Befunden konnte allerdings von unabhängigen Gruppen reproduziert werden. In Abbildung 8 ist eine Reihe von Sonderwirkungen, die in der Literatur beschrieben werden, zusammengestellt.

Abbildung 8:

Mögliche Effekte von Zulagen organischer Spurenelementverbindungen (nach Spears, 1996; Flachowsky et al., 1997; Close, 1999)

- Verbesserte Reproduktionsleistungen
 - durch geringere embryonale Frühsterblichkeit
 - durch verbesserte Bedingungen im Uterus
 - durch ein vermindertes Auftreten von Ovarzysten
 - durch gesteigerte Östrusintensität
 - erhöhte Vitalität der Embryonen beim Embryotransfer
- geringere Rückenspeckbildung beim Schwein
- vermindertes Auftreten von Skelettschäden bei Pferden und Geflügel
- verminderte Zellzahlen in der Kuhmilch
- verbesserte Qualität von Hufen, Klauen und Haaren
- verbesserter Immunresponse
- erhöhte Elementkonzentration in Blut und Milch
- verbesserte Spermaqualität beim Schwein

So konnten Effekte, die sich mit sehr hohen Gaben an anorganischen Verbindungen erreichen ließen, mit einer wesentlich geringeren Dosierung des Elementes in organischer Bindung erzielt werden. Nach Daten von Ward et al. (1997) konnten bei jungen Ferkeln nach Gaben von 250 mg/kg Zink als Zn-Methionin oder 100 mg/kg Kupfer als Cu-Lysin vergleichbare Wachstumssteigerungen erzielt werden als nach Einsatz von 2000 mg/kg Zn als Zn-Oxid bzw. 250 mg/kg Kupfer als Cu-Sulfat. Günstige Effekte auf Zunahmen und

Futteraufwand wurden vor allem erzielt, wenn Zn-Methionin und Zn-Sulfat bzw. diese beiden Zn-Verbindungen mit Cu-Lysin kombiniert wurden. Auch Coffey et al. (1994) haben teilweise Vorteile hinsichtlich der Zuwachsleistung von Ferkeln bei Cu-Lysin gegenüber Cu-Sulfatgaben beschrieben. In mehreren Versuchen waren die Effekte jedoch nicht immer reproduzierbar. Andererseits ergaben sich additive Effekte der Cu-Zulage mit einem Antibiotikum unabhängig von der Bindungsform des Cu.

Allerdings zeigen diese Untersuchungen, ähnlich wie Versuche zur Verbesserung der Immunität, z.B. bei Kühen, verbunden mit einer deutlichen Reduktion der Mastitisanfälligkeit beim Rind (Spears, 1996), dass auch beim Einsatz organischer Spurenelementverbindungen u.U. Dosierungen erforderlich sind, die wesentlich über den bislang publizierten Versorgungsempfehlungen liegen (s. z.B. Abbildung 1).

Ein Element, welches seit längerem vor allem hinsichtlich seiner Wirkungen in der Diskussion steht, ist dreiwertiges Chrom in verschiedenen organischen Verbindungen (Picolinat, Nikotinsäure, Chrom-Hefe, Aminosäurechelate). Eine Zusammenfassung bisher in der Literatur genannter Effekte findet sich in Abbildung 9.

Abbildung 9:
Mögliche Effekte einer Zulage an organischen Chromverbindungen

Tierart/Kategorie	Effekte	Literatur (Auswahl)*
• Schwein Ferkel	Verbesserte Glucoseverwertung bei starkem Stress	Baldi et al., 1999
Mastschwein	Verbesserung Zunahmen, Verminderung Futteraufwand; veränderte Glucosekinetik im Belastungstest, Insulinempfindlichkeit, Veränderung Schlachtkörper-Zusammensetzung (↑ Fleisch, ↓ Fett)	Amiokon et al., 1995, Lindemann et al., 2000
• Zuchtsau	Reproduktion ↑ abgesetzte Ferkel/Sau	Lindemann et al., 1995
• Geflügel	Verbesserung Zunahmen (uneinheitlich) ↓ Cholesterin Ei, Serum; Wechselwirkung Vanadium	Sands und Smith, 1999
• Pferd	Verbesserte Glucoseverwertung	Ott und Kivipelto, 1999
• Rind Kalb Jungrind/Mastrind (Feedlot) Milchkuh	Verbesserung Immunität unter Stress Positive Effekte bei Aufstallung (Crowding), verminderte Morbidität (↓ Cortisol), ↑ Blastogenese Lymphozyten ↓ Plazentaverhaltungen ↓ Ketonkörper, Insulinempfindlichkeit ↑ Blastogenese Lymphozyten	Kegley et al., 1996 Moonsie-Shagar und Mowat, 1993; Chang und Mowat, 1992 Villalobos et al., 1997 Burton et al., 1996

* umfangreiche Literaturzusammenstellung in NRC (1997)

Eine umfangreichere Darstellung ist z.B. bei NRC (1997) zu finden. Die Befunde sind nicht einheitlich. Zum Teil ist die Variation der Ergebnisse auf die Zusammensetzung der Rationen (Proteingehalt, Proteinqualität, Kohlenhydratzusammensetzung) zurückzuführen (Lemme et al., 2000). Aber auch die Tierart sowie Rasse und Alter sind ebenso wie die Gestaltung der Umwelt (u.a. bei den Stressuntersuchungen) von großer Bedeutung.

Im Hinblick auf eine sehr geringe Dosierung, liegen kaum Arbeiten hinsichtlich der Retention in Geweben oder einer ökologischen Wirkung vor. In den meisten Arbeiten betragen die Dosierungen für Chromzulagen im Bereich von 200 bis 300 µg/kg Futter.

Da es bislang nicht gelungen ist, den ernährungsphysiologischen Bedarf landwirtschaftlicher Nutztiere näher zu charakterisieren, ist es schwer zu entscheiden, ob es sich bei diesen Wirkungen um den Ausgleich eines möglichen Versorgungsdefizits in Richtung einer bedarfsgerechten Versorgung handelt oder ob hier eher (pharmakologische) Sonderwirkungen vorliegen. Eine Arbeitsgruppe des National Research Council (1997) hat daher vor kurzem die Vorbehalte gegenüber einem Einsatz von Chromverbindungen in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere nochmals zusammengefasst und einen Katalog an offenen Fragen ausgearbeitet, die noch zu klären sind.

Green et al. (1988) fanden bei Zulagen von Zinkmethionin eine Verbesserung von Kennwerten der Schlachtkörperzusammensetzung und Fleischbeschaffenheit bei Mastrindern im Vergleich zu Zinkoxidzulagen, ohne dass Unterschiede im Zinkgehalt des Plasma oder hinsichtlich der täglichen Zunahmen ermittelt werden konnten. Die Autoren lassen offen, ob es sich um einen Zink und /oder einen Methionineffekt handelt. Die Komplexierung von Zn durch Methionin stellt einen Schutz gegen den ruminalen Abbau dar (Puchala et al., 1996).

Auch Chirase et al. (1991), die positive Effekte nach einer Zn-Methioninzulage (einen geringeren Einbruch in der Futteraufnahme, einen geringeren Anstieg der Rektaltemperatur) nach gezielter Infektion mit boviner Rhinotracheitis fanden, diskutieren sowohl eine Zink- wie auch eine Methioninwirkung. Eine Zinkoxidgabe hatte keine positiven Effekte gebracht.

Puchala et al. (1996) konnten bei Ziegen nach Zn-Methioninzulagen im Vergleich zu Zinkoxidzulagen einen positiven Effekt auf die Lebendmasseentwicklung, nicht jedoch auf das Wollwachstum finden. Zn-Methioningaben erhöhten den Methioningehalt im Plasma.

Olson et al. (1999) berichten über eine Beeinträchtigung der Reproduktionsleistung von Jungkühen, wenn mehrere organisch gebundene Spurenelemente (Cu, Mn, Co, Zn) im relativ hohen Dosierungsbereich (das doppelte (Cu, Mn, Zn) bis mehrfache (Co) der Versorgungsempfehlungen) verabreicht wurden. Andere Autoren hatten durch Zulage einer Kombination organisch gebundener Spurenelemente (Cu, Zn, Co, Mn) bei gleichzeitiger Applikation von antagonistisch wirkenden Elementen (Mo, S, Fe) im Vergleich zu Elementgaben in anorganischer Bindungsform eine günstige Beeinflussung der Fruchtbarkeit gefunden (Swenson et al., 1996).

Umweltrelevante Aspekte

Ein weiterer Gesichtspunkt, der für den Einsatz organisch gebundener Spurenelemente spricht, ist der Umweltaspekt (Ward et al., 1997). Hinsichtlich der Versorgung landwirtschaftlicher Nutztiere ist festzustellen, dass der überwiegende Anteil der aufgenommenen Elemente wieder über Kot und Harn ausgeschieden wird. Häufig, insbesondere bei Dosierungen, die mehr oder weniger deutlich über den Versorgungsempfehlungen liegen, liegt der Anteil deutlich über 90 Prozent der aufgenommenen Elementmenge. Diese Elementanteile gelangen über die wirtschaftseigenen Dünger auf landwirtschaftliche Nutzfläche. Hierbei können die anfallenden Spurenelemente, soweit es sich um essentielle Elemente für die Pflanzen handelt, durchaus zu deren Versorgung beitragen. In den meisten Fällen liegt aber der Spurenelementeintrag über die Wirtschaftsdünger deutlich über der Abfuhr durch die erzeugten Produkte, so dass längerfristig eine Akkumulation der Elemente in den Böden nicht auszuschließen ist (Crößmann, 1999). Weiterhin sind ökologische Wirkungen erhöhter Spurenelementeinträge durch eine Verlagerung in das Grundwasser und/oder Oberflächenwasser möglich. Gerade im Rahmen der neuen Bodenschutzgesetzgebung wird daher den Auswirkungen erhöhter Elementeinträge auf verschiedene Funktionsbereiche des Bodens große Bedeutung beigemessen.

In der Abbildung 10 ist beispielhaft der Zinkeintrag in landwirtschaftliche Nutzflächen in Beispielsrechnungen für verschiedene Szenarien der Tierhaltung (Besatzdichte, Höhe der Supplementierung) wiedergegeben. Dabei zeigt sich deutlich, dass bei einer Supplementierung im Bereich der futtermittelrechtlich geregelten Höchstwerte erhebliche Elementmengen in die Flächen eingetragen werden.

Abbildung 10:**Zinkeintrag in landwirtschaftliche Nutzflächen bei unterschiedlicher Supplementation (Modellrechnungen) im Vergleich mit Frachten über Klärschlämme und Kompost**

		Zn-Eintrag: g/ha und Jahr	
Tierart	Intensität Stallplätze je ha	Zn im Futter Schwein 50/80 mg/kg Geflügel 100 mg/kg	Zn im Futter 200 mg/kg
Zuchtsau	3,5-5,5	306-481	1397-2195
Ferkelaufzucht	40-50	660-825	2360-2950
			7620-9525*
Schweinemast	8-14	205-358	1184-2072
Legehennen	200-300	790-185	2110-3165
Masthähnchen	500-700	812-1137	2238-3132
Mastputen	100-120	738-885	1968-2361
Klärschlamm		Mittel: 2100	Max: 3340/4170
Kompost		Mittel: 2500	Max: 5000
Abfuhr	Je nach Fruchtfolge u. Abfuhr Nebenprodukte	130-500	

* Unterstellt über 2 Wochen hinweg 2500 mg Zn/kg, restliche Periode 120 mg/kg

Da verschiedene organische Spurenelementverbindungen eine verbesserte Bioverfügbarkeit aufweisen, ist es in einer Reihe von Fällen möglich, die bisherige Höhe der Supplementierung deutlich zurückzunehmen und damit trotzdem die Versorgung der Tiere mit den essentiellen Elementen sicherzustellen, andererseits aber den Eintrag der Elemente in die Flächen zu reduzieren.

Zusammenfassung

Die Gruppe organischer Spurenelemente ist derzeit noch nicht eindeutig definiert. Meist handelt es sich dabei vorwiegend um Komplexe oder Chelate mit Aminosäuren oder anderen Bioliganden. Ein weiterer Bereich sind Mikroorganismen wie Hefen, in denen einzelne Elemente angereichert sind. Insgesamt sind Methoden, die eine Charakterisierung der einzelnen Verbindungen, insbesondere in kompletten Futtermischungen, zulassen, erst in der Entwicklung.

Für organische Spurenelemente sind eine Reihe positiver Effekte beschrieben, die zumeist auf ihre relativ feste Bindung an einen organischen Liganden zurückzuführen sind. In Verbindung damit steht häufig der Hinweis auf eine verbesserte biologische Verfügbarkeit, wobei allerdings meist unklar ist, ob dies auf einer verbesserten enteralen Absorption und/oder einer veränderten intermediären Verwertung beruht.

Die positiven Effekte äußern sich zum Teil in einer erhöhten Retention in verschiedenen Organen oder einem effektiveren Übergang in Eier oder Milch. Hierdurch kann es zu einer verbesserten Versorgung der Jungtiere kommen bzw. durch den Verzehr der daraus gewonnenen Lebensmittel verbessert sich die Versorgung des Menschen.

Ein anderer Gesichtspunkt ist eine effektivere intermediäre Verwertung, die sich beispielsweise in einer verbesserten Aktivität von verschiedenen Metalloenzymen äußert und positive Einflüsse auf Immunabwehr, Reproduktion etc. hat. Werden diese Effekte nur mit einer relativ hohen Dosierung erreicht, sind sie gegen die ökologischen Wirkungen eines erhöhten Austrags über Wirtschaftsdünger zu setzen.

Durch die verbesserte Bioverfügbarkeit eröffnet sich auch die Möglichkeit, in verschiedenen Fällen die Höhe der Spurenelementsupplementation zu reduzieren und damit den Austrag von Spurenelementen über wirtschaftseigene Dünger merklich zu verringern. Dieser Aspekt dürfte in intensiven Veredelungsgebieten zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Eine Übersicht über die Literaturangaben ist beim Verfasser erhältlich.