

Der gegenwärtige Stand der Phosphorbewertung für Nutztiere

Prof. Dr. Markus Rodehutschord (Halle-Wittenberg)

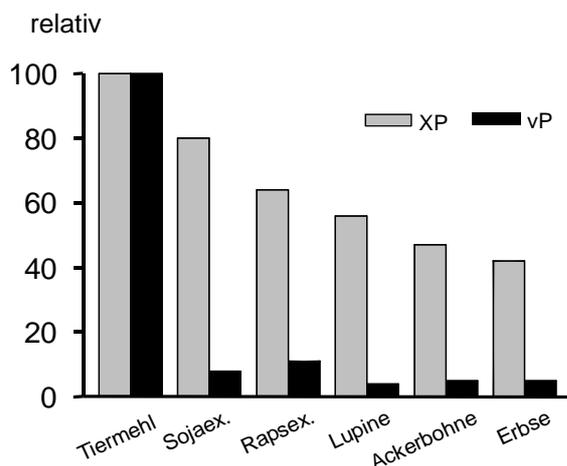
1. Einleitung

Seit Jahrzehnten wird an der Optimierung der Fütterung unserer landwirtschaftlichen Nutztiere gearbeitet. Die Rahmenbedingungen haben sich dabei verändert. Lange Zeit war es eines der Hauptziele einer bedarfsgerechten Versorgung mit Phosphor (P), Mangelversorgung mit Sicherheit auszuschließen. Solange wenig über die Verfügbarkeit des Phosphors aus verschiedenen Quellen bekannt war, waren mit dieser Sicherheit entsprechend hohe Gehalte an Gesamt-P im Futter verbunden.

Im zurückliegenden Jahrzehnt hat sich die Strategie gewandelt. Die P-Ausscheidungen der Tiere und deren Abhängigkeit von der Fütterung wurden zunehmend zu einem Schwerpunkt der internationalen Tierernährungsforschung. Die Konzentrierung der tierischen Veredelung und die regional starke Entkopplung der Veredelungswirtschaft von der landwirtschaftlichen Nutzfläche sind wesentliche Gründe hierfür. Die Öffentlichkeit ist bezüglich der Phosphateinträge in Grund- und Oberflächengewässer sensibilisiert, nicht erst seit intensives Algenwachstum den Freizeitwert des Mittelmeerraums beeinträchtigt. Hinzu kommt der Aspekt der Ressourcenschonung: die weltweiten Lagerstätten für Rohphosphate sind begrenzt!

Der Wegfall der Futtermittel tierischen Ursprungs für Schwein und Geflügel hat diese Problematik verschärft. Tier-, Fleischknochen- und Fischmehle enthalten viel P, der zudem hoch verdaulich ist. Überschlagsmäßig kann man davon ausgehen, dass der Bedarf eines Schweines an verdaulichem P (bei etwa 30 kg LM) zu etwa 40 % durch Fleischknochenmehl gedeckt war, wenn dieses zu nur 2 % im Futter enthalten war! Diese Zahlen belegen, dass die quantitative Bedeutung des Verbotes der tierischen Futtermittel aus Sicht der Mineralstoffversorgung viel bedeutender ist als aus Sicht der Aminosäurenversorgung. Die alternativen pflanzlichen Proteinträger enthalten nämlich nicht nur wesentlich weniger Gesamt-P, dieser ist für Schwein und Geflügel auch deutlich schlechter verdaulich (Abb. 1).

Abbildung 1: Vergleich der Gehalte an Rohprotein (XP) und verdaulichem Phosphor (vP) von verschiedenen pflanzlichen Futtermitteln und Tiermehl (Tiermehl jeweils = 100)



Die Landwirtschaft entzieht sich ihrer Verantwortung nicht und hat bereits wirkungsvolle Strategien zur Vermeidung der Phosphateinträge entwickelt und in Teilbereichen umgesetzt. In der folgenden Übersicht wird der gegenwärtige Stand des Wissens zum Bedarf an P und zur Bewertung von P-Quellen, einschließlich der Phytasewirkung, zusammengefasst. Aktuelle Probleme und offene Fragen werden aufgezeigt. Bezüglich der Bewertungssysteme und der Versorgungsempfehlungen wird im Wesentlichen auf die Arbeiten des Ausschusses für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie zurückgegriffen.

2. Phytin in Futtermitteln pflanzlichen Ursprungs

In pflanzlichen Samen und in vielen Verarbeitungsprodukten wie Extraktionsschrotten oder Kleien liegt der überwiegende Teil des P in Form von Phytinsäure (Myo-Inositol 1,2,3,4,5,6-Hexakis-Dihydrogenphosphat) und deren Salzen (Phytate) (Sammelbegriff: Phytin) vor (DÜNGELHOEF und RODEHUTSCORD, 1995; EECKHOUT und DE PAEPE, 1994). Phytinsäure ist für ihre Chelatbildenden Eigenschaften bekannt und bindet multivalente Kationen (PALLAUF und RIMBACH, 1997). Auch über die Bildung von Komplexen mit bestimmten Proteinen und Aminosäuren sowie die Bindung von intestinalen Proteinase und α -Amylase wird aus in-vitro-Studien berichtet (HARLAND und HARLAND, 1980; SCHEUERMANN et al., 1988; SHARMA et al., 1978). Das für die Hydrolyse von Phytin notwendige Enzym Phytase ist im Intestinalgewebe nicht (POINTILLART et al., 1984) oder nur mit sehr geringer Aktivität (LOPEZ et al., 2000) nachweisbar. Phytin-P ist daher zunächst als völlig unverdaulich anzusehen. Im Verdauungstrakt des Tieres mikrobiell gebildete Phytasen können jedoch eine effiziente Hydrolyse bewirken, wie die nahezu vollständige Verwertbarkeit pflanzlichen Phosphors beim Wiederkäuer belegt (KODDEBUSCH und PFEFFER, 1988; RODEHUTSCORD et al., 2000). Für monogastrische Tiere ist dies quantitativ von untergeordneter Bedeutung. Wichtig ist jedoch, dass in einigen pflanzlichen Samen auch Phytase enthalten ist, die ihre Wirkung im Verdauungstrakt des Tieres entfalten kann. Während im Mais Korn oder in Extraktionsschrotten kaum Phytase nachweisbar ist, weisen Weizen, Roggen und Triticale eine Phytaseaktivität in der Größenordnung von 500 bis etwa 1500 U/kg auf (mit großen Schwankungen zwischen Sorten und abhängig von Umweltbedingungen). Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, dass die Verwertung des P bei Schwein und Geflügel für verschiedene Getreide trotz ähnlichen Anteils von Phytin sehr unterschiedlich ist (siehe Punkt 4.2). Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, ein aussagefähiges und praktikables System der Bewertung des P sowohl für das Schwein als auch für das Geflügel zu entwickeln.

3. Warum Tiere Phosphor ausscheiden

Für das Verständnis der verschiedenen P-Bewertungssysteme ist es hilfreich, zunächst einige grundsätzliche Betrachtungen darüber anzustellen, was die Tiere zur Ausscheidung von Phosphor veranlasst. Hier kann in drei Kategorien unterschieden werden.

3.1 Unvermeidliche Ausscheidungen

Hierunter sind physiologisch bedingte Ausscheidungen zu verstehen, die unabhängig von der Höhe der Versorgung auftreten, auch bei theoretisch P-freier Ernährung. Eine Beeinflussung dieses Teils der Ausscheidungen durch die Versorgung ist nicht möglich. Die unvermeidlichen Ausscheidungen finden sich zum überwiegenden Teil im Kot als Folge der endogenen Sekretion von Phosphaten, aber auch im Harn. Es wird allgemein angenommen, dass diese unvermeidlichen Ausscheidungen bei monogastrischen Tieren eine Funktion der Lebendmasse ist, während sie beim Wiederkäuer vom Futterverzehr (ca. 1 g/kg T-Aufnahme) bzw. von der Energieversorgung abhängen (RODEHUTSCORD et al., 2000; SPIEKERS et al., 1993). Für das Schwein belaufen sich die neueren Schätzungen zur Höhe der unvermeidlichen P-Verluste auf eine Größenordnung von 7 mg/kg LM und Tag (JONGBLOED und EVERTS, 1992; RODEHUTSCORD et al., 1998), wobei der Anteil der renalen Ausscheidungen hieran geringer als 10 % ist (RODEHUTSCORD et al., 1998). Für das Geflügel liegen entsprechend fundierte Schätzungen über das Ausmaß der unvermeidlichen P-Verluste noch nicht vor. In seinen neuesten Empfehlungen zur Versorgung des Hühnergeflügels geht der Ausschuss für Bedarfsnormen (GFE, 1999) davon aus, dass der „Erhaltungsbedarf“ an Phosphor 80 mg/kg LM und Tag beträgt. Da angesichts der Datengrundlage davon auszugehen ist, dass dieser Wert auch regulatorisch bedingte Ausscheidungen enthält, kann hier von einer Überschätzung der unvermeidlichen Verluste ausgegangen werden.

3.2 Regulatorisch bedingte Ausscheidungen

Zur Aufrechterhaltung der Homöostase passen Tiere ihre Ausscheidungen der Versorgung an, besonders wenn P im Überschuss zugeführt wird. Das Skelett stellt einen Puffer für P dar, ist jedoch kein Speicher mit unbegrenzter Kapazität. Phosphorgehalte im Zuwachs monogastrischer Tiere von 4,5 bis 5,5 g P/kg werden selten überschritten und wenn die Zufuhr von P den Bedarf übersteigt, reagieren die Tiere mit einer verminderten Absorptionsrate und einer erhöhten renalen Ausscheidung von Phosphat (FERNÁNDEZ, 1995; GÜTTE et al., 1961; RODEHUTSCORD et al., 1999b; VEMMER, 1982). Im Gegensatz zu den unvermeidlichen Verlusten ist hier also eine klare Abhängigkeit von der Höhe der P-Versorgung gegeben. Es versteht sich von selbst, dass im Sinne einer Minimierung der P-Ausscheidungen diese regulatorisch bedingten Ausscheidungen ein wesentlicher Ansatzpunkt für Fütterungsmaßnahmen sind.

3.3 Eingeschränkte Verwertbarkeit des Futters

Die Bindungsform des P im Futter hat einen entscheidenden Einfluß auf die Verwertung durch den Nichtwiederkäuer. Dabei kann von einer vollständigen intermediären Verwertung des absorbierten Phosphors, zumindest beim Schwein, ausgegangen werden (RODEHUTSCORD et al., 1998). Dementsprechend hat sich in den Niederlanden und Deutschland die Bewertung des Phosphors auf der Stufe der Verdaulichkeit durchgesetzt (siehe Punkt 4.2). Diese Messgröße ist eindeutig definiert und P-Quellen können mit Messungen am Zieltier unter Standardbedingungen reproduzierbar bewertet werden. Dies ist unter Verhältnissen wie in den mittel- und osteuropäischen Ländern notwendig, die durch eine große Palette von Einzelkomponenten gekennzeichnet sind, die in der Schweine- und Geflügelernährung eingesetzt werden. Einfachere Bewertungssysteme bieten sich bei ei-

ner Beschränkung des Futtermittelmarktes auf wenige Komponenten an, wie es z. B. in den USA der Fall ist.

Ein wesentlicher Grund für die Unterschiede in der Verdaulichkeit ist der Gehalt an Phytin in pflanzlichen Samen und deren Verarbeitungsprodukten (siehe Punkt 2). In Form von Phytinsäure gebundener P kann nur dann absorbiert werden, wenn eine hydrolytische Spaltung stattfindet. Das hierzu nötige Enzym Phytase kann jedoch von den Tieren selbst nicht gebildet werden. Phytatreiche Futtermittel, die keine pflanzeneigene Phytase aufweisen, sind daher durch eine sehr geringe Verdaulichkeit des P gekennzeichnet. Neben der pflanzlichen Phytase können im Verdauungstrakt des Tieres auch mikrobielle Phytasen zur Wirkung kommen, die dem Futter zugesetzt oder die von Mikroorganismen des Verdauungstraktes gebildet werden. Zur Minimierung der Ausscheidungen ist die Berücksichtigung der Verdaulichkeit der wichtigsten P-haltigen Futtermittel bei Schwein und Geflügel bedeutsam. Nur dann ist eine gezielte Ergänzung mit mineralischen Phosphaten bzw. eine Supplementierung von mikrobieller Phytase sinnvoll umzusetzen.

4 Gegenwärtige Bewertungssysteme und Versorgungsempfehlungen

4.1 Wiederkäuer

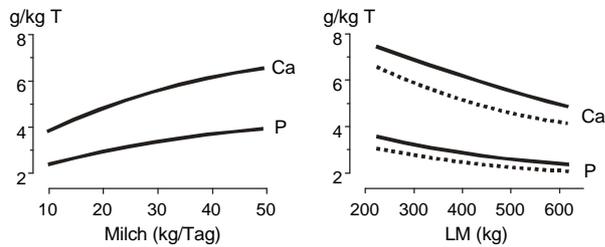
Beim Wiederkäuer wird für die praktische Anwendung für pflanzliche und mineralische P-Quellen wegen der mikrobiellen Fermentation im Vormagen von einer einheitlichen und hohen Verwertbarkeit ausgegangen. Versorgungsempfehlungen werden daher auf der Basis des Gesamt-P abgeleitet (GFE, 1993) und es ergibt sich nicht die Notwendigkeit einer speziellen Futterbewertung. Lediglich für schwer lösliche Phosphate, die ohnehin keine praktische Relevanz haben, und für mit Formalin behandelte Ölschrote wird von einer unvollständigen Verwertbarkeit berichtet (GONGNET et al., 1997; PARK et al., 2000). Mit der Festlegung eines Verwertungskoeffizienten von 70 % bei der Bedarfsableitung ist allerdings eine ausreichende Sicherheit in das Bewertungssystem eingebaut, die auch solche Fälle berücksichtigt.

Bei der **laktierenden Milchkuh** ist der P-Bedarf vom Futterverzehr und von der Höhe der Milchleistung abhängig, wobei mit zunehmender Milchleistung eine steigende Konzentration in der Ration erforderlich ist (Abb. 2) P-Gehalte von mehr als 4 g/kg T sind aber auch bei hoher Milchleistung nicht erforderlich. Dies wurde bereits in Untersuchungen in Haus Riswick vor etwa 10 Jahren belegt (BRINTRUP et al., 1993) und ist kürzlich in Untersuchungen in den Niederlanden und in Wisconsin bei hohem Leistungsniveau bestätigt worden (VALK und SEBEK, 1999; WU und SATTER, 2000; WU et al., 2000). Eine mineralische Ergänzung der Rationen ist daher in den meisten Fällen bei der hiesigen Futtergrundlage nicht erforderlich. Lediglich in Rationen, die viel Maisprodukte oder Press- bzw. Melasseschnitzel enthalten, kann eine gezielte P-Ergänzung bei hoher Milchleistung notwendig sein, weil die P-Gehalte in diesen Komponenten niedrig sind.

Bei der **trockenstehenden Kuh** wird diskutiert, ob eine Ergänzung von P zusätzlich zu den Maßnahmen zur Minimierung der Ca-Versorgung und des Ausgleichs der Kationen-Anionen-Bilanz vorbeugend gegen das Auftreten von Gebärbarese wirkt (BREVES et al., 1999).

In der **Rindermast** kann der P-Gehalt in der Ration um so niedriger sein, je schwerer die Tiere sind und je geringer

Abbildung 2: Notwendige Konzentration von Phosphor (P) und Calcium (Ca) in der Ration für Milchkühe in Abhängigkeit von der Leistungshöhe (links) und für Mastrinder (rechts) bei einem Zunahmeniveau von ca. 900 g/Tag (•••) oder von 1300 g/Tag (³/₄) (nach GFE, 1993 und 1995)



das Zunahmeniveau ist (Abb. 2). Bei Mast auf der Basis von Maissilage ist speziell am Beginn zu prüfen, ob eine mineralische Ergänzung von P notwendig ist. Ein Ergänzungsbedarf für Calcium ist in solchen Rationen immer gegeben.

Für **Schafe und Ziegen** kann der Bedarf an P analog zur Vorgehensweise bei der Kuh und beim Mastrind abgeleitet werden. Für laktierende Tiere sind maximal 3,5 g/kg T erforderlich und in der intensiven Lämmernast sollte die Ration bei hohem Leistungsniveau 4,2 g/kg T enthalten (SPIEKERS und RODEHUTSCORD, 1998).

4.2 Schweine

In den Niederlanden und Deutschland wurden ähnliche Systeme zur Bewertung des P beim Schwein erarbeitet, die auf dem verdaulichen Phosphor (vP) basieren (JONGBLOED und EVERTS, 1992; KIRCHGESSNER, 1997). Bezüglich der Umsetzung dieser Empfehlungen hat der Arbeitskreis Futter und Fütterung der DLG bereits eine ausführliche Information erarbeitet (DLG, 1999), sodass hier nur die wesentlichen Punkte wiedergegeben werden sollen.

4.2.1 Versorgung mit vP

Der quantitative Bedarf an vP wird nach bewährtem Muster faktoriell abgeleitet (Tab. 1). Danach ergibt sich der Nettobedarf an P eines Schweines aus den unvermeidlichen Verlusten sowie je nach Nutzungsrichtung und Leistungsstadium aus dem P-Ansatz für das Wachstum, der intrauterinen P-Retention sowie der P-Sekretion mit der Milch. Die Verwertung des vP zur Deckung des Nettobedarfes ist nahezu vollständig (RODEHUTSCORD et al., 1998), und bei der Bedarfsableitung wird mit einem Wert von 95 % gerechnet.

Aus den in Tabelle 1 zusammengestellten Daten lässt sich der quantitative Bedarf an vP für jede Nutzungsrichtung und jeden beliebigen LM-Bereich ableiten. Für die Erstellung von Futtermischungen ist jedoch die Frage nach der notwendigen Konzentration im fertigen Futter ausschlaggebend, die entscheidend von der Futteraufnahme bzw. der Futterverwertung abhängig ist.

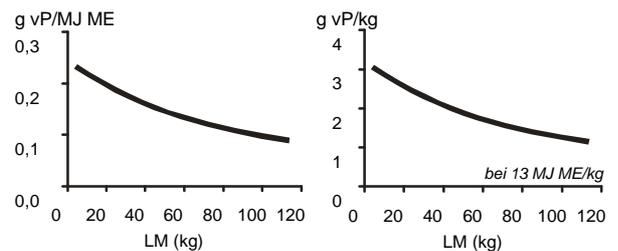
In der **Schweinemast** ist eine kontinuierliche Abnahme in der Futterverwertung mit zunehmender Lebendmasse aufgrund der zunehmenden Bedeutung des Fettsatzes gegeben. Die Versorgung mit Umsetzbarer Energie (ME) ist die das Wachstum primär determinierende Größe und es

Tabelle 1: Faktoren zur Ableitung des Bedarfes an verdaulichem Phosphor (vP) beim Schwein (KIRCHGESSNER, 1997)

Unvermeidliche P-Verluste, mg/kg LM und Tag	10
P-Gehalt im LM-Zuwachs, g/kg	
≤ 80 kg LM	5,0
> 80 kg LM	4,5
P-Ansatz in Konzeptionsprodukten	
Niedertragend (bis ca. 84. Tag)	1,5
hochtragend (ab ca. 85. Tag)	3,0-5,0
P-Sekretion mit der Milch, g/kg	1,6
Verwertung des vP zur Deckung des Nettobedarfes, %	95
Verhältnis Gesamt-Ca:vP	2,5:1 bis 3,0:1

liegt daher nahe, in Analogie zu den Aminosäuren, die Empfehlungen zur Versorgung mit vP in g je MJ ME auszudrücken. Abbildung 3 zeigt, wie der Gehalt an vP im Futter im Verlaufe der Mast angepasst werden kann.

Abbildung 3: Die Empfehlungen zur Konzentration von vP im Futter für wachsende Schweine



Zweifellos entsteht dem Schwein kein Schaden, wenn es durchgehend mit hohen vP-Gehalten gefüttert wird. Es ist jedoch ein erhebliches Potenzial zur Verminderung der Ausscheidungen und zur Einsparung von Futterkosten gegeben, wenn die Konzentration von vP im Futter dem in Abbildung 3 skizzierten Verlauf angepasst wird. Das im Hinblick auf die Anpassung der Aminosäurenversorgung sinnvolle Konzept der Phasenfütterung lässt sich auch zur Optimierung der P-Versorgung gezielt einsetzen (s. unten). In Tabelle 2 sind beispielhaft für ausgewählte Mastabschnitte die vP-Konzentrationen für Mastalleinfutter berechnet.

Tabelle 2: Beispiele für die notwendigen Gehalte an vP und Ca in Alleinfuttermitteln für Mast-schweine bei unterschiedlichen Gehalten an ME (in g/kg)

	vP			Ca
	12,6 MJ ME/kg	13,0 MJ ME/kg	13,4 MJ ME/kg	
ab 30 kg LM	2,6	2,7	2,8	7,0
ab 60 kg LM	2,1	2,2	2,3	6,0
ab 85 kg LM	1,6	1,7	1,7	5,0

Tabelle 3 zeigt eine pragmatische Umsetzung der Empfehlungen für **Aufzuchtferkel und Sauen**. Bei laktierenden Sauen ist der Bedarf an vP deutlich höher als während

der Trächtigkeit. Für die tragenden Sauen ist hier unterstellt, dass bis zum Verbringen in das Abferkelabteil keine Futterumstellung erfolgt. Während der ersten beiden Drittel der Trächtigkeit übersteigt der Bedarf an vP allerdings nur unwesentlich den Erhaltungsbedarf. Werden während der Tragezeit verschiedene Futter eingesetzt, kann in der Niederträchtigkeit der Gehalt an vP noch niedriger sein als in Tabelle 3 genannt (1,5 g vP/kg).

Tabelle 3: Empfohlene Gehalte an vP und Ca in Mischfuttermitteln für Sauen und Aufzuchtferkel (in g/kg; nach DLG, 1999)

	vP	Ca
Alleinfutter für tragende Sauen ¹ (11,8 MJ ME/kg)	2,0	6,0
Alleinfutter für säugende Sauen ² (13,0 MJ ME/kg)	3,3	8,5
Ergänzungsfutter für säugende Sauen (Verhältnis Getreide ³ :Ergänzungsfutter = 65:35)	5,7	23,0
Ferkelaufzuchtfutter ab 10 kg LM (13,4 MJ ME/kg)	3,5	8,5
Ferkelaufzuchtfutter ab 20 kg LM (13,4 MJ ME/kg)	3,2	8,0

¹ Auch tragende Jungsauen sind hiermit ausreichend versorgt

² Entspricht Universalfutter für tragende und säugende Sauen

³ 60 % Weizen

In einem Langzeitversuch mit der Sauenherde des Versuchsgutes Frankenforst der Universität Bonn hat sich bestätigt, dass diese Empfehlungen mit einer ausreichenden Sicherheit für die praktische Anwendung verknüpft sind (Tab. 4).

Tabelle 4: Auswirkungen einer langfristig unterschiedlichen Versorgung mit vP bei Sauen auf die Reproduktionsleistung (Mw±SD) (HOVENJÜRGEN et al., 2000b)

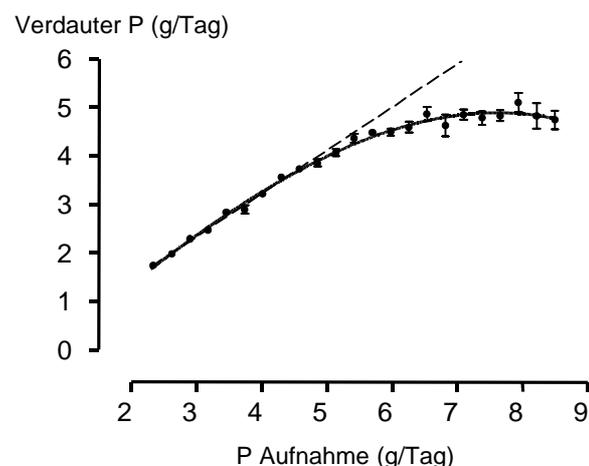
	% der Empfehlung zur Versorgung mit vP	
	75 (n = 206 Würfe)	100 (n = 205 Würfe)
Lebend geborene Ferkel je Wurf	11,3±2,6	11,0±2,6
Wurfgewicht, kg	16,3±4,2	15,8±3,9
Absetzalter in Tagen	26,4±2,3	26,5±2,3
Abgesetzte Ferkel je Wurf	9,1±2,4	9,1±2,4
Geburtsgewicht, kg/Ferkel	1,45±0,25	1,46±0,25
Absetzgewicht, kg/Ferkel	8,0±1,4	8,1±1,4
LM-Zunahme der Ferkel, g/Tag	249±48	253±47

4.2.2 Zur Bestimmung der Verdaulichkeit des P

Korrespondierend zu den Empfehlungen zur Versorgung muss die Bewertung der Futtermittel erfolgen. Dabei ist die Bestimmung der P-Verdaulichkeit an methodische Besonderheiten gebunden. Im völligen Gegensatz zu der Situation, die beispielsweise bei den Aminosäuren gegeben ist, ist die Regulation der Absorption und die fäkale endogene P-Sekretion ein wichtiger Bestandteil der P-Homöostase. Während im Bereich einer marginalen P-Versorgung eine lineare Beziehung zwischen der P-Aufnahme und der P-Verdauung besteht, wird die Verdaulichkeit mit weiter zunehmender P-Versorgung immer geringer (Abb. 4). Diesen Effekt gilt es auszuschalten, wenn im Sinne der Futtermittelbewertung die P-Verdau-

lichkeit als eine Kapazität des Futtermittels gemessen werden soll. Der Ausschuss für Bedarfsnormen hat daher bereits 1994 methodische Anforderungen formuliert, die bei der Bestimmung der P-Verdaulichkeit zu beachten sind (KIRCHGESSNER, 1994). Einer der wichtigsten Punkte hierbei ist, dass der Gehalt an vP in der getesteten Futtermischung nicht über 2 g/kg hinausgehen darf (für ein Schwein mit ca. 30 kg LM) und dass daher für die meisten Einzelkomponenten die Durchführung eines Differenzversuches erforderlich ist (DÜNGELHOEF et al., 1994).

Abbildung 4: Einfluss einer gesteigerten Aufnahme von P aus Mononatrium-Phosphat auf die P-Ausscheidung von wachsenden Schweinen (RODEHUTSCORD et al., 1999b)



Vom Arbeitskreis Futter und Fütterung der DLG wurde eine Tabelle herausgegeben, die in der internationalen Literatur verfügbare Daten zur P-Verdaulichkeit verschiedener Einzelkomponenten enthält (Tab. 5). Versuchsdaten wurden nur dann berücksichtigt, wenn sie unter Beachtung der oben genannten Restriktion zur P-Versorgung ermittelt wurden. Für einige Futtermittel wurden Schätzungen vorgenommen. Tier-, Fleischknochen- und Fischmehle, die in diese Tabelle nicht mehr aufgenommen sind, weisen eine Verdaulichkeit von 80 bis 85 % auf (RODEHUTSCORD et al., 1997).

4.2.3 Bedeutung der pflanzeigenen Phytasen

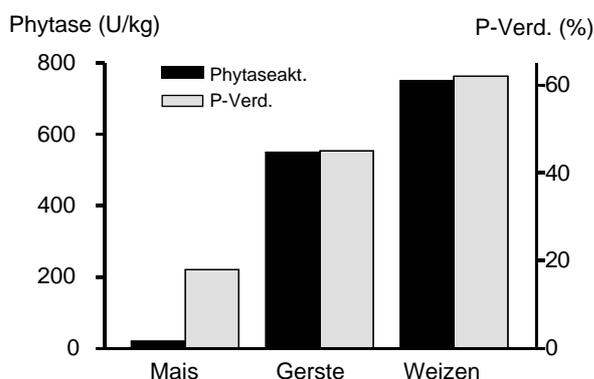
Obwohl der P pflanzlichen Ursprungs durchweg zum überwiegenden Teil als Phytin vorliegt (siehe Punkt 2), ist die Verdaulichkeit zwischen verschiedenen pflanzlichen Futtermitteln teilweise sehr verschieden. Dies ist besonders darauf zurückzuführen, dass in einigen pflanzlichen Samen auch Phytase enthalten ist, die ihre Wirkung im Verdauungstrakt des Tieres entfalten kann. Während im Maiskorn oder in Extraktionsschrotten kaum Phytase nachweisbar ist, weisen Weizen, Roggen und Triticale eine Phytaseaktivität in der Größenordnung von 500 bis etwa 1500 U/kg auf (mit großen Schwankungen zwischen Sorten und abhängig von Umweltbedingungen). Dies ist ein wesentlicher Grund für die Unterschiede in der P-Verdaulichkeit (Abb. 5). Wird die native Phytase vollständig inaktiviert, geht die P-Verdaulichkeit auch beim Weizen auf ca. 20 % zurück. In weizenreichen Schweine- und Geflügelrationen ist es daher von großer Bedeutung, ob die native Phytaseaktivität während der Lagerung und Verarbeitung (Trocknung) erhalten geblieben ist oder nicht. Die

Tabelle 5: Einordnung der Futtermittel in Klassen der Verdaulichkeit (nach DLG, 1999)

P-Verdaulichkeit (%)	Futtermittel
10	Heu, Leinsamenextraktionsschrot, Melasseschnitzel, Pressschnitzel, Rüben, Stroh, Tapioka
15	Körnermais
20	Baumwollsaatextraktionsschrot, Maisfuttermehl, Maiskleberfutter
25	Hafer, Kartoffelschälabfälle, Weizenkleberfutter, Weizenquellwasser
30	Erdnußextraktionsschrot, Kleien, Kokosextraktionsschrot, Palmkernextraktionsschrot, Rapsextraktionsschrot, Schlempen, Sesamextraktionsschrot, Weizenfuttermehl
35	Ackerbohnen, Birtreber, Sojabohnen, Sojaextraktionsschrot, Sonnenblumenextraktionsschrot
40	Rapssaat
45	Erbsen, Gerste
50	Bierhefe (getr.), Corn-Cob-Mix, Grasgrünmehl, Grünfutter, Kartoffeln, Kartoffelschlempe, Kartoffelpülpe, Lupinen, Luzernegrünmehl, Roggen, Silagen, Speisereste, Triticale
65	Weizen
70	Dicalciumphosphat, Kartoffeleiweiß
80	Molkeprodukte, Mono-Dicalciumphosphat
90	Milch (Vollmilch u. a., frisch und getrocknet), Monocalciumphosphat
95	Mononatriumphosphat, Orthophosphorsäure

beim Pelletieren und Konditionieren von Futtermischungen erzielten Temperatur- ($\geq 70^\circ\text{C}$) und Feuchtigkeitsverhältnisse reichen häufig aus, um eine erhebliche Verminderung der nativen Phytaseaktivität zu bewirken.

Abbildung 5: Phytaseaktivität und Verdaulichkeit des P in ausgewählten Futtermitteln für Schweine (nach DÜNGELHOEF et al., 1994; RODEHUTSCORD et al., 1996)



4.2.4 Mineralische P-Träger

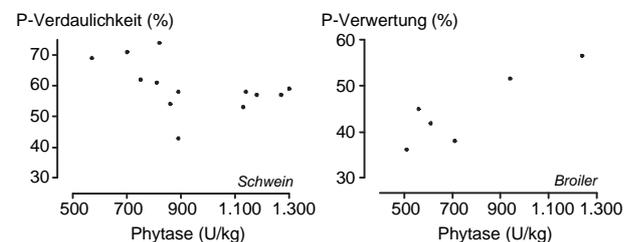
Die bislang durchgeführten Messungen mit verschiedenen mineralischen P-Trägern zeigen einen deutlichen Unterschied in der Verdaulichkeit auch dieser Komponenten auf (DELLAERT et al., 1990; EECKHOUT und DE PAEPE, 1997; RODEHUTSCORD et al., 1994). Vor allem bei den Dicalcium-Phosphaten gibt es offensichtlich Unter-

schiede. Der Umfang der Untersuchungen mit Phosphaten unterschiedlicher Herkunft und Qualität mit der notwendigen Restriktion in der P-Aufnahme ist bislang aber noch unzureichend. Da der Wegfall der tierischen P-Träger eine deutliche Steigerung des Einsatzes mineralischer P-Quellen nach sich zieht, ist hier dringender Arbeitsbedarf gegeben.

4.2.5 Einflussgrößen für die Verdaulichkeit

Vor allem für Weizen ist intensiver untersucht worden, wie hoch die Variation in der Verdaulichkeit des P **zwischen verschiedenen Sorten bzw. Partien** ist. In den in Bonn in den zurückliegenden Jahren untersuchten Weizenpartien schwankte die Verdaulichkeit zwischen 43 und 74 % (Abb. 6), wobei allerdings eine Korrelation zur Aktivität der nativen Phytase nicht erkennbar war. Hier spielen vermutlich Faktoren wie die Löslichkeit des Phytins und die Verteilung auf die verschiedenen Inositolphosphate eine Rolle, was weiter zu untersuchen sein wird. Die Düngung der Pflanzenbestände mit N und P spielt aber offensichtlich in diesem Zusammenhang keine Rolle (BARRIER-GUILLOT et al., 1996; HOVENJÜRGEN et al., 2000a).

Abbildung 6: Beziehung zwischen der nativen Phytaseaktivität und der Verdaulichkeit des P beim Schwein (links) bzw. der Gesamtverwertung des P beim Broiler (rechts) (nach Daten von HOVENJÜRGEN et al., 2000a; OLOFFS et al., 2000; RODEHUTSCORD et al., 1996)



In allen Versuchen zur P-Verdaulichkeit war der Variationskoeffizient in einer Größenordnung zwischen 5 und 26 % immer erheblich höher als der in den identischen Versuchen für die Verdaulichkeit organischer Rohrnährstoffe bestimmte Variationskoeffizient. HOVENJÜRGEN (2000) griff daher in einem umfangreichen Versuchsansatz die Frage auf, ob ein **genetischer Einfluss** auf die Verdaulichkeit des P gegeben ist. Er fand signifikante Unterschiede in der Verdaulichkeit zwischen verschiedenen Schweinerassen bzw. -kreuzungen von bis zu 6 Prozentpunkten (Tab. 6). Ein Vater-Effekt auf die Verdaulichkeit ließ sich allerdings nicht nachweisen, sodass eine züchterische Bearbeitung dieses Merkmals nicht sinnvoll erscheint.

Tabelle 6: Verdaulichkeit des P bei verschiedenen Schweinerassen und -kreuzungen (least-square means \pm SE, HOVENJÜRGEN, 2000)¹⁾

Rasse/Kreuzung				
DE \pm DL	DL	Du(Pi)	Pi	Pi \pm DL
41,1 \pm 1,0	38,7 \pm 0,6	34,8 \pm 1,2	35,3 \pm 0,5	37,8 \pm 0,8

¹⁾ der Effekt der Rasse war statistisch signifikant ($P < 0,001$)

In der Literatur wird die Frage nach dem Einfluss der **Lebendmasse** auf die Verdaulichkeit widersprüchlich beantwortet. Häufig ist aber ein Unterschied in der Lebendmasse auch mit einer Veränderung im Versorgungsniveau verbunden gewesen. Aus Abbildung 3 wird klar erkennbar, dass die zur Bedarfsdeckung notwendige Konzentration an vP mit zunehmender LM deutlich geringer wird. Untersuchungen in verschiedenen LM-Abschnitten setzen daher eine Anpassung der vP-Gehalte voraus, wenn eine suboptimale P-Versorgung durchgehend gewährleistet sein soll. Unter Beachtung dieser Restriktion ergab ein Vergleich von Schweinen mit ca. 15 und ca. 40 kg LM keinen deutlichen Unterschied in der Verdaulichkeit von P aus Monocalcium-Phosphat bzw. aus pflanzlichen Quellen und auch keinen Unterschied in der Effizienz supplementierter mikrobieller Phytase (RODEHUTSCORD et al., 1999a). Die bislang gemessenen Verdaulichkeiten dürfen daher ungeachtet der LM der Tiere in der Futteroptimierung verwendet werden.

4.3 Geflügel

Beim Geflügel wird die Bewertung des P bislang nicht so konsequent vorgenommen wie beim Schwein. Offensichtlich fehlt es noch an grundlegenden Messungen zur Verwertbarkeit verschiedener P-Quellen (GFE, 1999). Im Vergleich mit den Messungen am Schwein legen Untersuchungen mit Legehennen und Broilern allerdings die Vermutung nahe, dass die Messwerte vom Schwein nicht einfach auf das Geflügel übertragen werden können (KORNEGAY et al., 1996; OLOFFS et al., 1998; OLOFFS et al., 2000). International üblich ist derzeit die simple Differenzierung in Phytin-P und Nicht-Phytin-P (NPP). Vereinfachend wird dabei angenommen, dass die Verwertung des NPP zur Deckung des Nettobedarfes 70 % beträgt. Der gesamte Phytin-P wird, und dies ist eine gravierende Schwachstelle der gegenwärtigen Bewertung, als vollständig unverwertbar angesehen.

Als Faktoren für den Nettobedarf an P werden folgende Werte verwendet (GFE, 1999):

- Erhaltungsbedarf 80 mg/kg LM und Tag,
- P-Ansatz im LM-Zuwachs 5,5 g/kg
- P-Gehalt im Ei 1,7 g/kg.

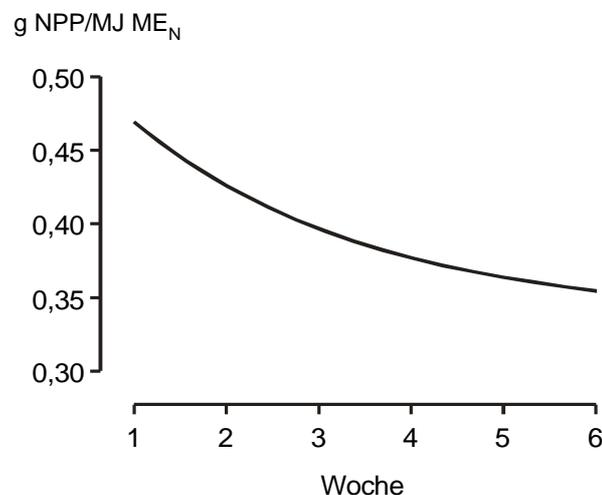
Beim wachsenden **Broiler** ist dementsprechend der tägliche Bedarf an NPP bis zur gegenwärtig üblichen Schlachtreife kontinuierlich zunehmend. Der ebenso zunehmende Futtermittelverbrauch je kg Zuwachs bedingt allerdings wie beim Schwein, dass die Konzentration im Futter im Verlaufe einer sechswöchigen Mast um etwa 25 % reduziert werden kann (Abb. 7). Auch hier ist also durch eine Unterteilung der Mast in Phasen ein Potenzial zur Einsparung von P gegeben.

Bei der **Legehenne** wird eine Versorgung von 0,28 g NPP je MJ ME_N empfohlen. Der Einfluß der Lebendmasse bzw. der Legeleistung ist hier vernachlässigbar gering.

Für andere Mastgeflügel (**Enten, Puten**) wird derzeit an der Ableitung von Versorgungsempfehlungen gearbeitet. Hier erscheint das Einsparungspotenzial für P, gemessen an der gegenwärtigen Fütterungspraxis, sehr groß. Wegen der starken lokalen Konzentrierung dieser Geflügelarten ist dringender Forschungsbedarf gegeben.

Die Bewertung der Futtermittel ist in dem bestehenden System ausschließlich auf die analytische Differenzierung in Phytin-P und NPP beschränkt. Messungen mit Tieren

Abbildung 7: Notwendige Konzentration an Nicht-Phytin-P (NPP) im Futter für Broiler in Abhängigkeit vom Alter der Tiere (nach GfE, 1999)



sind nicht notwendig. Der Gehalt an Gesamt-P im Futter ergibt sich unter Berücksichtigung des Anteils des NPP und kann für verschiedene Futtermischungen bei gleichen Gehalte an NPP verschieden sein.

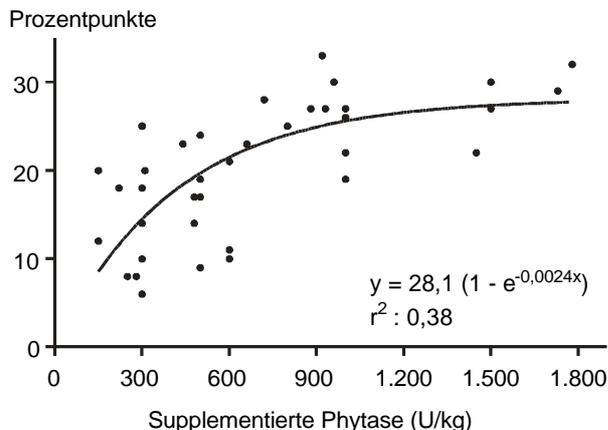
Dauerhaft ist diese Bewertung jedoch unbefriedigend. Einerseits ist hinreichend bekannt, dass Phytin-P in nennenswertem Maße auch vom Geflügel verwertet werden kann, wenn das Futter native Phytase enthält (siehe Abb. 6). Andererseits besteht ein berechtigter Zweifel an der Annahme, dass die Verwertung des NPP konstant 70 % beträgt, unabhängig von der P-Quelle. Es ist daher dringend erforderlich, dass eine standardisierte Methode zur Bewertung des Futters auch für das Geflügel erarbeitet wird (GFE, 1999). In mehreren Forschungseinrichtungen, unter anderen auch in Halle, wird derzeit hieran gearbeitet. Dabei wird auch zu prüfen sein, ob an Broilern ermittelte Werte für die Verwertbarkeit des P auf andere Masttiere und auf Legehennen übertragbar sind. Wegen der sehr hohen Ca-Gehalte im Futter für die Legetiere erscheint die Übertragung auf die Henne problematisch.

5. Mikrobielle Phytase

Seitdem mikrobielle Phytase auf fermentativem Wege gewonnen wird und als Futterzusatzstoff zur Verfügung steht, lässt sich eine deutliche Steigerung der Verdaulichkeit des P in phytinreichen phytasearmen Futtermischungen erzielen. Dies ist mittlerweile in einer sehr großen Zahl von Publikationen sowohl für das Schwein als auch für das Geflügel beschrieben. In Abbildung 8 ist beispielhaft für das Schwein das Ergebnis einer Literaturlauswertung gezeigt.

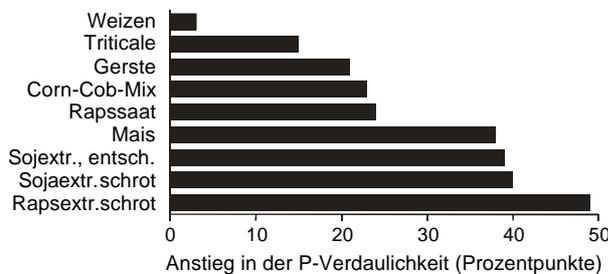
Realistischerweise ist davon auszugehen, dass der Bereich der maximalen Effizienz eines Phytasezusatzes im Mischfutter bis ca. 500 U/kg gegeben ist, und entsprechend wird diese Dosierung für *Aspergillus niger*-Phytasen häufig empfohlen. Selbstverständlich spielt aber die Zusammensetzung des Futters eine Rolle. Je geringer der Anteil des Phytin-P in der Ration ist und je mehr native Phytase enthalten ist, desto geringer ist die Wirksamkeit eines Zusatzes von Phytase. Abbildung 9 zeigt dies anhand von Messungen, die mit Einzelkomponenten vorge-

Abbildung 8: Anstieg in der Verdaulichkeit des P beim Schwein bei phytinreichen, phytasearmen Rationen mit Zusatz einer Aspergillus niger-Phytase (DÜNGELHOEF und RODEHUTSCORD, 1995)



nommen wurden. Die maximale Verdaulichkeit, die bei hoher Phytasedosierung erreicht werden kann, ist nicht für alle Futtermittel gleich. Für die routinemäßige Anwendung wird jedoch derzeit generell von 65 % ausgegangen.

Abbildung 9: Einfluss der Supplementierung einer Aspergillus niger-Phytase auf die Verdaulichkeit des P aus verschiedenen Futtermitteln (Daten aus verschiedenen Bonner Arbeiten)



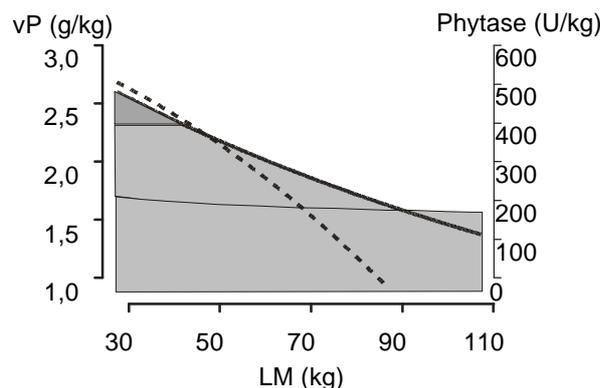
Eingebürgert hat sich das Arbeiten mit sogenannten Äquivalenzen, die ausdrücken sollen, wieviel Gramm mineralischen Phosphors je 500 U Phytase eingespart werden können. Mit der zunehmenden Differenzierung in der P-Bewertung sind solche Äquivalente nicht mehr voll befriedigend, da sich auch verschiedene mineralische P-Träger hinsichtlich der Verdaulichkeit unterscheiden. Logischerweise ist daher die Ableitung eines Äquivalenzwertes auf der Basis des vP (für das Schwein) oder des verwertbaren P (für das Geflügel) notwendig.

Auf der Grundlage einer Vielzahl von Literaturdaten (DÜNGELHOEF und RODEHUTSCORD, 1995) wurde daher für Schweinerationen ein Äquivalenzwert von 0,16 g vP je 100 U Phytase abgeleitet, der für phytinreiche Futtermischungen bis zu einer Dosierung von 500 U/kg gültig ist. Dieser Wert ist zunächst nur für die 3-Phytase aus *Aspergillus niger* abgeleitet, weil alle Versuche, die in der Auswertung berücksichtigt werden konnten, mit dieser Phytase durchgeführt wurden. Bei neuen Phytasen ist zu prüfen,

ob eine vergleichbare Effizienz gegeben ist oder ob zukünftig eine differenzierte Bewertung für verschiedene Phytasen vorgenommen werden muss. Standardisierte methodische Vorgehensweisen hierzu wurden entwickelt.

Ein Äquivalenzwert auf der Basis des vP ist in der Mischfutteroptimierung auch deshalb sinnvoll, weil in vielen Fällen eine geringere Dosierung als 500 U/kg eingestellt werden kann. In Abbildung 10 ist dies anhand des Beispiels einer Gerste/Weizen/Soja-Ration für die Schweinemast erläutert. In der Graphik ist die Empfehlung für den vP-Gehalt des Futters nochmals aufgenommen. Ab einer LM von etwa 90 kg ist eine Deckung des vP-Bedarfes ohne mineralische Ergänzung und ohne Einsatz von Phytase nur aus Getreide und Sojaextraktionsschrot möglich. Bis zum Erreichen dieser LM ist ein Defizit in der Versorgung mit vP aus den Grundkomponenten gegeben, das mit zunehmender LM geringer wird. Entsprechend kann die Ergänzung von Phytase von etwa 500 U/kg Futter auf 100 U/kg bei etwa 80 kg LM reduziert werden. Bei Phytaseinsatz ist die Notwendigkeit einer zusätzlichen Verwendung von mineralischem P bis zu einer LM von etwa 45 kg gegeben.

Abbildung 10: Kalkulation zur notwendigen Phytaseergänzung einer Gerste/Weizen/Soja-Mischung für Schweine



Die beiden Linien kennzeichnen die Empfehlung zur Versorgung mit vP (—) und die zur Bedarfsdeckung notwendige Phytaseergänzung (- - -). Die Flächen kennzeichnen den Beitrag der Phytase zur Deckung des vP-Bedarfes (mittlere Fläche) bzw. den darüber hinaus noch erforderlichen Einsatz von mineralischem P (obere Fläche).

Die in Abbildung 10 beschriebenen funktionalen Zusammenhänge können möglicherweise nicht vollständig in der praktischen Anwendung umgesetzt werden. Die Abbildung zeigt aber deutlich, welche Möglichkeiten zur Anpassung der P-Versorgung im Rahmen einer Phasenfütterung gegeben sind. Der Einsatz von mikrobieller Phytase kann Bestandteil dieses Konzeptes sein, wenn die Effizienz der Phytase auf der Basis des vP ausgedrückt wird.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In den zurückliegenden Jahren wurden sowohl für Wiederkäuer als auch für Schweine und Geflügel neue Versorgungsempfehlungen für P erarbeitet. Beim Wiederkäuer wird mit einer Verwertung des P in Höhe von 70 % gerechnet, unabhängig von der P-Quelle. In den meisten Rationen für Milchkühe, Mastrinder und Schafe ist eine Ergänzung mineralischer P-Quellen nicht erforderlich. Beim

Schwein und beim Geflügel ist die Verwertung des P in Abhängigkeit von der Quelle sehr verschieden. Phytinreiche pflanzliche Futtermittel weisen eine geringe Verwertbarkeit auf, wenn keine pflanzeneigene Phytaseaktivität gegeben ist. In der aktuellen Bewertung auf der Basis des verdaulichen P für das Schwein findet dies Berücksichtigung. Die Bewertung auf der Basis des Nicht-Phytin-P für das Geflügel beachtet dies im Prinzip ebenfalls. Hier sind aber weitere Arbeiten notwendig, damit zukünftig die P-Bewertung standardisiert unter Einbeziehung von Messungen am Tier vorgenommen werden kann. In der Mast von Schwein und Geflügel kann die P-Versorgung im Verlaufe der Mast kontinuierlich reduziert und ein Einsparungspotenzial für P genutzt werden. Im Hinblick auf den Wegfall der tierischen P-Träger in der Fütterung und im Hinblick auf die begrenzten weltweiten Reserven von Rohphosphaten ist dies von besonderer Bedeutung.

7. Literatur

- BARRIER-GUILLOT, B., P. CASADO, P. MAUPETIT, C. JONDREVILLE, F. GATEL, M. LARBIER (1996): Wheat phosphorus availability: 2 - In vivo study in broilers and pigs; relationship with endogenous phytase activity and phytic phosphorus content in wheat. *J. Sci. Food Agric.* 70, 69-74
- BREVES, G., C. PRAECHTER, B. SCHRÖDER (1999): Calcium metabolism in ruminants - physiological aspects and effects of anion rich diets. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* 8, 27-35
- BRINTRUP, R., T. MOOREN, U. MEYER, H. SPIEKERS, E. PFEFFER (1993): Effects of two levels of phosphorus intake on performance and faecal phosphorus excretion of dairy cows. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 69, 29-36
- DELLAERT, B. M., G. F. V. D. PEET, A. W. JONGBLOED, S. BEERS (1990): A comparison of different techniques to assess the biological availability of feed phosphates in pig feeding. *Nethl. J. Agric. Sci.* 38, 555-566
- DLG (1999): Schweinefütterung auf der Basis des Verdaulichen Phosphors. DLG-Information 1/1999
- DÜNGELHOEF, M., M. RODEHUTSCORD (1995): Wirkung von Phytasen auf die Verdaulichkeit des Phosphors beim Schwein. *Übers. Tierernährg.* 23, 133-157
- DÜNGELHOEF, M., M. RODEHUTSCORD, H. SPIEKERS, E. PFEFFER (1994): Effects of supplemental microbial phytase on availability of phosphorus contained in maize, wheat and triticale to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 49, 1-10
- EECKHOUT, W., M. DE PAEPE (1994): Total phosphorus, phytate-phosphorus and phytase activity in plant feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 47, 19-29
- EECKHOUT, W., M. DE PAEPE (1997): The digestibility of three calcium phosphates for pigs as measured by difference and by slope-ratio assay. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 77, 53-60
- FERNÁNDEZ, J. A. (1995): Calcium and phosphorus metabolism in growing pigs. II. Simultaneous radio-calcium and radio-phosphorus kinetics. *Livest. Prod. Sci.* 41, 243-254
- GFE (1993): Überarbeitete Empfehlungen zur Versorgung von Milchkühen mit Calcium und Phosphor. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* 1, 108-113
- GFE (1995): Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. 6. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Mastriender. DLG-Verlag, Frankfurt a. M.
- GFE (1999): Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. 7. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Legehennen und Masthühner (Broiler). DLG-Verlag, Frankfurt a. M.
- GONGNET, G. P., M. RODEHUTSCORD, E. PFEFFER (1997): Verwertbarkeit des Phosphors aus Tricalciumphosphat bei laktierenden Ziegen. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 77, 105-110
- GÜTTE, J. O., H. J. LANTZSCH, S. MOLNÁR, W. LENKEIT (1961): Veränderungen der intestinalen Phosphor-Absorption und -Exkretion im Verlauf der Gravidität und Laktation des Schweines bei konstanter Ernährung. *Z. Tierphysiologie, Tierernährung und Futtermittelkunde* 16, 75-90
- HARLAND, B. F., J. HARLAND (1980): Fermentative reduction of phytate in rye, white, and whole wheat breads. *Cereal Chem.* 57, 226-229
- HOVENJÜRGEN, M. (2000): Futter- und tierbedingte Einflüsse auf die Phosphorverdaulichkeit beim Schwein. *Diss. Agrar, Universität Bonn*
- HOVENJÜRGEN, M., M. RODEHUTSCORD, E. PFEFFER (2000a): Einflüsse von Düngung und Sorte auf die Verdaulichkeit des Phosphors aus heimischen pflanzlichen Futtermitteln beim Schwein. In: 6. Tagung Schweine- und Geflügelernährung (Hrsg. RODEHUTSCORD, M., H. NONN und K. EDER), Fachverlag Köhler, 217-219
- HOVENJÜRGEN, M., H. JÜNGST, M. RODEHUTSCORD, E. PFEFFER (2000b): Brauchen wir Sicherheitszuschläge bei der Rationsberechnung für Zuchtsauen auf der Basis des verdaulichen Phosphors? In: 6. Tagung Schweine- und Geflügelernährung (Hrsg. RODEHUTSCORD, M., H. NONN und K. EDER), Fachverlag Köhler, 99-101
- JONGBLOED, A. W., H. EVERTS (1992): Apparent digestible phosphorus in the feeding of pigs in relation to availability, requirement and environment. 2. The requirement of digestible phosphorus for piglets, growing-finishing pigs and breeding sows. *Nethl. J. Agric. Sci.* 40, 123-136
- KIRCHGESSNER, M. (1994): Mitteilungen des Ausschusses für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie: Die Bestimmung des verdaulichen Phosphors beim Schwein. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* 2, 113-119
- KIRCHGESSNER, M. (1997): Mitteilungen des Ausschusses für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie: Überarbeitete Empfehlungen zur Versorgung von Schweinen mit Phosphor. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.* 6, 193-200
- KODDEBUSCH, L., E. PFEFFER (1988): Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Phosphor verschiedener Herkünfte an laktierenden Ziegen. *J. Anim. Phys. a. Anim. Nutr.* 60, 269-275
- KORNEGAY, E. T., D. M. DENBOW, Z. YI, V. RAVINDRAN (1996): Response of broilers to graded levels of microbial phytase added to maize-soyabean-meal-based diets containing three levels of non-phytate phosphorus. *Br. J. Nutr.* 75, 839-852
- LOPEZ, H. W., F. VALLERY, M. A. LEVERAT-VERNY, C. COUDRAY, C. DEMIGNE, C. REMESY (2000): Dietary Phytic Acid and Wheat Bran Enhance Mucosal Phytase Activity in Rat Small Intestine. *J. Nutr.* 130, 2020-2025
- OLOFFS, K., A. DOLBUSIN, H. JEROCH (1998): Vergleich nativer Weizenphytase und mikrobieller Phytase bei Legehennen und Broilern. *Arch. Geflückde.* 62, 260-263
- OLOFFS, K., J. COSSA, H. JEROCH (2000): Bedeutung von nativen Phytasen pflanzlicher Futterkomponenten auf die Phosphor-Verwertung bei Legehennen und Broilern. *Arch. Geflückde.* 64, 24-28
- PALLAUF, J., G. RIMBACH (1997): Nutritional significance of phytic acid and phytase. *Arch. Anim. Nutr.* 50, 301-319
- PARK, W.-Y., T. MATSUI, F. YANO, H. YANO (2000): Heat treatment of rapeseed meal increases phytate flow into the duodenum of sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 88, 31-37
- POINTILLART, A., N. FONTAINE, M. THOMASSET (1984): Phytate phosphorus utilization and intestinal phosphatases in pigs fed low phosphorus: wheat or corn diets. *Nutr. Rep. Int.* 29, 473-483
- RODEHUTSCORD, M., M. FAUST, H. LORENZ (1996): Digestibility of phosphorus contained in soybean meal, barley, and different varieties of wheat, without and with supplemental phytase fed to pigs and additivity of digestibility in a wheat-soybean-meal diet. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 75, 40-48
- RODEHUTSCORD, M., M. FAUST, C. HOF (1997): Digestibility of phosphorus in protein-rich ingredients for pig diets. *Arch. Anim. Nutr.* 50, 201-211
- RODEHUTSCORD, M., R. HAVERKAMP, E. PFEFFER (1998): Inevitable losses of phosphorus in pigs, estimated from balance data using diets deficient in phosphorus. *Arch. Anim. Nutr.* 51, 27-38
- RODEHUTSCORD, M., G. KRAUSE, E. PFEFFER (1999a): Effect of body weight on phosphorus digestibility and efficacy of a microbial phytase in young pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 52, 139-153
- RODEHUTSCORD, M., M. FAUST, E. PFEFFER (1999b): The course of phosphorus excretion in growing pigs fed continuously increasing phosphorus concentrations after a phosphorus depletion. *Arch. Anim. Nutr.* 52, 323-334
- RODEHUTSCORD, M., H. HEUVERS, E. PFEFFER (2000): Effect of organic matter digestibility on obligatory faecal phosphorus loss in lactating goats, determined from balance data. *Anim. Sci.* 70, 561-568
- RODEHUTSCORD, M., M. FAUST, M. DÜNGELHOEF, H. SPIEKERS, E. PFEFFER (1994): Zur Messung der Verdaulichkeit des Phosphors aus mineralischen Phosphor-Trägern sowie aus Mineralfuttern, Eiweißkonzentraten und Alleinfuttern für Schweine. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 71, 169-178
- SCHEUERMANN, S. E., H.-J. LANTZSCH, K. H. MENKE (1988): In vitro and in vivo Untersuchungen zur Hydrolyse von Phytat. I. Löslichkeit von Phytat. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 60, 55-63
- SHARMA, C. B., M. GOEL, M. IRSHAD (1978): Myoinositol hexaphosphate as a potential inhibitor of alpha-amylases. *Phytochemistry* 17, 201-204
- SPIEKERS, H., M. RODEHUTSCORD (1998): Mit „Umsetzbarer Energie“ füttern. *LZ Rheinland Nr.* 15, 38-40
- SPIEKERS, H., R. BRINTRUP, M. BALMELLI, E. PFEFFER (1993): Influence of dry matter intake on faecal phosphorus losses in dairy cows fed rations low in phosphorus. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 69, 37-43
- VALK, H., L. B. J. SEBEK (1999): Influence of long-term feeding of limited amounts of phosphorus on dry matter intake, milk production, and body weight of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82, 2157-2163

- VEMMER, H. (1982): Der Einfluß der Phosphorversorgung auf die intestinale Absorption von Phosphor bei wachsenden Schweinen. Z. Tierphysiol., Tierernährg. u. Futtermittelkde. 47, 220-230
- WU, Z., L. D. SATTER (2000): Milk Production and Reproductive Performance of Dairy Cows Fed Two Concentrations of Phosphorus for Two Years. J. Dairy Sci. 83, 1052-1063
- WU, Z., L. D. SATTER, R. SOJO (2000): Milk Production, Reproductive Performance, and Fecal Excretion of Phosphorus by Dairy Cows Fed Three Amounts of Phosphorus. J. Dairy Sci. 83, 1028-1041