

Aus dem Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. R. Jahn)
der
Naturwissenschaftlichen Fakultät III-
Agrarwissenschaften, Geowissenschaften, Mathematik und Informatik
der
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

***Einfluss einer Zulage unterschiedlicher Kohlenhydrate auf die praecaecale
und postileale Umsetzung und die Ausscheidung von Phosphor beim
Schwein***

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor agriculturarum (Dr. agr.)

vorgelegt von
Diplomagraringenieurin
Tina Baumgärtel
geb. am 10.06.1979 in Karl-Marx-Stadt

Gutachter: Prof. Dr. M. Rodehutschord
Prof. Dr. E. von Borell
Prof. Dr. O. Simon

Dekan: Prof. Dr. P. Wycisk

Verteidigung am: 29. Juni 2009

Halle/Saale 2009

Diese Arbeit wurde dankenswerter Weise durch ein sechsmonatiges Anschlussstipendium der H. Wilhelm Schaumann Stiftung, Hamburg, gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Verzeichnis der Abbildungen	VI
Verzeichnis der Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Bedeutung des P im tierischen Organismus	3
2.2 Vorkommen des P in pflanzlichen Futtermitteln	4
2.3 Phytasen	6
2.3.1 Charakteristik.....	6
2.3.2 Aktivität und Spezifität.....	6
2.3.3 Bedeutung pflanzeneigener Phytase.....	7
2.3.4 Bedeutung intestinaler Phytase.....	8
2.3.5 Bedeutung supplementierter mikrobieller Phytase.....	10
2.4 Weitere Ansätze zur Verbesserung der P-Verdaulichkeit	11
2.5 Kohlenhydrate und ihre Wirkung im Verdauungstrakt	12
2.5.1 Nicht-Stärke-Polysaccharide.....	13
2.5.2 Charakteristik der verwendeten Kohlenhydrat-Substrate.....	14
2.5.3 Fermentierbarkeit von NSP.....	17
2.5.4 Einflussfaktoren auf die Fermentation.....	18
2.5.5 Effekte von NSP im Verdauungstrakt.....	20
2.5.6 Einfluss von NSP und Stärke auf die Verdaulichkeit von Nähr- und Mineralstoffen.....	25
3 Fragestellungen	35
4 Material und Methoden	36
4.1 Allgemeiner Teil	36
4.1.1 Tiermaterial.....	36
4.1.2 Futtermischungen.....	37
4.1.3 Versuchsbedingungen und –durchführung.....	37
4.1.4 Probengewinnung.....	40
4.1.5 Analytik.....	41
4.1.6 Berechnungen.....	43
4.1.7 Datenauswertung.....	46
4.2 Spezieller Teil	47
4.2.1 Versuche Ia und Ib.....	47

4.2.2	Versuche II und III.....	51
5	Ergebnisse	55
5.1	Versuch Ia.....	55
5.2	Versuch Ib.....	63
5.3	Versuch II.....	68
5.4	Versuch III.....	74
6	Diskussion	80
6.1	Fehlerbetrachtung.....	80
6.1.1	Versuchsspezifische Fehlerquellen.....	80
6.1.2	Versuchsübergreifende Betrachtung.....	83
6.2	Einfluss einer oralen Zulage von Kohlenhydrat-Substraten	87
6.2.1	Verdaulichkeit der OS der Kohlenhydrat-Substrate.....	87
6.2.2	Einfluss der KH-Substrate auf die Umsetzungen der T und OS.....	91
6.2.3	Einfluss der KH-Substrate auf den Phytatabbau und die Umsetzungen von P und Ca.....	95
6.2.4	Einfluss der KH-Substrate auf die Umsetzungen von N.....	109
6.3	Einfluss einer intracaecalen Pektingabe in Abhängigkeit von der P-Versorgung	113
6.3.1	Verdaulichkeit der OS.....	113
6.3.2	Phytatabbau und Umsetzungen von P und Ca.....	116
6.3.3	Umsetzungen von N.....	126
6.4	Schlussfolgerungen und Ausblick	130
7	Zusammenfassung	132
	Literaturverzeichnis	138
	Tabellenanhang	161

Tabellenverzeichnis

1	Mittlere Lebendmasse der Tiere zur Einstallung (Versuch Ib) bzw. zur Fistulierung.....	36
2	Zusammensetzung der Basaldiäten [g/kg].....	47
3	Chemische Zusammensetzung der Basaldiäten und der Substrate in den Versuchen Ia und Ib [g/kg T].....	48
4	Randomisierte Verteilung der Tiere auf die Behandlungen in den Versuchen Ia und Ib	49
5	Zusammensetzung der Basaldiäten in den Versuchen II und III [g/kg].....	52
6	Chemische Zusammensetzung der in den Versuchen II und III verwendeten BD und des Pektins [g/kg T].....	52
7	Randomisierte Verteilung der Tiere auf die Behandlungen in den Versuchen II und III.....	53
8	Aufnahme (MW), Konzentration, Exkretion und Verdaulichkeit der Trockensubstanz (LSmeans, Stdf.) in Versuch Ia	56
9	Aufnahme (MW), Exkretion und Verdaulichkeit der Organischen Substanz (LSmeans, Stdf.) in Versuch Ia	57
10	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Phosphor (LSmeans, Stdf.) sowie Aufnahme (MW) und Abbau von Phytat (LSmeans, Stdf.) in Versuch Ia.....	59
11	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Calcium (LSmeans; Stdf.) in Versuch Ia.....	61
12	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen (LSmeans, Stdf.) von Stickstoff in Versuch Ia.....	63
13	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Verdaulichkeit der T und OS (LSmeans, Stdf.) in Versuch Ib	64
14	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen (LSmeans, Stdf.) von Phosphor, Calcium und Stickstoff in Versuch Ib.....	67
15	Aufnahme (MW), relative faecale Exkretion und Verdaulichkeit der Organischen Substanz (LSmeans) in Versuch II	68
16	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Phosphor (LSmeans) in Versuch II.....	70
17	Aufnahme (MW) und Abbau (LSmeans) von Phytat in Versuch II.....	72
18	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Calcium (LSmeans) in Versuch II.....	73
19	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Stickstoff (LSmeans) in Versuch II.....	74
20	Aufnahme (MW), relative faecale Exkretion und Verdaulichkeit (LSmeans) der Organischen Substanz in Versuch III.....	75
21	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Phosphor sowie Aufnahme (MW) und Abbau (LSmeans) von Phytat in Versuch III.....	76

22	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Calcium (LSmeans) in Versuch III.....	78
23	Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Stickstoff (LSmeans) in Versuch III.....	79
24	Vergleich der Standardfehler der mittleren VQ (LSmeans) für die OS.....	83
25	Vergleich der quantitativen mit den Marker-basierten VQ und Wiederfindung des TiO ₂ in Versuch Ib.....	86

Anhangstabellen

A-1	Zusammensetzung des Prämix in den Versuchen I – III
A-2	Lebendmassen der Tiere [kg] in allen Versuchen
A-3	Konzentrationen an T, XA, N, P, Ca und TiO ₂ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch Ia
A-4	Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Trockensubstanz in Versuch Ia
A-5	Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Organischen Substanz in Versuch Ia
A-6	Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Phosphor in Versuch Ia
A-7	Konzentrationen an IP ₆₋₃ im Chymus; Aufnahme, ilealer Fluss und pc Abbau von Phytat (IP ₆) in Versuch Ia
A-8	Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Calcium in Versuch Ia
A-9	Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Stickstoff in Versuch Ia
A-10	Konzentrationen an T [% der FS], XA, N, P, Ca und TiO ₂ [g/kg T] im Kot der Tiere in Versuch Ib
A-11	Aufnahme, gemessene faecale Exkretion, sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit der T in Versuch Ib
A-12	Aufnahme, gemessene faecale Exkretion sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit der OS in Versuch Ib
A-13	Aufnahme, gemessene faecale und renale Exkretion, Retention, Bilanz sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit von Phosphor in Versuch Ib
A-14	Aufnahme, gemessene faecale und renale Exkretion, Retention, Bilanz sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit von Calcium in Versuch Ib
A-15	Aufnahme, gemessene faecale und renale Exkretion, Retention, Bilanz sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit von Stickstoff in Versuch Ib
A-16	Konzentrationen an T [% der FS], XA, N, P, Ca und TiO ₂ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch II
A-17	Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Organischen Substanz in Versuch II

- A-18 Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Phosphor in Versuch II
- A-19 Konzentrationen an IP₆₋₃ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch II
- A-20 Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt Abbau von Phytat in Versuch II
- A-21 Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Calcium in Versuch II
- A-22 Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Stickstoff in Versuch II
- A-23 Konzentrationen an T [g/kg FS], XA, N, P, Ca und TiO₂ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch III
- A-24 Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Organischen Substanz in Versuch III
- A-25 Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Phosphor in Versuch III
- A-26 Konzentrationen an IP₆₋₃ im Chymus; Aufnahme, ilealer Fluss und pc Abbau von Phytat (IP₆) in Versuch III
- A-27 Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Ca in Versuch III
- A-28 Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von N in Versuch III
- A-29 mittlere Ca:tP-Verhältnisse in Futter, Chymus und Kot in allen Versuchen

Verzeichnis der Abbildungen

1	Molekularstruktur von Phytinsäure (vereinfacht nach ERDMAN, 1979).....	5
2	Einteilung der NSP nach CHOCT UND KOCHER (2000).....	14
3	Schematische Darstellung der Ileum-T-Kanüle.....	39
4	Schema des zweifaktoriellen Versuchsdesigns in den Versuchen II und III.....	53
5	IP _X -Muster im Futter und Chymus in Versuch Ia (MW).....	60
6	IP _X -Muster im Futter, Chymus und Kot in Versuch II (MW).....	71
7	IP _X -Muster im Futter und Chymus in Versuch III.....	77

Verzeichnis der Abkürzungen

Zusätzlich zu den üblichen Abkürzungen des SI-Systems wurden die folgenden Abkürzungen verwendet:

Abb.	Abbildung
ANOVA	Varianzanalyse (analysis of variance)
ATP	Adenosintriphosphat
BD	Basaldiät (Kontrolle)
BD-	Basaldiät ohne Pektinapplikation
BD+	Basaldiät mit Pektinapplikation
BDc	Basaldiät mit 25% Cellulose-Zulage (bzw. 15% in Versuch Ib)
BDp	Basaldiät mit 25% Pektin-Zulage
BDs	Basaldiät mit 25% Maisstärke-Zulage
Ca	Calcium
Co	Cobalt
Cu	Kupfer
DAP	Diaminopimelinsäure
DCP	Dicalciumphosphat
DE	Deutsches Edelschwein
DG	Durchgang
DGGE	Denaturierende Gradienten-Gel-Elektrophorese
DL	Deutsche Landrasse
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
Du	Duroc
EU	Europäische Union
Fe	Eisen
FM	Frischmasse
GfE	Gesellschaft für Ernährungsphysiologie
GM	Grundmischung
IP	Inositolphosphat
K	Kalium
KH	Kohlenhydrate
LM	Lebendmasse
LSmeans	mittlere Abweichungsquadrate
MCP	Monocalciumphosphat
MCP-	Behandlung mit MCP-Zulage und ohne Pektinapplikation
MCP+	Behandlung mit MCP-Zulage und mit Pektinapplikation
ME	Umsetzbare Energie
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
NaCl	Natriumchlorid
NDF	Neutrale Detergenzienfaser
NfE	N-freie Extraktstoffe
Ni	Nickel
NPP	Nicht-Phytin-Phosphor
NSP	Nicht-Stärke-Polysaccharid
NWZ	Nutztierwissenschaftliches Zentrum
OS	Organische Substanz

P	Phosphor
pc	praecaecal
pcVQ	praecaecale Verdaulichkeit
PCR	Polymerase-Kettenreaktion
PHY-	Behandlung mit Phytasesupplementation und ohne Pektinapplikation
PHY+	Behandlung mit Phytasesupplementation und mit Pektinapplikation
pi	postileal
PI	Piétrain
piVQ	postileale Verdaulichkeit
PP	Phytin-Phosphor
r	Korrelation
SCFA	kurzkettige Fettsäuren (short chain fatty acids)
SES	Sojaextraktionsschrot
Stdf.	Standardfehler
T	Trockensubstanz
Tab.	Tabelle
TiO ₂	Titaniumdioxid
tP	Gesamt-P
tt	total
ttVQ	Verdaulichkeit im Gesamttrakt
U	Phytaseeinheiten
VE	Veresterungsgrad
vP	verdaulicher Phosphor
VQ	Verdaulichkeit bzw. Verdaulichkeitsquotient
Zn	Zink

1 Einleitung

Das Hauptanliegen der Tierernährung besteht darin, das Tier seinem Bedarf entsprechend zu versorgen, um ein optimales Leistungsniveau in der Erzeugung tierischer Produkte zu erreichen bzw. langfristig zu sichern. Steigende Futterkosten einerseits sowie strengere Auflagen hinsichtlich des Umweltschutzes und der Ressourcenschonung andererseits haben dazu geführt, dass eine bedarfsdeckende Versorgung des Tieres bei gleichzeitiger Vermeidung von Nährstoffüberschüssen unbedingt gewährleistet werden muss.

Besonderes Augenmerk wird in diesem Zusammenhang auf die Versorgung monogastrischer Nutztiere mit verdaulichem Phosphor gerichtet. Mit dem EU-weiten Verbot der Verfütterung tierischer Nebenprodukte steht eine wichtige Quelle hochverdaulichen Phosphors für die Ernährung von Schweinen und Geflügel nicht mehr zur Verfügung (RODEHUTSCORD ET AL., 2002). Phosphor in pflanzlichen Futtermitteln ist für diese Spezies je nach Bindungsform und Aktivität pflanzeneigener Phytasen in unterschiedlichem Maße verdaulich. Aufgrund mangelnder Aktivität intestinaler Phytasen kann in Pflanzen als Phytinsäure gebundenes Phosphat vor allem von Schweinen jedoch nur in äußerst begrenztem Maße verdaut werden. Eine Bedarfsdeckung an verdaulichem Phosphor ist ohne Ergänzung von Rationen mit mineralischem Phosphor bzw. mikrobiell erzeugter Phytase daher kaum möglich. Ohne Supplementation mikrobieller Phytase erfolgt der enzymatische Abbau des Phytats erst im Bereich des Dickdarms durch Phytasen der dort ansässigen Mikroben. Allerdings ist bislang nicht eindeutig geklärt, ob es im Dickdarm überhaupt noch zu einer nennenswerten Absorption des freigewordenen Orthophosphats kommt. Die vorliegende Datenlage ist äußerst kontrovers und beschreibt sowohl eine Sekretion als auch eine beachtliche Absorption von Phosphor.

Unverdauter Phosphor wird, unabhängig von der Bindungsform, mit den Exkrementen ausgeschieden und gelangt über die Gülle als organischer Dünger in den Boden. Besonders in Gebieten mit hohem Tierbesatz kann der Phosphoreintrag, v. a. bei exzessiver Phosphorversorgung der Tiere, die Phosphor-Aufnahmekapazität der Pflanzen übersteigen. Überdies muss im Boden organischer Phosphor zunächst in anorganisches Phosphat umgewandelt werden, um für Pflanzen absorbierbar zu sein. Dadurch wird verstärkt Phosphat im Boden akkumuliert und trägt erheblich zur Eutrophierung der Grund- und Oberflächengewässer bei, welche sich in vermehrtem Algenwachstum und Sauerstoffmangel und in Folge dessen im Absterben von Fischen und anderen Wassertieren äußert (VATS ET AL., 2005; MCDOWELL, 2003).

Da die Ergänzung des Futters mit mikrobieller Phytase verhältnismäßig teuer ist und eine Zulage von mineralischem Phosphor die Umweltproblematik noch verstärkt und zudem durch die Gewinnung anorganischen Phosphats wichtige Rohphosphatressourcen angegriffen werden, besteht die Notwendigkeit, die Phosphorverdaulichkeit in einzelnen Futterkomponenten bzw. Einflüsse der Kombination verschiedener Komponenten auf die

Phosphorverdaulichkeit weiter zu erforschen, um somit die Phosphorversorgung der Schweine weiter optimieren zu können.

Zunehmend finden auch Koppelprodukte aus der Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte Eingang in die Fütterung von Schweinen. Dabei handelt es sich vielfach um faserreiche Produkte, wie z. B. getrocknete Schlempe, Kleie, Zuckerrübetrockenschnitzel, Sonnenblumenkuchen oder Sojabohnenschalen.

Vor allem die Koppelprodukte aus der Getreideverarbeitung enthalten generell einen hohen Anteil an Kohlenhydraten. Die Art und der Anteil der Kohlenhydrate bestimmen die Höhe der Fermentierbarkeit, wobei diesbezüglich zwischen den einzelnen Koppelprodukten große Unterschiede bestehen.

Je nach Zusammensetzung des Futters gelangt somit eine sehr unterschiedliche Menge fermentierbaren Materials in den Dickdarm von Schweinen. Aufgrund ihres unterschiedlichen chemischen und physikalischen Charakters haben Kohlenhydrate eine sehr differenzierte Wirkung auf die Vorgänge im Gastrointestinaltrakt von Schweinen. Damit verbunden ist ein heterogener Einfluss auf Verdauungsprozesse und die Verdaulichkeit der Nähr- und Mineralstoffe *per se*.

Die Bedeutung der praecaecalen Passage unverdaulicher Kohlenhydrate für die endogene Sekretion von Phosphat im Dünndarm sowie der Einfluss der Dickdarmfermentation löslicher Kohlenhydrate auf den mikrobiellen Einbau von Phosphat sind bislang kaum bekannt.

Ziel dieser Untersuchung war daher einerseits die Bedeutung unterschiedlich verdaulicher Kohlenhydrat-Substrate (Stärke, Pektin, Cellulose) auf die Nettoabsorption von Phosphor am Ende des Ileums zu quantifizieren, sowie andererseits zu klären, ob die Nettoabsorption von Phosphor im Dickdarm indirekt über diese Substrate und eine damit verbundene Zunahme der mikrobiellen Aktivität stimuliert werden kann. Des Weiteren sollte untersucht werden, inwieweit sich eine Applikation fermentierbarer Substanz direkt in den Dickdarm auf die Umsetzungen von Phytat sowie auf die Nettobewegungen von P auswirkt.

Ein Teilprojekt beschäftigte sich dabei mit mikrobiellen Parametern (METZLER-ZEBELI, 2007), während die vorliegende Arbeit damit verbundene Einflüsse auf die Umsetzungen bestimmter Nähr- und Mineralstoffe (insbesondere Stickstoff, Phosphor und Calcium) im praecaecalen und postilealen Darmbereich bei suboptimaler Phosphorversorgung klären sollte. Die Untersuchungen zur faecalen Exkretion wurden durch die Messung der renalen Ausscheidung von Stickstoff, Phosphor und Calcium ergänzt.

2 Literaturübersicht

2.1 Bedeutung des P im tierischen Organismus

Die Bedeutung des Phosphors (P) im tierischen Organismus ist sehr vielseitig. Gebunden zu 80 – 85% im Hydroxylapatit [$3 \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$] bildet Phosphor gemeinsam mit Calcium (Ca) einen wesentlichen Bestandteil der Knochen- und Zahnschmelze. Weiterhin dient P der Energiespeicherung und -lieferung in Form von ATP und ist beteiligt am Aufbau von Nucleinsäuren, Phosphoproteinen, Phospholipiden, Phosphokreatin und aktiven Verbindungen im Intermediärstoffwechsel. Überdies dient er als Puffersubstanz im Blut und Cytoplasma und spielt eine maßgebliche Rolle bei der Vermittlung von Hormonwirkungen (MCDOWELL, 2003).

Absorption von P und P-Bewertung beim Schwein

Wie in der Literatur eindeutig belegt, erfolgt die Absorption von P bei Schweinen vorrangig im Bereich des proximalen Dünndarms (PARTRIDGE, 1978a; MOORE UND TYLER, 1955a; SMITH ET AL., 1955). Die Datenlage zur Bedeutung des Dickdarms für die P-Absorption bei Schweinen gestaltet sich sehr kontrovers. Nach Angaben von BREVES UND SCHRÖDER (1991) kommt dem Bereich des Dickdarms diesbezüglich aber nur eine minimale Bedeutung zu.

Die Absorption von P wird in Form von Orthophosphat unter Beteiligung aktiver sättigbarer und passiver nicht-sättigbarer Transportmechanismen realisiert.

Dabei ist der aktive Transport durch die Epithelzellen der Darmwand von der Na-Konzentration im Darmlumen abhängig und wird durch Vitamin D stimuliert, während der passive Transport bei hohen luminalen P-Konzentrationen über Diffusion erfolgt (BREVES UND SCHRÖDER, 1991).

Die Höhe der P-Absorption ist dabei unter anderem abhängig von der P-Versorgung. Mit steigender P-Zufuhr über den Bedarf hinaus ist eine deutliche Abnahme der P-Absorption in % der P-Aufnahme zu beobachten (VEMMER, 1982).

Ferner wird die Höhe der P-Absorption von der Absorptionsgeschwindigkeit bzw. Absorptionsrate in den jeweiligen Darmsegmenten und der Verweildauer des absorbierbaren Materials in den Segmenten beeinflusst. So wurde beispielsweise für die Ratte eine Absorptionsrate in abnehmender Reihenfolge für das Duodenum > Jejunum > Ileum >> Colon und den Magen bestimmt, die absorbierte Menge war allerdings mit 38% im Ileum am höchsten (CRAMER, 1961).

Neben der P-Absorption, stellt der Dünndarm beim Schwein auch den Hauptort der endogenen P-Sekretion dar. Dies belegten unter anderem SMITH ET AL. (1955), indem sie bei Schweinen unterschiedlichen Alters in die Ohrvene injizierten ^{32}P zum Großteil im

Dünndarm fanden. Im Dickdarm konnten die Autoren dagegen kaum ^{32}P wiederfinden. Daraus schlossen sie, dass im Dickdarm der Schweine kein endogener P sekretiert wurde, sondern endogener P postileal überdies sogar zu einem höheren Anteil als Nahrungs-P reabsorbiert wurde. Auch MOORE UND TYLER (1955b) fanden eine beachtliche P-Sekretion im vorderen Teil des Dünndarms, konnten jedoch ebenfalls keine Sekretion von P in den Dickdarm feststellen.

Seit einigen Jahren wird die P-Bewertung verschiedener Futtermittel auf Basis des verdaulichen Phosphors (vP) durchgeführt (KIRCHGESSNER, 1997). Dabei stellt der Gehalt an vP in einem Futtermittel die P-Menge dar, die scheinbar absorbiert wird und ist somit definiert als der bei suboptimaler P-Versorgung nicht mit dem Kot ausgeschiedene Nahrungs-P (RODEHUTSCORD ET AL., 1994).

Gemäß den Empfehlungen des Arbeitskreises Futter und Fütterung der DLG (1999) sollten der Gehalt an vP im Futter für Mastschweine mit 30 kg Lebendmasse (LM) bei 2,7 g vP/kg liegen. Bei einer LM von 60 kg kann eine Absenkung des Gehaltes auf 2,2 g vP/kg erfolgen.

2.2 Vorkommen des P in pflanzlichen Futtermitteln

In pflanzlichen Futtermitteln, besonders in Pflanzensamen, liegt Phosphor größtenteils gebunden in Form von Phytinsäure (*myo*-Inositol-1,2,3,4,5,6-hexakisdihydrogenphosphat, IP_6) (International Union of Pure and Applied Chemistry and the International Union of Biochemistry, IUPAC-IUB, 1977) vor und stellt u. a. eine Speicherform des P dar (REDDY ET AL., 1982). Üblicherweise sind bei dieser Verbindung 6 Mol Phosphorsäure mit einem Mol *myo*-Inositol verestert (Abb. 1). Der Phosphorgehalt dieser Verbindung liegt bei 28,2%. Die Salze der Phytinsäure werden als Phytate bezeichnet. Phytat bindet besonders im neutralen pH-Bereich zweiwertige Kationen und bildet Metall-Phytat-Komplexe. Auf diese Weise sind überdies Mineralstoffe gebunden, die während des Keimungsprozesses benötigt werden.

Der Anteil an Phytat-P (PP) am Gesamt-P (tP) in Körnern und Samen variiert sehr stark und liegt zwischen 60 und 90%. Eine Übersicht der Phytatgehalte verschiedener Futtermittel wird unter anderem in Arbeiten von EECKHOUT UND DE PAEPE (1994) sowie REDDY ET AL. (1982) gegeben. Innerhalb einer Art wird er zudem von mehreren Faktoren (z. B. Sorte, klimatische Bedingungen, Bodentyp, Wasserversorgung) beeinflusst (MCDOWELL, 2003). So werden bei REDDY ET AL. (1982) Schwankungsbreiten von 60 – 80% für Weizen und 83 – 88% für Mais angegeben.

Während Phytinsäure in Samen von dikotylen Pflanzen besonders als K-Mg-Salz in Globoiden des Kerns konzentriert vorliegt, ist Phytat in monokotylen Pflanzen vor allem in der Aleuronschicht zu finden. Die Lokalisierung des Phytats im Samen beeinflusst vermutlich die Effizienz des Phytatabbaus im Gastrointestinaltrakt, wonach Phytate der

Aleuronschicht eine höhere Löslichkeit besitzen als in Verbindung mit Globoiden in den Faserschichten der Samenhülle (MAENZ, 2001).

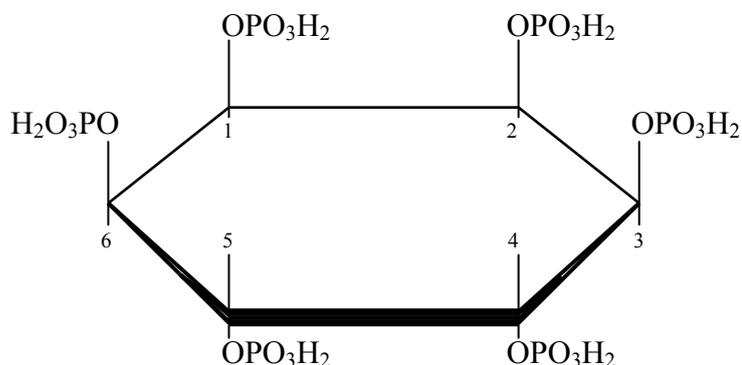


Abbildung 1. Molekularstruktur von Phytinsäure (vereinfacht nach ERDMAN, 1979)

Antinutritive Eigenschaften der Phytinsäure

Liegt IP₆ vollständig dissoziiert vor, was im schwach sauren bis neutralen pH-Bereich der Fall ist, tragen die Phosphatreste 12 austauschbare Protonen. Dadurch besitzt Phytinsäure starke metallbindende Eigenschaften und bildet besonders bei pH-Werten > 5 Komplexe mit mehrwertigen Kationen (Zn²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺), welche sich an eine oder mehrere Phosphatgruppen binden (REDDY ET AL, 1982; CHERYAN, 1980). In Abhängigkeit von den Konzentrationen an Phytat und Mineralstoffen sowie vom pH-Wert der Lösung können Phytat-Mineralkomplexe sowohl als lösliche Chelate als auch als unlösliche Komplexe vorliegen (CHERYAN, 1980).

Durch die Komplexierung ist die Bioverfügbarkeit dieser Mineralstoffe und Spurenelemente herabgesetzt (LOPEZ ET AL., 1998; SANDBERG ET AL., 1993; BITAR UND REINHOLD, 1972). Demnach besteht generell ein negativer Zusammenhang zwischen dem Phytatgehalt im Futter und der Verdaulichkeit mehrwertiger Kationen. Niedrigere Phosphorylierungsstufen des IP, die beim Phytatabbau entstehen, weisen aufgrund der verminderten Bindungskapazität einen weitaus geringeren Effekt auf die Verdaulichkeit von Kationen auf (TAO ET AL., 1986).

Überdies bindet Phytinsäure *in vitro* im pH-Bereich zwischen 2,0 und 5,5 positiv geladene Proteine durch elektrostatische Ladung (SCHEUERMANN ET AL., 1988a; CHERYAN, 1980). Möglich ist außerdem eine Bildung ternärer Komplexe über indirekte Bindung von Proteinen über Kationen-Brücken bei neutralem bzw. basischen pH-Wert, wie sie beispielsweise bei SELLE ET AL. (2000) und CHERYAN (1980) beschrieben wird. Daraus ergeben sich vor allem bei hohen Phytatgehalten negative Effekte auf die Verdaulichkeit von Stickstoff (N) bzw. Aminosäuren (REDDY ET AL., 1982).

In der Literatur wird zudem ein Effekt des Phytats auf die Verdaulichkeit von Stärke diskutiert. Von einer direkten Bindung zwischen Stärke und Phytat über Wasserstoffbrücken berichten RICKARD UND THOMPSON (1997), während nach Angaben

von CHERYAN (1980) auch eine indirekte Bindung des Phytats an stärkeassoziierte Proteine möglich ist, die multivalente Kationen enthalten.

Neben der direkten bzw. indirekten Bindung von Proteinen und Stärke an Phytat kann vor allem die Inhibierung verschiedener Verdauungsenzyme z.B. α -Amylase (STEER UND GIBSON, 2002; KNUCKLES UND BETSCHART, 1987; YOON ET AL., 1983), Lipase (KNUCKLES, 1988) und Protease (DESHPANDE UND DAMODARAN, 1989) durch Phytat zu einer Verminderung der Verdaulichkeiten der einzelnen Nährstofffraktionen führen. Die aufgeführten Arbeiten basieren allerdings überwiegend auf *in vitro*-Messungen, die eine Übertragbarkeit auf enzymatische Vorgänge *in vivo* nur bedingt zulassen.

Aufgrund der genannten chemischen Eigenschaften und der damit verbundenen Beeinflussung der Verdaulichkeit und Bioverfügbarkeit bestimmter Nähr- und Mineralstoffe wird Phytat als antinutritiver Inhaltsstoff, sowohl in Futtermitteln als auch in der menschlichen Nahrung, gesehen.

2.3 Phytasen

2.3.1 Charakteristik

Die am Inositolring gebundenen Phosphatreste können mit Hilfe des Enzyms Phytase (*myo*-Inositol-1,2,3,4,5,6-hexakisphosphat-phosphohydrolase) abgespalten werden. Phytasen gehören zur Gruppe der Phytat-spaltenden Enzyme und existieren in unterschiedlichen Formen in Pflanzen, Mikroorganismen und in einigen tierischen Geweben (KONIETZNY UND GREINER, 2002). Beim enzymatischen Abbau des Phytats entstehen Inositolphosphate geringerer Phosphorylierungstufen ($IP_{<6}$) bis hin zum Inositol-2-monophosphat (IP) (GREINER ET AL., 2000). Zur Einteilung der Phytasen existieren verschiedene Kriterien. Generell werden Phytasen unterteilt in pflanzeneigene Phytase (E.C. 3.1.3.26) und Phytase mikrobiellen Ursprungs (E.C. 3.1.3.8) (IUPAC-IUB, 1984). Nach dem Ort der beginnenden Abspaltung der Phosphatgruppen am IP_6 -Molekül werden weiterhin unter anderem 3- und 6-Phytasen unterschieden, wobei 3-Phytasen, vornehmlich mikrobiellen Ursprungs, am 3. C-Atom und 6-Phytasen, pflanzeneigene, am 6. C-Atom ansetzen (IRVING, 1980).

Voraussetzung für die hydrolytische Spaltung ist die Löslichkeit des Phytats, welche maßgeblich durch den pH-Wert, die Proteineigenschaften und die Ca-Konzentration im Verdauungstrakt bestimmt wird (LANTZSCH, 1990).

2.3.2 Aktivität und Spezifität

Phytasen verschiedener Herkünfte zeichnen sich durch Unterschiede in ihrer Substratspezifität, spezifischen Aktivität sowie ihren pH- und Temperaturoptima aus. Aus einer Übersichtsarbeit von KONIETZNY UND GREINER (2002) geht hervor, dass pflanzeneigene Phytase beispielsweise über eine weite Substratspezifität, aber eine hohe

spezifische Aktivität verfügt, wohingegen Phytase mikrobiellen Ursprungs wie etwa *Bacillus*-Phytase eine hohe Substratspezifität bei geringer Aktivität aufweist.

Phytasen sind in der Lage, neben Phytat weitere organische P-Verbindungen wie p-Nitrophenylphosphat, Fructosediphosphat, Adenosinmonophosphat oder β -Glycerophosphat zu dephosphorylieren (GREINER ET AL., 1993; LOLAS UND MARKAKIS, 1977, SHIEH ET AL., 1969).

Generell weisen Phytasen mikrobiellen Ursprungs eine höhere pH- und Thermostabilität auf als pflanzliche Phytasen (KONIETZNY UND GREINER, 2002).

Das pH-Optimum pflanzeneigener Phytasen liegt in einem Bereich von 4 – 7,5 (REDDY ET AL., 1982).

Für intestinale Phytasen der Darmmukosa von Säugetieren und Geflügel wurde ein optimaler pH-Bereich zwischen 7 und 8,5 (YANG ET AL., 1991; BITAR UND REINHOLD, 1972; HU ET AL., 1996; COOPER UND GOWING, 1983) bzw. von 4,5 (LANTZSCH ET AL., 1988b) nachgewiesen. Das pH-Optimum mikrobieller Phytasen ist hingegen variabel. So wird für *Bacillus*-Phytase ein Bereich zwischen 6,0 und 8,0 angegeben (POWAR UND JAGANNATHAN, 1982), wohingegen *Aspergillus*-Phytase zwei pH-Optima im Bereich von 2 – 2,5 sowie bei 5,5 besitzt. Für Phytase aus *E. coli* wurde in einem pH-Bereich von 2 – 10 bei 4°C und 2 h kein Aktivitätsverlust festgestellt (GREINER ET AL., 1993).

Das Temperaturoptimum von Phytasen wird generell in einem Bereich von 35 – 77°C angegeben, wobei pflanzeneigene Phytasen ihre maximale Aktivität bei geringeren Temperaturen erreichen als mikrobielle Phytasen (KONIETZNY UND GREINER, 2002).

Die Differenzen zwischen den einzelnen Phytasearten hinsichtlich ihrer Aktivität und Spezifität *in vitro* lassen eine unterschiedliche Wirksamkeit im Verdauungstrakt erwarten.

2.3.3 Bedeutung pflanzeneigener Phytase

Im Gegensatz zu Nicht-Phytat-P (NPP), der zum Großteil als Orthophosphat absorbiert wird, ist phytatgebundener P für Monogastriden nicht oder nur sehr begrenzt verfügbar.

Neben dem Phytatgehalt hat die Aktivität pflanzeneigener Phytase, welche bekanntermaßen sehr variabel ist, maßgeblichen Einfluss auf die Verdaulichkeit des P in pflanzlichen Futtermitteln.

Phytase setzt in der Pflanze während der Keimung Phosphat und *myo*-Inositol frei. Unklar ist allerdings, ob Phytase dafür eigens *de novo* gebildet wird, oder ob vorhandene Vorstufen bei diesem Prozess aktiviert werden. Nach Angaben von GREINER (2006) sind beide Formen wahrscheinlich. Aufgrund eines hohen Phytatgehaltes in der Außenschicht sind besonders in Getreide und den entsprechenden Koppelprodukten hohe Phytase-Aktivitäten anzutreffen. So wurde beispielsweise in Weizenkleie eine Aktivität von 4.624 U/kg nachgewiesen (VIVEROS ET AL., 2000).

Ein von SCHEUERMANN ET AL. (1988c) durchgeführter *in vitro*-Vergleich der Aktivitäten von Weizenphytase und Maisphytase machte deutlich, dass Maisphytase gegenüber

Weizenphytase nur etwa 6% der Aktivität aufweist, obwohl im pH-Bereich zwischen 4 und 7 *in vitro* eine höhere Löslichkeit des Maisphytats im Vergleich zum Weizenphytat beobachtet wurde (SCHEUERMANN ET AL., 1988a). In anderen Untersuchungen konnte im Mais keine messbare bzw. eine Phytaseaktivität von <100 U/kg nachgewiesen werden (VIVEROS ET AL., 2000; LANTZSCH ET AL., 1988a).

Die Bedeutung der pflanzeigenen Phytase im Hinblick auf die P-Verfügbarkeit in Futtermitteln wurde vielfach nachgewiesen (RAPP, 1998; SCHLEMMER ET AL. 2001; SEYNAEVE ET AL., 2000a, b; YI UND KORNEGAY, 1996; BERK UND SCHULZ, 1996; JONGBLOED ET AL., 1992). Je nach Aktivität pflanzeigener Phytasen findet dabei ein gewisser Abbau von Phytat besonders im Bereich des Magens und proximalen Dünndarmes statt. In einer Untersuchung von KEMME ET AL. (1998) mit fistulierten Schweinen ermittelten die Autoren bei Vorlage einer Weizen-Gerste-Diät im Duodenum einen Phytatabbau von 47%. Im Gegensatz dazu lag der duodenale Phytatabbau bei Vorlage einer Mais-Diät bei lediglich 3,4%.

Auch beim Menschen konnte der Einfluss pflanzeigener Phytase auf die Verdaulichkeit von P durch Untersuchungen an Ileostomie-Patienten belegt werden. So wurde beispielsweise Phytat aus Phytase-inaktivierter Weizenkleie im Ileumchymus zu 95% wiedergefunden, während Phytat aus unveränderter Weizenkleie praecaecal (pc) zu 60% abgebaut wurde (SANDBERG UND ANDERSSON, 1988), was auf eine hohe Phytaseaktivität in Weizenkleie hindeutet.

Die großen Unterschiede im Phytatgehalt sowie variable Phytaseaktivitäten führen zu großen Differenzen im Hinblick auf die Verdaulichkeit des P in pflanzlichen Futterkomponenten (DÜNGELHOEF ET AL., 1994; JONGBLOED UND KEMME, 1990; LANTZSCH ET AL., 1988b; POINTILLART ET AL., 1984, 1987), wobei P in Mais von Schweinen mit etwa 17% beispielsweise deutlich schlechter verdaut werden kann als P in Weizen mit 47% (JONGBLOED UND KEMME, 1990). HOVENJÜRGEN ET AL. (2002) ermittelten für Roggen, Weizen und Gerste mittlere P-Verdaulichkeiten von 70, 60 bzw. 45%. Ein Einfluss der Düngungsintensität (P bzw. N) oder der Sorte auf die P-Verdaulichkeit in den einzelnen Getreidearten konnte in der genannten Untersuchung nicht nachgewiesen werden.

2.3.4 Bedeutung intestinaler Phytase

Im Gegensatz zur Ratte (COOPER UND GOWING, 1983; LOPEZ ET AL., 2000; IQBAL ET AL., 1994) und zum Geflügel (BITAR UND REINHOLD, 1972; MAENZ UND CLASSEN, 1998), konnte sowohl beim Schwein als auch beim Menschen bisher keine nennenswerte intestinale Aktivität endogener Phytasen nachgewiesen werden (YI UND KORNEGAY, 1996; HU ET AL., 1996; IQBAL ET AL., 1994; SANDBERG UND ANDERSSON, 1988; POINTILLART ET AL., 1984, 1985; KEMME ET AL., 2006).

Keinen Hinweis auf eine Aktivität intestinaler Phytasen weder im duodenalen noch im ilealen Chymus von Schweinen fanden JONGBLOED ET AL. (1992). Dementgegen konnte

RAPP (1998) bei Fütterung einer auf Mais und Sojaextraktionsschrot (SES) basierenden Diät am terminalen Ileum von Miniaturschweinen 4 – 7 h postprandial eine beachtliche Phytaseaktivität nachweisen. Allerdings blieb der pc Phytatabbau mit 19% relativ gering.

Eine hohe Aktivität weisen hingegen die mikrobiellen Phytasen auf, die der intestinalen Mikroflora entstammen. Allerdings ist der intensive Phytatabbau durch phytatspaltende Enzyme der Darmflora vorwiegend auf den postilealen Darmbereich beschränkt, in dem wahrscheinlich kaum eine oder keine nennenswerte Absorption von P mehr stattfindet.

In ihren frühen Studien fanden WISE AND GILBERT (1982) bereits Hinweise auf die Existenz und Aktivität von Phytasen der intestinalen Mikroflora, als sie in konventionellen Ratten einen gewissen Abbau von Phytat beobachteten, in sterilen Ratten hingegen kein Phytat abgebaut wurde.

Der Nachweis zur Befähigung von Wiederkäuern zum Phytatabbau wurde bereits 1947 von REID ET AL. an Schafen erbracht, bei denen die Autoren im Pansen innerhalb von 8 h postprandial einen hohen Abbau von Phytat feststellen konnten.

Die Befähigung zur Produktion und Expression von Phytasen wurde *in vitro* für zahlreiche Bakterienspezies (Reinkulturen) nachgewiesen wie beispielsweise *Bacillus* sp. (POWAR UND JAGANNATHAN, 1982; IGBASAN ET AL., 2000) *Pseudomonas* sp. (IRVING UND COSGROVE, 1971), *Enterobacter* (YOON ET AL., 1996), *Escherichia coli* (GREINER ET AL., 1993; IGBASAN ET AL., 2000) und *Bifidobacterium* (HAROS ET AL., 2005).

YANKE ET AL. (1998) untersuchten die Phytaseaktivität in 334 Stämmen von insgesamt 22 Spezies obligat anaerober Pansenbakterien und fanden teils beachtliche Aktivität in Stämmen von *Selenomonas ruminantium*, *Megasphaera elsdenii*, *Prevotella ruminicola*, *Mitsuokella multiacidus* und *Treponema spp.*

Die Phytaseexpression erfolgt in den meisten Bakterienspezies auf intrazellulärem Wege (YANKE ET AL., 1998). Für *Aspergillus*-Arten und *Bacillus* ssp. und *Enterobacter* wurde eine extrazelluläre bzw. für *E.coli* eine periplasmatische Aktivität nachgewiesen (GREINER ET AL., 1993).

Während einige Bakterienspezies kontinuierlich Phytase produzieren, kommt es bei anderen Spezies nur unter bestimmten Bedingungen zur Phytase-Expression.

Hinsichtlich der Bedingungen für eine Induzierung als auch Inhibierung der Phytaseproduktion (z.B. pH, Konz. an Phytat, P und Ca), der Höhe der Phytaseaktivität sowie der Substratspezifität herrscht eine hohe Variabilität zwischen den einzelnen Spezies (GREINER, 2007). Während die Synthese von Phytase in *Bacillus subtilis* durch Phytat im Medium induziert wurde (POWAR UND JAGANNATHAN, 1982), wird in anderen Arbeiten von einer inhibierenden Wirkung steigender Phytatmengen berichtet (KONIETZNY UND GREINER, 2002).

Ferner wurde in *in vitro*-Studien nachgewiesen, dass ein Phosphatmangel zu einer Stimulierung und ein Phosphatüberschuss entsprechend zu einer Inhibierung der Phytaseaktivität führt (KONIETZNY UND GREINER, 2004).

Diese Aussage konnte allerdings von YANKE ET AL. (1998), die auch bei hohen Phosphatgehalten im Medium (Pansensaft) eine hohe Phytaseaktivität fanden, nicht bestätigt werden.

Ausgehend von der Diversität der Regulationsmechanismen *in vitro* sind die Mechanismen für die mikrobielle Phytaseproduktion und –aktivität *in vivo* bisher kaum erforscht.

2.3.5 Bedeutung supplementierter mikrobieller Phytase

Seit einigen Jahren findet mikrobiell erzeugte Phytase verschiedenen Ursprungs als Futtermittelzusatzstoff Einsatz in der Tierernährung, mit dem Ziel, den Anteil an verdaulichem Phosphor in Rationen für monogastrische Nutztiere zu erhöhen und somit die bedarfsgerechte Versorgung mit P zu sichern und gleichzeitig die P-Ausscheidung über die Exkreme zu minimieren. Bereits in den 60 und 70er Jahren wurden von NELSON ET AL. (1968, 1971) beim Broiler erste Versuche zur Verbesserung der Verwertung von Phytat-P aus Mais und Sojaextaktionsschrot (SES) durch Behandlung mit *Aspergillus*-Phytase, mit dem Ergebnis einer deutlich verbesserten Wachstumsleistung und Knochenmineralisierung, durchgeführt.

Heute erfolgt die biotechnologische Herstellung der Phytasen auf großtechnischem Wege unter Nutzung von gentechnischen Verfahren. Zur Gewinnung der Phytasen dienen beispielsweise *Aspergillus*-Arten mit extrazellulärer Phytaseaktivität. Weitere Bestrebungen sind in diesem Zusammenhang auf die Erhöhung der Ausbeute und die Verbesserung der chemisch-physikalischen Eigenschaften, wie z.B. Thermostabilität und pH-Optima, gerichtet.

In einer Übersichtsarbeit von DÜNGELHOEF UND RODEHUTSCORD (1995) ist die Wirkung supplementierter Phytase ausführlich beschrieben. In einer Untersuchung von YI ET AL. (1996) konnte die faecale P-Exkretion durch Supplementierung mikrobieller Phytase zu einer P-armen Ration um 25-50% verringert werden. Der positive Effekt der Phytase ist durch einen erhöhten *in situ* Abbau von Phytat bedingt, wodurch in höherem Maße absorbierbares Orthophosphat freigesetzt wird (JONGBLOED ET AL., 1992). Durch die Nutzung der Schlacht- bzw. Kanülentechnik ist es möglich, Effekte der Phytase auf den Phytatabbau sowie die P-Verdaulichkeit innerhalb der einzelnen Darmabschnitte zu quantifizieren. Die Verbesserung der P-Verwertung bei Schweinen und Geflügel durch den Einsatz mikrobieller Phytasen und der damit verbundene positive Effekt auf verschiedene Leistungsparameter (Futterverwertung, Wachstumsrate) wurden vielfach nachgewiesen (RAVINDRAN ET AL., 2000; QUIAN ET AL., 1997; HARPER ET AL., 1997; KETAREN ET AL., 1993; YOUNG ET AL., 1993). Als weiteres Response-Kriterium werden zudem Knochenascheparamter hinzugezogen, an denen ein positiver Effekt der Phytase messbar ist (AUGSPURGER ET AL., 2007; YOUNG ET AL., 1993).

Im Vergleich zu pflanzeneigener Phytase wirkt mikrobielle Phytase weitaus effizienter, was in einer Untersuchung von ZIMMERMANN ET AL. (2002) deutlich wurde. Demnach erreicht pflanzeneigene Phytase aus Weizen und Roggen bei marginaler P-Versorgung, gemessen an der scheinbaren Absorption von P nur etwa 40% der Effizienz mikrobieller Phytase.

Die Supplementierung durch Phytase führt jedoch nicht zu einer unbegrenzten Freisetzung von Phosphor aus Phytinsäure. Nach Angaben von PADITZ (2003) liegt die kumulative Effizienz einer *Aspergillus niger*-Phytase im Zulagebereich von 0-500 U/kg Futter bei Schweinen zwischen 0,09 und 0,17 g vP/100 U, wobei der Autor mit zunehmender Lebendmasse eine Abnahme der kumulativen Effizienz beobachtete.

Die Effizienz eines Einsatzes mikrobieller Phytase wird weiterhin vom Umfang der pflanzeneigenen Phytaseaktivität bestimmt. Ihre Wirksamkeit ist umso höher, je geringer die Aktivität pflanzeneigener Phytase in den Futterkomponenten ist.

Neben der Steigerung der P-Verdaulichkeit konnte bei Schweinen und Geflügel zudem ein positiver Effekt supplementierter Phytase auf die Verdaulichkeit von Ca beobachtet werden (PADITZ ET AL., 2004; QUIAN ET AL., 1997; PALLAUF ET AL., 1992). Auch eine positive Wirkung auf die pc Verdaulichkeit einiger Aminosäuren und des N bei Schweinen und Geflügel wird in einer Übersichtsarbeit von SELLE ET AL. (2000) beschrieben. Eine verbesserte N-Verdaulichkeit durch mikrobielle Phytase konnte beispielsweise von LEI ET AL. (1993) beim Ferkel beobachtet werden, fand in anderen Untersuchungen allerdings keine Bestätigung (PADITZ ET AL., 2004).

2.4 Weitere Ansätze zur Verbesserung der P-Verdaulichkeit

In den letzten Jahren ist es gelungen, den Phytatgehalt bestimmter Getreide- und Leguminosenarten mittels gentechnischer Methoden herabzusetzen, was eine weitaus höhere P-Verfügbarkeit in diesen Futtermitteln zur Folge hat. Bisher liegen unter anderem Bilanzdaten für sogenannten HAP-Mais (high available P) (SANDS ET AL., 2001) und „low-phytate“-SES (DILGER UND ADEOLA, 2006) bei wachsenden Schweinen sowie für Maiskleber aus „low-phytate“-Mais bei jungen Hühnern (PETER UND BAKER, 2002) vor, die einheitlich eine deutliche Erhöhung der Bioverfügbarkeit von P aufzeigen. Verbesserte Mineralstoffverfügbarkeiten wurden weiterhin nachgewiesen in Hennen und Ratten. Ein Überblick wird in der Arbeit von MENDOZA (2002) gegeben.

Eine weitere gentechnische Methode ist die Einschleusung des Phytasegens von *Aspergillus niger* in Sojabohnen (LI ET AL., 1997) und Weizen (BRINCH-PEDERSEN ET AL., 2000) zur Verbesserung der P-Verdaulichkeit bei monogastrischen Nutztieren.

Die Biotechnologie stellt somit, insbesondere für die Bevölkerung in den Entwicklungsländern, einen Ansatz zur Verbesserung der Mineralstoffverfügbarkeit bzw. -versorgung (v. a. Zn und Fe) dar, indem einerseits der Gehalt an Phytinsäure als antinutritiver Inhaltsstoff vermindert und andererseits die Phytaseproduktion bzw. -aktivität in Gerste, Reis und Mais erhöht wird (MENDOZA, 2002).

Die Nutzung gentechnischer Methoden hinsichtlich einer Verbesserung der P-Verdaulichkeit beschränkt sich nicht nur auf pflanzliche Organismen. Wissenschaftlern der Arbeitsgruppe um GOLOVAN ET AL. (2001a, b) in Guelph ist es gelungen, ein Phytase-Gen (*appA*) des Bakteriums *E. coli* auf Mäuse und Schweine zu übertragen, wodurch die transgenen Tiere Phytase in den Speicheldrüsen produzierten und in beachtlichen Mengen auch sekretierten. Die Autoren legten den Tieren Rationen ohne ergänzten mineralischen P und mit einem hohen Anteil an Phytat-P vor und beobachteten bei transgenen Mäusen eine Abnahme der P-Konzentration im Kot um 11% bzw. bei transgenen Ferkeln und wachsenden Schweinen um nahezu 75 und 56%. Praxistaugliche Anwendungen dieses Verfahrens sind derzeit jedoch nicht realisierbar, da die erfolgreiche Übertragung und Integration von Genen in das Genom der Nutztiere sehr schwierig ist.

In neuerer Zeit wird auch der Einfluss der Genetik auf die Verdaulichkeit von P diskutiert. In einer Untersuchung von HOVENJÜRGEN (2000) wiesen die Tiere der Rasse DL mit 39% bzw. der Kreuzung DL x DE mit 41% eine höhere P-Nettoabsorption auf als Tiere der Rasse Piétrain bzw. der Kreuzung Pi x Du mit 35%. Diese Differenzen hatten allerdings keine Auswirkungen auf die Mastleistung und Schlachtkörperqualität der Tiere. Ein nennenswerter Einfluss der Vaterlinie innerhalb einer Rasse auf die P-Verdaulichkeit scheint aber beim Schwein nicht zu bestehen (HOVENJÜRGEN, 2000).

ALEXANDER ET AL. (2008) konnten in ihrer Untersuchung zum Einfluss verschiedener genetischer Herkünfte (Duroc und synthetische weiße Linie) auf die Verdaulichkeit von P bei adäquater und marginaler P-Versorgung keine Unterschiede zwischen der Herkünften feststellen. Eine züchterische Bearbeitung der P-Verdaulichkeit verspricht somit kaum Aussichten auf Erfolg.

2.5 Kohlenhydrate und ihre Wirkung im Verdauungstrakt

In pflanzlichen Futtermitteln kommt eine Vielzahl an verschiedenartigen Kohlenhydraten (KH) vor. Generell wird zwischen den leichtlöslichen KH (Zucker und Stärke) und Nicht-Stärke-Polysacchariden (NSP) unterschieden. Die Fraktion der NSP wird auch als Nahrungsfaser (dietary fibre = DF) bezeichnet. Der Anteil an resistenter Stärke wird ebenso der NSP-Fraktion zugerechnet, da diese aufgrund ihrer kristallinen Struktur ebenfalls nicht durch intestinale Enzyme im Dünndarm hydrolysiert wird (GALLANT ET AL., 1992). Neben den NSP wird auch Lignin der Nahrungsfaser zugeordnet, gehört jedoch nicht zur Stoffgruppe der Kohlenhydrate. Kondensiert mit unterschiedlichen phenolischen Verbindungen weist Lignin eine variable Struktur und Zusammensetzung auf und ist von tierischen Organismen nicht enzymatisch abbaubar (NYMAN ET AL., 1986). Zudem hemmt Lignin den Abbau von NSP durch physikalische Inkrustierung bzw. Inhibierung der bakteriellen Aktivität (Übersichtsarbeiten von CUMMINGS, 1981; JUNG UND FAHEY, 1983).

Der Terminus Nahrungsfaser grenzt sich somit *per definitionem* vom Begriff Rohfaser ab. Die Stofffraktion der Rohfaser, wie sie im Rahmen der Weender-Futtermittelanalyse bestimmt wird, umfasst nur die unlöslichen Bestandteile (Cellulose, ein Teil der Hemicellulosen, bestimmte β -Glucane und Pentosane, Lignin), die nach Säure- und Alkalibehandlung noch vorhanden sind. Die löslichen Anteile pflanzlicher Gerüstsubstanzen werden dementsprechend mit in der Gruppe der N-freien Extraktstoffe (NfE) zusammengefasst (JEROCH ET AL., 1999).

Nahrungsfaser ist je nach Futterkomponente integrierter Bestandteil von Rationen in der Schweinefütterung und ist zu verschiedenen Anteilen in nahezu allen pflanzlichen Futtermitteln zu finden. Eine Zulage von Nahrungsfaserquellen ist mit Ausnahme der diätetischen Ernährung tragender Zuchtsauen (zur Erreichung des Sättigungsgefühles bei restriktiver Fütterung bzw. begrenztem Energiegehalt) nicht üblich, da damit meist eine Verdünnung der Energie- und Nährstoffkonzentration einhergeht (WENK, 2001; NOBLET UND LE GOFF, 2001), im Mastbereich allerdings aus ökonomischen Gründen hohe energetische Ansprüche an Rationen gestellt werden.

2.5.1 Nicht-Stärke-Polysaccharide

NSP sind hauptsächlich Bestandteile pflanzlicher Zellwände. Am Aufbau der NSP können Pentosen, Hexosen, 6-Desoxyhexosen sowie Hexuronsäuren beteiligt sein, die Phenolsäuren, Proteine, Lignin als auch Methyl- und Acetylgruppen über kovalente Bindung enthalten können (DE LANGE, 2000).

Ein Abbau der NSP durch endogene Enzyme des Verdauungstraktes ist aufgrund der β -glycosidischen Bindungsform nicht möglich (CUMMINGS UND ENGLYST, 1995; WENK, 2001), allerdings sind zahlreiche Mikroorganismen der Darmflora im Stande, die entsprechenden Enzyme zu produzieren, welche NSP spalten. NSP dienen dabei als Substrate für das mikrobielle Wachstum und werden je nach chemischer und physikalischer Struktur in unterschiedlichem Maße fermentiert.

Es erfolgt daher eine Unterteilung der NSP in unlösliche (Cellulose, Großteil der Hemicellulosen) und lösliche bzw. leicht fermentierbare (Pektin, β -Glucane und Oligosaccharide) NSP (JEROCH ET AL., 1999).

Abb. 2 gibt einen Überblick über eine mögliche Einteilung der NSP, die einer Übersichtsarbeit von CHOCT UND KOCHER (2000) entnommen ist.

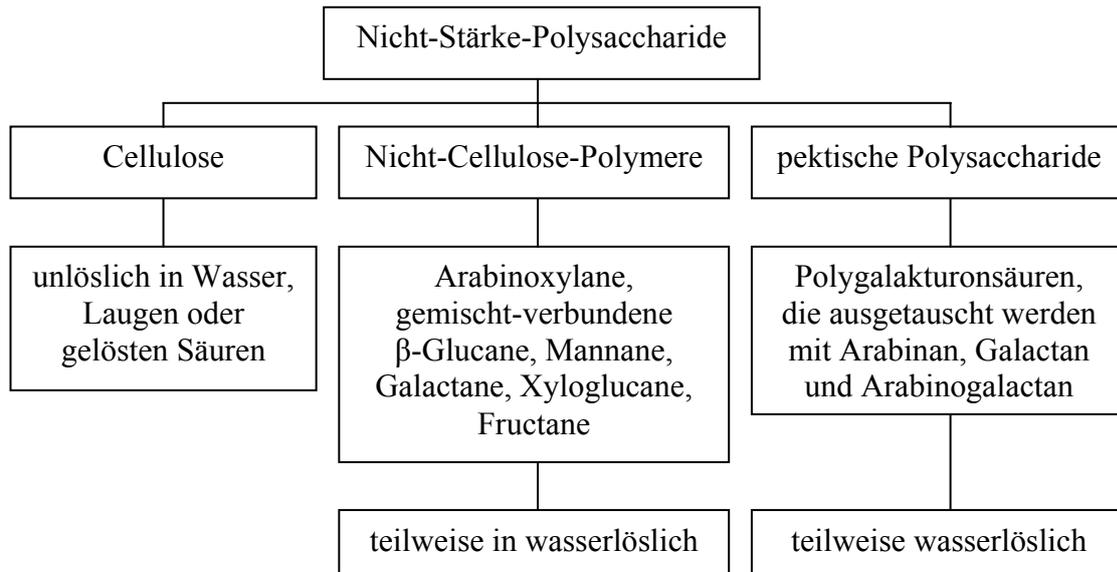


Abbildung 2. Einteilung der NSP nach CHOCT UND KOCHER (2000)

2.5.2 Charakteristik der verwendeten Kohlenhydrat-Substrate

Zwischen verschiedenartigen Kohlenhydraten bestehen aufgrund ihrer unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften große Differenzen im Hinblick auf ihre Fermentierbarkeit und Verdaulichkeit. Dadurch sind ferner auch unterschiedliche Effekte auf Umsetzungsprozesse von Nähr- und Mineralstoffen im Verdauungstrakt zu erwarten.

In der vorliegenden Untersuchung wurden drei Kohlenhydratquellen ausgewählt, die sich in ihrer Herkunft und Struktur stark unterscheiden. Auf diese Weise sollte ein möglichst breites Spektrum an Kohlenhydraten erfasst und mögliche Einflüsse auf die Verdaulichkeiten von Nähr- und Mineralstoffen untersucht werden. Dabei wurde zum einen Maisstärke als hochverdauliches Polysaccharid geprüft. Zum anderen kamen Apfelpektin bzw. Ligno-Cellulose als Vertreter der fermentierbaren bzw. unlöslichen Fraktion der NSP zum Einsatz. Im Folgenden sind die wesentlichen Charakteristika der gewählten Substrate aufgezeigt.

Stärke

Stärke ist ein aus α -Glucose-Einheiten zusammengesetztes Polysaccharid. Zu einem Anteil von etwa 20 - 30% kommt sie als Amylose und zu 70 - 80% in Form von Amylopektin vor. Während Amylose eine spiralförmige, helicale Struktur besitzt, deren Glucose-Einheiten ausschließlich α -(1-4)glycosidisch verknüpft sind, ist Amylopektin verzweigt und weist neben α -(1-4)- auch α -(1-6)glycosidische Bindungen auf.

Der enzymatische Abbau von Stärke im Verdauungstrakt erfolgt vorrangig durch von der Mundspeicheldrüse und Pankreas sekretierten α -Amylasen.

Stärke unterliegt gewöhnlich bereits im praecaecalen Darmabschnitt einem nahezu vollständigen enzymatischen Abbau (BACH KNUDSEN UND CANIBE, 2000; GRAHAM ET AL.,

1986; RÉRAT, 1978). Eine Ausnahme bildet resistente Stärke, wie sie beispielsweise in Kartoffeln und Erbsen zu finden ist, deren enzymatischer Abbau durch intestinale Amylase aufgrund der kompakteren kristallinen Struktur der Stärkekörner weitaus geringer ist (GALLANT ET AL., 1992). Daher gelangt ein Großteil der resistenten Stärke in den Dickdarm, wo sie durch die Enzyme der intestinalen Mikroflora in hohem Maße fermentiert wird (MARTINEZ-PUIG ET AL., 2003).

Die Abbaugeschwindigkeit und –intensität von Stärke ist weiterhin abhängig von der Art der Behandlung und ihrem physikalischen Zustand (CUMMINGS UND ENGLYST, 1995). VAN DER MEULEN ET AL. (1997) stellten im Ileum von Schweinen einen schnelleren Abbau von Maisstärke im Vergleich zu Erbsenstärke fest, wobei die Verdaulichkeit für beide Stärkearten bei nahezu 100% lag.

Cellulose

Cellulose ist als Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwände die häufigste organische Verbindung. Sie ist ein Polymer der Glucose, wobei die Glucose-Einheiten β -(1-4) glycosidisch verknüpft sind. Sie ist wasserunlöslich und bildet feste, faserige Molekülverbände, deren Glucose-Einheiten untereinander jeweils um 180° gedreht sind. Dadurch bilden sich lang gestreckte, unverzweigte Ketten, die sich parallel zueinander anlagern und über intermolekulare H-Brückenbindungen übermolekulare Ordnungszustände bis hin zu Kristallgittern ausbilden. Der tierische Organismus verfügt selbst nicht über körpereigene Enzyme zur Spaltung der β -(1-4)glycosidischen Bindung, allerdings sind bestimmte Mikroorganismen imstande cellulolytische Enzyme zu bilden. Der Abbau der Cellulose erfolgt stufenweise durch Abspaltung der endständigen Zucker. Somit ist die Fermentation sehr zeitaufwändig. Am besten untersucht sind cellulolytische Bakterienspezies im Pansen. Auf Grund der Ähnlichkeit im Fermentationsvorgang beider Gärssysteme lassen sich in gewissem Maße Rückschlüsse auf den Dickdarm des Schweins ziehen (VAREL, 1987). Als die im Pansen vorherrschenden cellulolytischen Spezies wurden *Bacteroides succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens*, *Ruminococcus albus* und *Butyrivibrio fibrisolvens* nachgewiesen (PRINS, 1977). Die beiden erstgenannten Spezies wurden ebenfalls im Dickdarm von Schweinen (VAREL ET AL., 1984) und im Caecum von Ratten (MONTGOMERY UND MACY, 1982) identifiziert.

Die Höhe des Celluloseabbaus ist stark abhängig von ihrer Herkunft und wird auf chemischer Seite von der Kristallinität und dem Grad der Verbindung mit anderen Substanzen (z. B. Lignin und Cutin) sowie auf physikalischer Seite von der Partikelgröße bestimmt (CUMMINGS, 1981).

Schweine sind nur in äußerst begrenztem Maße in der Lage Cellulose zu verdauen. Eine Ausnahme bilden hierbei ältere Sauen, die aufgrund der mikrobiellen Ausstattung des Dickdarms über eine weitaus höhere fermentative Kapazität verfügen.

Pektin

Pektine kommen als Bestandteil von Zellwänden (Mittellamelle und Primärwand) und Cytoplasma in zahlreichen Futtermitteln vor. In Verbindung mit Cellulose, Hemicellulosen und Lignin bildet Pektin die Zellmatrix und stellt somit ein wichtiges Strukturelement in Pflanzenzellen dar. Im Cytoplasma liegt Pektin in unlöslicher Form als Protopektin vor und ist beteiligt an der Regelung des Zellturnovers. Hohe Gehalte an Pektin sind in Zuckerrüben und deren Verarbeitungsprodukten (z. B. Trockenschnitzel) zu finden sowie im Cytoplasma von Früchten und Gemüse (CAMPELL UND PALMER, 1978; LOW, 1985).

Aus chemischer Sicht sind Pektine Polygalakturonsäuren, die fast ausschließlich aus α -(1-4)glycosidisch verknüpften D-Galacturonsäureestern aufgebaut sind (am C₆-Atom –COOH). Als Seitenketten sind meist Neutralzucker wie Xylose, Galaktose und/oder Arabinose verknüpft. Da die Hauptkette durch Rhamnose unterbrochen ist, handelt es sich beim Pektin um ein Heteropolysaccharid. Die Carboxylgruppen der Polygalakturonsäure sind, je nach Herkunft des Pektins, in verschieden starkem Maße mit Methanol verestert. Der Grad der Veresterung (VE) hat entscheidenden Einfluss auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Pektins. Üblicherweise wird eine Unterteilung in hoch- und niederveresterte Pektine vorgenommen, wobei ein Veresterungsgrad von mehr als 50% als hochverestert und weniger als 50% als niederverestert bezeichnet wird (RAUEN, 1964). Charakteristisch für einen hohen Grad der Veresterung ist die Bildung von Gelen bei einem T-Gehalt von $\geq 55\%$ in Anwesenheit von Zucker und Säure. Niederveresterte Pektine neigen im Gegensatz dazu zur Gelbildung mit zweiwertigen Kationen.

Wie einige *in vitro* Studien zeigen, werden niederveresterte Pektine schneller fermentiert als Pektine mit einem hohen Veresterungsgrad (OLANO-MARTIN ET AL., 2002; DONGOWSKI ET AL., 2002).

Pektinen ist aufgrund der Zuckerreste mit ihren hydrophilen, polaren Gruppen allgemein ein überaus hohes Wasserbindungsvermögen eigen. Nach Angaben von STEPHEN UND CUMMINGS (1979) kann 1 g Pektin *in vitro* bis zu 60 ml Wasser binden. Da die Intensität der Wasserbindung jedoch in hohem Maße vom pH-Wert und Elektrolytgehalt des umgebenden Mediums abhängt, ist eine uneingeschränkte Übertragbarkeit des *in vitro* ermittelten Wasserbindungsvermögens auf *in vivo*-Bedingungen nicht gegeben (LOW, 1985). Eng mit dem Wasserbindungsvermögen verbunden ist die Viskosität des Pektins, deren Höhe vom Molekulargewicht und Veresterungsgrad abhängt, wobei diese in hochverestertem Pektin besonders ausgeprägt ist (DROCHNER ET AL., 2004).

Pektin ist ferner in der Lage, organische Moleküle auf verschiedene Arten zu adsorbieren (über Ionen-Bindungen, elektrostatische- und van der Waal-Kräfte, physikalische Adsorption), wodurch deren Absorption verhindert wird (DROCHNER ET AL., 2004).

Intestinale Enzyme zum Abbau von Pektin sind im tierischen Organismus nicht vorhanden, allerdings wird Pektin besonders im Dickdarm von Mikroben der Darmflora nahezu vollständig fermentiert (SUNVOLD ET AL., 1995, CUMMINGS ET AL., 1979).

Die am Abbau von Pektinverbindungen beteiligten Enzyme sind der Gruppe der Pektinasen zuzuordnen und werden sowohl von zahlreichen Bakterien der Darmflora als auch von Pilzen gebildet (DROCHNER ET AL., 2004).

Typische Vertreter mit pektinspaltenden Eigenschaften sind Stämme der Spezies *Bacteroides* und *Bifidobacterium* (OLANO-MARTIN ET AL., 2002; JENSEN UND CANALE-PAROLA, 1986). Generell geht der Abbau von Pektin mit einer Erhöhung der intestinalen mikrobiellen Aktivität einher (DONGOWSKI ET AL., 2002).

Aufgrund der begrenzten mikrobiellen Aktivität im vorderen Verdauungstrakt ist die pc Verdaulichkeit von Pektin bei Schweinen gering, dennoch geht ein gewisser Abbau von statten, der jedoch 16% nicht übersteigt (KERLER, 2002; DROCHNER, 1993; DEN HARTOG ET AL., 1988).

Im Dickdarm findet dagegen eine nahezu vollständige Fermentation von Pektin statt, was bei Betrachtung des Gesamtrakts zu hohen Verdaulichkeitsquotienten von über 80% bei Schweinen (ROTH-MAIER ET AL., 1993; DEN HARTOG ET AL., 1988; MÜLLER UND KIRCHGESSNER, 1985; ALBERS UND HENKEL, 1979) als auch bei Ratten (GÄDEKEN, 1969) führt.

2.5.3 Fermentierbarkeit von NSP

Während der Abbau von NSP im Dünndarm stark begrenzt ist, hängt die mikrobielle Fermentierbarkeit im Dickdarm maßgeblich von chemischen und physikalischen Eigenschaften der NSP ab (HÖGBERG, 2003; DROCHNER, 1984). In einer europaweiten Interlaborstudie von LIVSEY ET AL. (1995), in der die Fermentierbarkeit verschiedener NSP in Ratten untersucht wurde, rangierten die Werte zwischen 0 für Cellulose und 90% für Pektin, unabhängig von der Dosis.

CHABEAUTI ET AL. (1991) bestimmten die Verdaulichkeit der NSP in verschiedenen Koppelprodukten und stellten eine weite Spanne, von 16% für Weizenstroh, 44% für Weizenkleie, 70% für Trockenschnitzel bis 79% für Sojabohnenschalen fest. Verantwortlich dafür machten die Autoren den hohen Ligningehalt im Weizenstroh sowie den hohen Gehalt an fermentierbaren Substanzen in Trockenschnitzeln und Sojabohnenschalen.

Eine signifikant geringere pc und totale (tt) VQ für NDF in Weizenkleie gegenüber Sojabohnenschalen fanden FREIRE ET AL. (2000).

Als Ursache für die unterschiedliche Fermentierbarkeit ist die bereits angesprochene sehr heterogene Zusammensetzung der verschiedenen Koppelprodukte zu sehen.

Zuckerrüben-Trockenschnitzel enthalten beispielsweise einen hohen Anteil an Polygalakturonsäuren und Hemicellulosen und weisen einen mittleren Cellulosegehalt auf (FREIRE ET AL., 2000). Sie bieten aufgrund ihres enormen Wasserbindungs- und Aufquellungsvermögens im Verdauungstrakt eine erhöhte Oberfläche für den mikrobiellen Abbau (NOBLET UND LE GOFF, 2001).

Demgegenüber ist Luzernegrünmehl durch einen relativ hohen Ligninanteil und mittleren Gehalten an Cellulose und Hemicellulosen gekennzeichnet (EHLE ET AL., 1982).

Weizenkleie ist reich an Hemicellulosen, weist einen mittleren Ligningehalt und einen geringen Cellulosegehalt auf, während Sojabohnenschalen einen hohen Celluloseanteil, einen geringen Hemicelluloseanteil und ebenfalls einen mittleren Ligninanteil enthalten (FREIRE ET AL., 2000, LAPLACE ET AL., 1989).

In vitro Untersuchungen von AWATI ET AL. (2006) mit ilealem und faecalem Inokulum von Saugferkeln zeigten sowohl eine deutlich höhere fermentative Aktivität als auch eine größere Diversität der Bakterienspezies im Kot als im Ileumchymus. Eine erhöhte mikrobielle Fermentation im Dickdarm (besonders im Caecum und proximalen Colon) verbunden mit zunehmenden Fasergehalten im Futter wurde bei JENSEN UND JØRGENSEN (1994) bestätigt. Während fermentierbare NSP besonders einen Anstieg der mikrobiellen Diversität bewirken, verursachen unlösliche NSP eher eine Erhöhung der mikrobiellen Aktivität im Darmtrakt von Schweinen (HÖGBERG, 2003).

Fermentierbare NSP dienen den Mikroben als Substrat und haben je nach Bindungsform unterschiedliche Wirkung auf die intestinale Mikroflora (DONGOWSKI ET AL., 2002, OWUSU-ASIEDU ET AL., 2006). Im Gegenzug hat die Zusammensetzung der intestinalen Mikroflora wiederum einen beachtlichen Einfluss auf die Verfügbarkeit und Verdaulichkeit bestimmter Nährstoffe.

Je nach Herkunft begünstigen NSP das Wachstum von Mikroben, die Cellulasen, Hemicellulasen, Pektinasen oder andere Enzyme bilden (VAREL UND YEN, 1997). So beobachteten VAREL UND POND (1985) bei Sauen, denen sie 40 bzw. 96% Luzernemehl vorlegten, eine deutliche Zunahme der cellulolytischen Bakterienspezies im Kot.

2.5.4 Einflussfaktoren auf die Fermentation

Die Intensität der mikrobiellen Fermentation wird von zahlreichen Faktoren bestimmt. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Art (chemische und physikalische Struktur) der NSP-Quelle, der Grad der Lignifizierung (BACH KNUDSEN UND HANSEN, 1991; FREIRE ET AL., 2000), der pH-Wert im Verdauungstrakt (WENK, 2001) sowie die Partikelgröße (HELLER ET AL., 1980) und nicht zuletzt das N-Angebot am Ort der Fermentation (LONGLAND ET AL., 1993) als Voraussetzung für mikrobielles Wachstum.

Die genannten Faktoren begünstigen oder hemmen das mikrobielle Wachstum der Darmflora. Daher besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung des Futters (Herkunft und Anteil der NSP) und der Fermentationsintensität.

Da der Umfang der mikrobiellen Fermentation in hohem Maße vom Angebot an N im Verdauungstrakt abhängt, ist auch der N-Gehalt der Ration von Bedeutung. Geringe N-Gehalte im Futter können den Abbau von NSP stark begrenzen (LONGLAND ET AL., 1993).

Neben der Zusammensetzung haben die Struktur und Behandlung (z. B. Pelletierung) des Futters sowie die Fütterungsintensität Einfluss auf das Mikrobewachstum und den damit verbundenen fermentativen Abbau (WENK, 2001; PARTRIDGE ET AL., 1986; ROTH UND KIRCHGESSNER, 1985).

Weiterhin scheint auch die Dauer der NSP-Verabreichung einen Effekt auf deren Abbau und Verdaulichkeit zu haben. Der Großteil der Untersuchungen zum Einfluss von NSP erfolgte allerdings während einer üblicherweise kurzen Versuchsperiode. Eine Adaptation an hohe Fasergehalte in der Ration durch eine Gewichtszunahme des leeren Darmtraktes, insbesondere des Colons, wurde beispielsweise von KASS ET AL. (1980) beobachtet, die Schweinen 0, 20, 40 und 60% Luzernemehl in der Ration verabreichten. GARGALLO UND ZIMMERMANN (1981) legten Schweinerationen 2, 10 oder 18% Cellulose (Solka-floc) zu und stellten mit zunehmender Versuchsdauer (1 – 40 d) eine Erhöhung der Celluloseverdaulichkeit fest. In einer Untersuchung von LONGLAND ET AL. (1993) erfolgte bei wachsenden Schweinen eine Zulage von Holz-Cellulose über einen Zeitraum von 2, 4 und 6 Wochen, wobei sich für die Verdaulichkeit der NSP aus der Cellulose mit zunehmender Versuchsdauer eine steigende Tendenz abzeichnete.

Neben den exogenen Faktoren bestimmen auch tierindividuelle Parameter wie das Alter und die Lebendmasse der Tiere die Abbaubarkeit und Verdaulichkeit der NSP. Es wurde festgestellt, dass ausgewachsene Schweine, v. a. Sauen, unlösliche NSP weitaus besser verdauen können als wachsende Schweine (ROTH UND KIRCHGESSNER, 1984) und diese wiederum besser als Ferkel. Als Gründe für eine mit zunehmender LM verbesserte Kapazität zum Abbau der NSP sind beispielsweise die Vergrößerung des Dickdarmes relativ zur LM, die höhere mikrobielle Aktivität sowie die langsamere Passagerate zu sehen, wodurch Chymus länger im Dickdarm verbleibt und fermentiert werden kann (LE GOFF ET AL., 2002; FERNÁNDEZ UND J ØRGENSEN, 1986). FERNÁNDEZ ET AL. (1986) stellten die in wachsenden Schweinen und Sauen ermittelten Verdaulichkeitsquotienten der Rohfaser aus verschiedenen faserhaltigen Futterkomponenten gegenüber und beobachteten im Mittel aller Komponenten eine um 21%-Punkte höhere Verdaulichkeit (VQ) bei Sauen. Einen weiteren Nachweis für die höhere Fermentationskapazität, v. a. unlöslicher NSP, im Dickdarm von Sauen gegenüber wachsenden Schweinen erbrachten auch J ØRGENSEN ET AL. (2007).

Ferner wird ein Einfluss der Rasse diskutiert, wobei FÉVRIER ET AL. (1988) für züchterisch wenig bearbeitete Rassen, wie beispielsweise das Chinesische Meishan Schwein, eine höheres Verdauungspotenzial für Faser festgestellt haben als für Schweine der Rasse Large White. In einer Untersuchung von YEN ET AL. (2004) konnte diese Überlegenheit im Vergleich zu einer Gebrauchskreuzung Duroc x Weiße¹ allerdings nicht bestätigt werden.

¹ Kreuzung aus genet. Herkunft Chester White, Landrasse, Large White und Yorkshire zu gleichen Anteilen

Ein Überblick über die Gesamtheit der Einflussfaktoren wird u. a. in den Arbeiten von LONGLAND ET AL. (1993); NYMAN ET AL. (1986); RÉRAT (1978) und KEYS ET AL. (1970) gegeben.

2.5.5 Effekte von NSP im Verdauungstrakt

Aufgrund ihres uneinheitlichen Charakters beeinflussen NSP die chemischen und physikalischen Prozesse im Verdauungstrakt in unterschiedlichem Maße. In diesem Kontext soll im Folgenden der Einfluss von NSP auf die Passagerate im Verdauungstrakt, die Morphologie des Darmes, die Sekretion von Verdauungssäften sowie auf die Wirkung von Verdauungsenzymen näher betrachtet werden.

Passagegeschwindigkeit

Nach Angaben von WILFART ET AL. (2007b) beträgt die mittlere Retentionszeit bei wachsenden Schweinen von der Maulhöhle bis zum proximalen Duodenum 1 h, vom proximalen Duodenum bis zum distalen Ileum 4 h und vom distalen Ileum bis zum Zeitpunkt der Exkretion 35 h. Die längste Verweildauer des Chymus wird demnach im Dickdarm realisiert.

Die Passagegeschwindigkeit des Chymus wird durch NSP in unterschiedlichem Maße beeinflusst. Dabei besteht ein enger Zusammenhang mit der physikalischen Struktur der NSP und der damit verbundenen Magen- bzw. Darmfüllung. Während die Magenentleerungsrate vom Volumen des Mageninhaltes und der Geschwindigkeit der gastrischen pH-Veränderungen abhängig ist (WENK, 2001), erfolgt die Regulierung der Passagerate über Druck- und Volumenrezeptoren in der Darmwand (DROCHNER ET AL., 2004).

Untersuchungen zur Bestimmung der Passagerate unterliegen allerdings teils großen methodischen Unsicherheiten, wobei diese zumeist in einem diskontinuierlichen Markerfluss als auch in einem Effekt der Darmkanüle und der Fixierung der Tiere auf die Darmbewegung begründet liegen können (DROCHNER ET AL., 2004).

Über den Effekt unlöslicher NSP auf die Passagerate im Gastrointestinaltrakt liegen in der Literatur kontroverse Ergebnisse vor. So wurde von einigen Autoren eine Erhöhung der Passagerate festgestellt, wobei als Ursache eine gesteigerte Darmperistaltik aufgrund der höheren Darmfüllung aufgeführt wird (LE GOFF ET AL., 2002; KASS ET AL., 1980; POTKINS ET AL., 1991, FARRELL UND JOHNSON, 1970).

JØRGENSEN ET AL. (1996) beobachteten in Schweinen bei Vorlage von 35% Erbsenfaser in der Ration eine fünffache Zunahme des Chymusflusses am terminalen Ileum. Eine gesteigerte Passagerate fanden auch FREIRE ET AL. (2000) bei Einsatz von 20% Luzernemehl in einer Ration für Ferkel im Gegensatz zu anderen Rohfaserquellen wie Trockenschnitzeln, Weizenkleie und Sojabohnenschalen mit höheren Anteilen an fermentierbaren NSP. Eine Zulage von 27% Weizenkleie bewirkte bei Sauen eine

signifikante Abnahme der mittleren Verweildauer des Chymus im Verdauungstrakt von 95 auf 67 h (LE GOFF ET AL., 2002).

FARRELL UND JOHNSON (1970) stellten bei Steigerung der Cellulosezulage von 8 auf 26% eine signifikante Zunahme der mittleren Flussgeschwindigkeit von Chymus am Caecum von Schweinen von 1,07 auf 1,66 ml/min fest.

Auch beim Menschen bewirkten 14 g Cellulose eine Erhöhung der Passagegeschwindigkeit im Gastrointestinaltrakt (SPILLER ET AL., 1980).

In einer Untersuchung von WILFART ET AL. (2007b) bewirkte eine Erhöhung des Rohfasergehaltes (von 17 auf 27%) durch Einsatz von Weizenkleie bei wachsenden Schweinen eine Verminderung der mittleren Retentionszeit des Chymus im Dün- und Dickdarm, wobei die Retentionszeit im Magen nicht beeinflusst war. POTKINS ET AL. (1991) konnten für unlösliche NSP weder einen Einfluss auf die Magenentleerungsrate noch auf die Darmpassage im Gesamtrakt wachsender Schweine nachweisen. Auch SCHWARTZ ET AL. (1982) beobachtete bei Menschen keinen Effekt einer Cellulosegabe von 20 g/d auf die Magenentleerungsrate.

Im Gegensatz dazu stellten OWUSU-ASIEDU ET AL. (2006) bei Schweinen eine Erhöhung der Viskosität des Ileumchymus und damit verbunden eine Verlangsamung der Passage durch den Dünndarm bei Zulage von 7% Guarkernmehl (ein Galaktomannan) bzw. Cellulose fest. Auch DROCHNER (1993) beschreibt in seiner Übersichtsarbeit zur Wirkung der Strukturkohlenhydrate im Magen-Darm-Trakt des Schweins eine Verlangsamung der pc Chymuspassage sowie eine Beschleunigung der Dickdarmpassage bei Zulage von 5% Holzfaserstoff. Als Ursachen für eine Verlangsamung der Dünndarmpassage führt er eine mit dem gesteigerten Wasserbindungsvermögen einhergehende erhöhte Viskosität im Dünndarm an, wodurch es zu einer Beeinflussung der Mukosa-Chymus-Interaktion mit Wirkung auf die Hormonantwort kommen kann, in deren Folge sich die Peristaltik des Dünndarmes verzögert. Die beschleunigte Passage durch den Dickdarm führte DROCHNER (1993) auf die erhöhte Darmfüllung zurück, wodurch vermutlich eine verstärkte peristaltische Aktivität hervorgerufen wird.

Entsprechend den Ausführungen zum Einfluss unlöslicher NSP ist die Datenlage über die Wirkung fermentierbarer NSP ebenfalls kontrovers.

So konstatierten POTKINS ET AL. (1991) für fermentierbare NSP eine erhöhte Magenentleerungsrate. Dementgegen stellten SCHWARTZ ET AL. (1982) bei Menschen, die täglich 20 g Apfelpektin erhielten, eine verzögerte Magenentleerungsrate (Halbierung) fest. Nach Aussage der Autoren verzögern fermentierbare NSP wie Pektin durch ihr Puffervermögen den pH-Abfall im Magen, wodurch der Nahrungsbrei für eine ausreichende Ansäuerung länger im Magen verweilen muss.

In einer Untersuchung von RAINBIRD UND LOW (1986) hatte eine Zulage von 4% Zitruspektin zu einer semisynthetischen Diät für wachsende Schweine trotz deutlicher Erhöhung der Viskosität des Magen chymus allerdings nur einen sehr geringen Einfluss auf

die Magenentleerungsrate wachsender Schweine. Das Wasserbindungsvermögen scheint daher nicht der einzige Faktor zu sein, durch den die Magenentleerung beeinflusst wird.

Während unlösliche NSP kaum einen Einfluss auf die Dickdarmpassage ausüben, wurde für fermentierbare NSP im Allgemeinen eine Verlangsamung der Passagerate im Dickdarm nachgewiesen (AHRENS UND KAUFMANN, 1985; SPILLER ET AL., 1980). Wie Untersuchungen beim Menschen als auch bei Schweinen zeigen, wurde, bezogen auf den Gesamttrakt, für fermentierbare NSP wie beispielsweise Pektin keine bzw. nur eine sehr geringe Beeinflussung der Passagerate festgestellt (POTKINS ET AL., 1991; SPILLER ET AL., 1980; CUMMINGS ET AL., 1979).

Offenbar wird im Falle von fermentierbaren NSP eine gesteigerte Passage im pc Darmbereich durch eine erhöhte Verweildauer im Dickdarm ausgeglichen. Die enorme postileale Fermentation des Pektins verursacht auch bei Ratten eine Verlangsamung der Dickdarmpassage und damit verbunden eine Reduzierung der faecalen Ausscheidung (FORMAN UND SCHNEEMAN, 1980).

Auch der Einsatz roher Kartoffelstärke führte in einer Studie von MARTINEZ-PUIG ET AL. (2003) zu einer leicht erhöhten Retentionszeit im Colon.

LE GOFF ET AL. (2002) fanden indessen bei Zulage von 15% Melasseschnitzeln zu einer Weizen-Diät unterschiedliche Passageraten in Abhängigkeit von der LM der Schweine. Während bei wachsenden Schweinen kein Effekt auf die Passagerate des Chymus im Dünndarm festgestellt wurde, war bei Schweinen im Bereich der Endmast eine Verzögerung der Passagerate, bei ausgewachsenen Sauen hingegen eine Beschleunigung der Passagerate zu beobachten. Zurückzuführen ist diese Beobachtung vermutlich auf eine Verschiebung der Verweildauer vom pc in den postilealen (pi) Darmbereich (60-80% der Verweildauer des Chymus bei Sauen im Dickdarm) aufgrund des größeren Dickdarmvolumens.

Morphologie des Verdauungstraktes

Eine Zunahme sowohl der Länge als auch des Gewichtes des Darmtraktes – besonders des Dickdarmes – von Schweinen und Ratten mit steigender Zulage von faserreichen NSP wurde vielfach beschrieben (GOODLAND UND MATHERS, 1990; BAGHERI UND GUEGUEN, 1983).

Verursacht wird die Gewichtserhöhung des Verdauungstraktes unter anderem durch eine Volumenzunahme der Faser im Darm aufgrund des Wasserbindungsvermögens (STEPHEN UND CUMMINGS, 1979; FARRELL UND JOHNSON, 1970; DROCHNER, 1993). So beschrieben DEN HARTOG ET AL. (1988) bei Schweinen eine signifikante Erhöhung des Wasserbindungsvermögens des Ileumchymus bei Zulage von 5% Pektin bzw. Cellulose.

Bei Zulage von 35% Erbsenfaser zu einer Basaldiät konnten JØRGENSEN ET AL. (1996) nahezu eine Verdopplung des Gewichtes von Caecum und Colon bei Schweinen feststellen, wobei auch die Länge des Dickdarmes signifikant erhöht war.

FREIRE ET AL. (2000) stellten im Bezug auf das Leergewicht des Verdauungstraktes abgesetzter Ferkel teils beachtliche Unterschiede zwischen verschiedenen Koppelprodukten (Weizenkleie, Zuckerrüben-Trockenschnitzel, Sojabohnenschalen, Luzernemehl) fest, wobei vor allem die Produkte mit einem hohen Anteil an fermentierbaren NSP (Zuckerrüben-Trockenschnitzel und Sojabohnenschalen) den höchsten Effekt aufwiesen.

Auch bei Ratten war eine signifikante Erhöhung des Volumens des Dünndarminhaltes in Verbindung mit einer oralen Zulage von 5% Pektin in der Ration (FORMAN UND SCHNEEMAN, 1980) zu beobachten. Ferner bewirkte Pektin bei Ratten ebenfalls eine Zunahme des Gewichts des leeren Verdauungstraktes. Unabhängig von der Fermentationsintensität erhöhten 6,5% Pektin im Futter die Gewichte des Ileums, Caecums und Colons bei konventionellen und keimfreien Ratten (DONGOWSKI ET AL., 2002). Ein erhöhtes Gewicht des Dünndarms durch eine Verdickung der Mukosa und der Muskelschicht bei einer täglichen Gabe von 180 g Pektin haben auch BROWN ET AL. (1979) bei Ratten beobachtet. Die Autoren führten dies auf eine Zunahme sowohl des Volumens als auch des Gewichtes des Chymus in Folge des enormen Wasserbindungsvermögens des Pektins zurück, wodurch im Darm eine Art Muskelhypertrophie aufgrund der gesteigerten Muskelleistung für den Transport des Chymus verursacht wird. In diesem Kontext wird auch eine Stimulierung der Zellteilungsrate der Mukosa durch kurzkettige Fettsäuren (short chain fatty acids = SCFA), v.a. Butyrat, diskutiert (GOODLAND UND MATHERS, 1990).

Eine Zulage roher Kartoffelstärke führte bei Schweinen und Ratten zu einer signifikanten Erhöhung des Gewichts und der Länge des Colons, wobei ebenfalls die Dicke der Mukosa zunahm (MARTINEZ-PUIG ET AL., 2003; LOPEZ ET AL., 1998).

Sekretion von Verdauungssäften

NSP, insbesondere Pektin, bewirken eine Zunahme der Sekretion von Verdauungssäften, wobei die Höhe der Sekretion in hohem Maße vom Wasserbindungsvermögen der NSP-Quelle abhängig ist (LOW, 1989; DROCHNER, 1993).

ZEBROWSKA ET AL. (1983) stellten eine Verdopplung der Produktion von Speichel und Magensaft, eine knappe Verdopplung der Pankreassaftsekretion sowie eine signifikante Zunahme der Gallensaftsekretion bei Schweinen fest, denen sie eine praxisübliche Ration (Gersten- und SES) mit 160 g NSP/kg im Gegensatz zu einer semisynthetischen, hochverdaulichen Ration (Weizenstärke, Sucrose, Casein) mit 40 g NSP/kg fütterten.

Eine Zunahme der täglichen Sekretion von Pankreassaft von 1,3 auf 5 L/kg LM innerhalb von 24 h konnten auch PARTRIDGE ET AL. (1982) bei Erhöhung des NSP-Gehaltes einer Stärke-Caseinration von 25 auf 180 g/kg bei 48 kg schweren Schweinen nachweisen. Eine Zulage isolierter Cellulose zeigte hingegen in einer Untersuchung von ZEBROWSKA UND LOW (1987) keinen Effekt auf die Sekretion von Pankreassaft.

7,5% Pektin in der Ration erhöhten die Sekretion von Pankreassaft, Proteinen und Enzymen bei Schweinen in einer Studie von MOSENTHIN ET AL. (1994). In diesem Zusammenhang wird bei DROCHNER ET AL. (2004) ein Einfluss der verzögerten Magenentleerung und

Darmpassage sowie auch der Konzentration an SCFA am terminalen Ileum vermutet. Durch eine stimulierte Sekretion steigt sowohl der Anteil an endogenem N, welcher Bestandteil von Verdauungsenzymen und Hormonen bzw. von Harnstoff ist, als auch in geringerem Maße der Anteil an endogenem P.

Wirkung von Enzymen

DUNAIF UND SCHNEEMANN (1981) inkubierten unterschiedliche Kohlenhydrat-Substrate (Pektin bzw. Cellulose) *in vitro* mit menschlichem Pankreassaft und stellten bei Gabe von Pektin eine signifikante Steigerung der Aktivität von Amylase und Chymotrypsin fest, während die Enzymaktivitäten durch Cellulose signifikant herabgesetzt waren. Als mögliche Ursache für die verminderte Enzymaktivität in Verbindung mit unlöslichen NSP ist die Bindung von Verdauungsenzymen an Faserstoffe (KH-Polymer) und die daraus resultierende Inaktivierung der Enzyme zu sehen (DUNAIF UND SCHNEEMANN, 1981). Dieser Effekt scheint allerdings bei fermentierbaren NSP weniger ausgeprägt zu sein.

Eine Stimulierung der Aktivität von Chymotrypsin und Trypsin im Darminhalt bei Zulage von 5% Pektin fanden auch FORMAN UND SCHNEEMAN (1980) in einer *in vitro*-Studie.

Eine Zulage von 7,5% Pektin hatte in einer Untersuchung von MOSENTHIN ET AL. (1994) nahezu keinen Effekt auf die Aktivität von Pankreasenzymen im Ileumchymus.

Denkbar ist in diesem Kontext eine negative Korrelation zwischen der Passagerate und der Wirkung der Enzyme, wobei bei höheren Passageraten Verdauungsenzyme weniger Zeit haben, um ihre Wirkung entfalten zu können.

Eine Zulage verschiedener Nahrungsfaserquellen (Pektin, Carboxymethylcellulose und Weizenkleie zu je 4%) hatte jedoch keinen Einfluss auf die Proteinverdaulichkeit im Magen. Offensichtlich wurde der durch die Viskositätserhöhung verursachte geringere Enzym-Substrat-Kontakt im Magen vollständig durch eine höhere Sekretion von Pepsin ausgeglichen (RAINBIRD UND LOW, 1986).

Endprodukte der Fermentation

Die Kapazität der Mikroorganismen im Darm NSP zu SCFA umzusetzen ist in der Literatur umfassend beschrieben (LOW, 1985). Dabei bestehen zwischen den NSP-Quellen hinsichtlich des Umfangs der SCFA-Produktion sowie des SCFA-Musters große Unterschiede (LONGLAND ET AL., 1993; PARTRIDGE ET AL., 1982).

Grundsätzlich ist der Gehalt an SCFA im Chymus bzw. Kot bei Zulage von NSP erhöht, was auf eine mikrobielle Fermentation hindeutet. Diese Beobachtung machten beispielsweise GOODLAND UND MATHERS (1990) bei Ratten, denen sie 50% rohen Erbsen zulegten.

Die beim Fermentationsprozess gebildeten SCFA werden zum Großteil im unteren Bereich des Dickdarms und im Rectum absorbiert (EHLE ET AL., 1982; ARGENZIO UND SOUTHWORTH, 1975; KIRCHGESSNER ET AL., 1987). In verschiedenen Nichtwiederkäuer-Spezies lag die Absorptionsrate bereits vor dem Rectum zwischen 95 und 99% (VON

ENGELHARDT ET AL., 1989). SCFA tragen somit vor allem bei älteren Schweinen zu einem nicht unerheblichen Teil an der Energieversorgung bei. Die Effizienz der energetischen Verwertung der fermentierten Organischen Substanz (OS) beträgt allerdings nur etwa zwei Drittel im Vergleich zu pc verdauter OS (KIRCHGESSNER ET AL., 1987; MÜLLER UND KIRCHGESSNER, 1985).

Weitere Endprodukte, die beim mikrobiellen Abbau entstehen sind Ammoniak, Methan und Wasserstoff. Diese werden zum Teil absorbiert, aber im intermediären Stoffwechsel nicht verwendet (WENK, 2001).

2.5.6 Einfluss von NSP und Stärke auf die Verdaulichkeit von Nähr- und Mineralstoffen

Aus den differenzierten Auswirkungen der unterschiedlichen NSP auf physiologische und morphologische Gegebenheiten im Gastrointestinaltrakt ergeben sich entsprechend unterschiedliche Effekte auf die Verdaulichkeit der einzelnen Nähr- und Mineralstoffe der NSP-Quelle selbst sowie der gesamten Ration (FREIRE ET AL., 2000). So wurden insbesondere eine Depressionen der Verdaulichkeit von Rohprotein (SCHULZE ET AL., 1995), Rohfett und Rohfaser (FREIRE ET AL., 2000; ALBERS UND HENKEL, 1979) festgestellt und, damit verbunden, ein geringerer Lebendmassezuwachs bei hohen Gehalten von NSP in der Ration (OWUSU-ASIEDU ET AL., 2006) beobachtet.

Ausgehend von der Zielstellung der vorliegenden Untersuchung soll die weitere Betrachtung auf den Einfluss von NSP und Stärke auf die Verdaulichkeit der T und OS, des N, P, und Ca sowie auf den Abbau von Phytat beschränkt bleiben.

Verdaulichkeit der Trockensubstanz und OS

Der negative Effekt unlöslicher NSP auf die Verdaulichkeit der T und OS wurde vielfach nachgewiesen (HÖGBERG, 2003; SAUER ET AL., 1991; DEN HARTOG ET AL., 1988; FARRELL UND JOHNSON, 1970). DROCHNER (1984) beschreibt eine negative Korrelation zwischen dem Fasergehalt der Ration und der Verdaulichkeit der OS im praecaecalen Darmbereich ($r = -0,94$) sowie im Gesamttrakt ($r = -0,83$) von Schweinen.

Auch für fermentierbare NSP, wie Pektin, wurde eine Depression der Verdaulichkeit der OS festgestellt (HÖGBERG, 2003; WANG ET AL., 2002; DROCHNER, 1984). So führte bei ROTH-MAIER ET AL. (1993) eine orale Pektingabe im Gesamttrakt von Sauen zu einer reduzierten OS-Verdaulichkeit.

Eine Zulage von 15% Zuckerrüben-Schnitzeln bzw. 27% Weizenkleie bewirkte bei Schweinen mit 30 bzw. 75 kg LM eine signifikante Depression der Verdaulichkeiten der T und OS im Gesamttrakt, wobei in der Behandlung mit Zuckerrübenschnitzeln noch signifikant mehr T und OS verdaut wurde als dies bei Zulage von Weizenkleie der Fall war (LE GOFF ET AL., 2002).

Im Hinblick auf die Verdaulichkeit der T bzw. OS besteht ein enger Zusammenhang zur Verweildauer des Chymus im Dickdarm. In einer *in vitro* Untersuchung unter Nutzung der Colon-Simulations-Technik stellten BREVES ET AL. (1991) bei Erhöhung der Partikel-Retentionszeit von 24 auf 48 h im Dickdarmchymus von Schweinen eine signifikante Zunahme der Verdaulichkeiten der OS fest. Eine positive Korrelation zwischen der Verweildauer des Chymus und der Verdaulichkeit der T bei Schweinen fanden auch KIM ET AL. (2007). Durch eine verlängerte Aufenthaltsdauer des Chymus im Dünndarm können sich Mikroben offenbar aufgrund der stabileren Bedingungen besser etablieren.

Dementsprechend wurde eine Abnahme der T-Verdaulichkeit bei beschleunigter Darmpassage aufgrund erhöhter Fasergehalte in der Ration in Arbeiten von KASS ET AL. (1980) und RAVINDRAN ET AL. (1984) festgestellt.

Als Ursache dessen ist vermutlich die erhöhte Passagerate des Chymus zu sehen, die einerseits eine zeitlich bedingt geringere Wirkung von Verdauungsenzymen und, andererseits, eine verminderte Absorptionsrate der Nährstoffe durch eine verringerte Kontaktzeit des Chymus mit der Darmschleimhaut zur Folge hat.

Die verschiedenen Ursachen, die im Zusammenhang mit NSP in der Ration zu einer Depression der Nährstoffverdaulichkeiten führen sind in der Arbeit von DROCHNER (1984) benannt und im Folgenden kurz aufgeführt:

- Einschluss der Nährstoffe und auch der Verdauungsenzyme in Faser („Coating“)
- Stimulation der endogenen Sekretion (Verdauungssäfte bzw. Zellen der Darmschleimhaut)
- Reduzierung des enzymatischen Abbaus durch erhöhte Darmfüllung
- Erhöhung der mikrobiellen Aktivität (Einbau von Nährstoffen in Mikroben)

Bei ausgewachsenen Schweinen (v. a. Sauen) ist das Ausmaß der Depression der Nährstoffverdaulichkeiten durch unlösliche NSP aufgrund der höheren postilealen Fermentationskapazität weitaus geringer (NOBLET UND LE GOFF, 2001; FERNÁNDEZ UND JØRGENSEN, 1986). Auf Basis der unterschiedlichen Verdaulichkeitsquotienten in den einzelnen Lebensabschnitten werden für Mastschweine und Sauen verschiedene Schätzgleichungen für die Umsetzbare Energie (ME) angegeben (NOBLET UND LE GOFF, 2001).

Phytatabbau und Umsetzungen von P und Ca

Die Ergebnisse zur Wirkung von NSP auf die Verdaulichkeiten von P und Ca sind sehr variabel und in hohem Maße abhängig von der Zusammensetzung der Basalration.

Es wurde bereits erwähnt, dass der Dünndarm der Hauptort der Absorption von P ist. Auf welchen Bereich sich die Absorption konzentriert, wird dabei zum Großteil von der Ration bestimmt. Während in einer Untersuchung von PARTRIDGE (1978a) bei Vorlage einer Getreidediät die höchste Absorption von P im proximalen Teil des Dünndarms von

Schweinen beobachtet wurde, verlagerte sich der Hauptort der P-Absorption bei Verfütterung einer semisynthetischen Diät auf den distalen Teil.

Wie bereits angesprochen wirken NSP als Bestandteil von Rationen auf ganz verschiedene Art und Weise in unterschiedlichen Bereichen des Verdauungstraktes.

In den meisten Untersuchungen, die sich mit der Wirkung von NSP auf die Mineralstoffverdaulichkeit befassten, wurde ein negativer Einfluss festgestellt.

Eine Depression der Absorption von Mineralstoffen durch NSP kann durch eine Vielzahl von Faktoren verursacht werden. Ein Aspekt könnte beispielsweise die mit NSP einhergehende Zunahme der Darmfüllung und, in Folge dessen, ein verminderter Transport der Mineralstoffe an die absorptive Darmsurface sein, wie dies auch für Nährstoffe der Fall ist. Bewirken NSP überdies eine Beschleunigung der Darmassage, wird das Absorptionspotenzial aufgrund der verminderten Kontaktzeit mit der absorptiven Oberfläche vermutlich noch geringer. Obwohl derzeit diesbezüglich kaum Untersuchungen existieren, kann demnach ein Einfluss der Viskosität auf die Absorption von Mineralstoffen vermutet werden. Weiterhin kann auch eine direkte Beeinflussung der passiven und aktiven Transportmechanismen für Ca und P durch Faser nicht ausgeschlossen werden.

Mit Blick auf eine durch die Verabreichung von NSP gesteigerte mikrobielle Aktivität kann zudem ein erhöhter P-Bedarf der Darmflora die P-Absorption vermindern.

In Bakterien ist Phosphor u. a. Bestandteil von Nukleotiden, Coenzymen sowie von Zellwänden (Gram-positive) und -membranen (Gram-negative) (DURAND UND KOMISARCZUK, 1988). Der mikrobielle P-Bedarf wurde vielfach für Pansenbakterien *in vitro* nachgewiesen (VAN NEVEL UND DEMEYER, 1977; WIDER, 2005). FRANCIS ET AL. (1978) konnten beispielsweise in aus dem Panseninhalt von Schafen isolierten Cellulasen eine Stimulierung der Aktivität bei Erhöhung der Phosphat-, nicht aber der Calciumkonzentration in der Enzymlyse von 5 auf 50 mM feststellen. Dies ist ein eindeutiger Beleg, dass P, nicht aber Ca für mikrobielles Wachstum essentiell ist. Dabei besteht eine starke Abhängigkeit zwischen der Höhe des mikrobiellen P-Bedarfes und der Art des verfügbaren Substrats (WIDER, 2005; KOMISARCZUK ET AL., 1987; DURAND UND KOMISARCZUK, 1988), wobei Mikroben für den Stärkeabbau den geringsten P-Bedarf aufweisen. Das Verhältnis zwischen N und P liegt in isolierten Pansenbakterien bei etwa 6,5 zu 1 (KOMISARCZUK ET AL., 1987). Es darf angenommen werden, dass diese Beobachtungen unter Vorbehalt auch auf das mikrobielle System des Dickdarms übertragen werden können.

In seinen Versuchen setzte HOVENJÜRGEN (2000) bei Schweinen 46% Melassetrockenschnitzel in einer P-armen Ration ein und stellte eine signifikante Reduzierung der P-Nettoabsorption im Gesamttrakt fest, wohingegen eine Zulage von 25% Pektin zu einer Ration mit bedarfsdeckender P-Versorgung keinen Effekt auf die Nettoabsorption von P hatte. Offenbar scheint die Versorgung der Dickdarmflora mit mineralischem P bei der Umsetzung von P eine nicht unerhebliche Rolle zu spielen. Dabei

hängt der P-Bedarf der Mikroben vermutlich stark von der postileal anflutenden Menge an fermentierbarem Substrat ab.

Eine Abnahme der pc als auch totalen (tt) Absorption von P und Ca beobachteten VANHOOF UND DE SCHRIJVER (1996) bei Ratten und Schweinen, denen sie eine semisynthetische Diät mit 6% Inulin vorlegten.

Ein weiterer Aspekt ist das starke Bindungs- und Komplexbildungspotenzial der Faser. Vorwiegend werden zweiwertige Kationen, wie Ca und Zn, an Faser gebunden, wobei die stärksten Bindungskräfte zu Ca bei Hemicellulose (96%) und niederverestertem Pektin (94%), weniger bei Cellulose (2%) wirken (BAGHERI UND GUEGUEN, 1983). Dabei fungieren besonders Uronsäuren der Hemicellulosen sowie Galakturonsäuren des Pektins als Bindungspartner für zweiwertige Kationen. Bei stark sauren pH-Werten werden an Faser gebundene Minerale frei, die allerdings bei steigenden pH-Werten im hinteren Teil des Verdauungstraktes wieder fixiert werden. Die Ionen-Austauschkapazität von niederverestertem Pektin aufgrund freier Carboxylgruppen ist umfassend in der Arbeit von DROCHNER ET AL. (2004) beschrieben. Demnach zeigen besonders Ca-Ionen eine pH-abhängige Bindungsaktivität, wobei sie an freie Carboxylgruppen anlagern und somit Brücken zwischen den Polygalakturonsäure-Ketten bilden.

Eine Zulage von 2,5% Pektin unterschiedlicher Veresterungsgrade zu einer Mais-SES-Diät bewirkte bei wachsenden Schweinen im Falle des niederveresterten Pektins eine signifikante Abnahme der Absorption und Retention von P und, in stärkerem Maße, von Ca, während hochverestertes Pektin nur zu einer signifikanten Reduzierung der Absorption und Retention von Ca führte, die P-Absorption dagegen unbeeinflusst blieb (BAGHERI UND GUEGUEN, 1983). Diese Untersuchung zeigt, dass der Veresterungsgrad des Pektins im Wesentlichen ausschlaggebend für die Beeinflussung der Absorption von P und Ca ist.

Eine tendenzielle Depression der Verdaulichkeiten von P und Ca am terminalen Ileum stellten auch DEN HARTOG ET AL. (1988) bei Zulage von 5% Pektin (Veresterungsgrad unbekannt) fest, während im Gesamtrakt keine Tendenz mehr erkennbar war.

DROCHNER (1984) stellte in seinen umfangreichen Untersuchungen zum Einfluss von Faserstoffen und Pektin auf Verdauungsprozesse bei Miniaturschweinen eine deutliche Abnahme der pc Verdaulichkeit von P und Ca bei Zulage von 5% Pektin fest.

Eine weitere Bedeutung für die Bindung von Kationen hat zudem der Phytatgehalt bzw. der Anteil an PP der NSP-Quelle. Hohe Phytatgehalte, wie sie besonders in Koppelprodukten der landwirtschaftlichen Verarbeitung anzutreffen sind, können den negativen Effekt der Faser auf die Absorption von Calcium aus den unter 2.2 genannten Gründen noch verstärken. Eine Bindung von Phytat an Faserstoffe kann überdies aufgrund der geringen Löslichkeit des Phytats die Verdaulichkeit von P vermindern.

Neben den genannten Faktoren hängt die Höhe der Absorption entsprechend auch von den Gehalten an P und Ca sowie dem Verhältnis der beiden Mineralstoffe zueinander ab.

BAGHERI UND GUEGUEN (1983) berichten von einer signifikanten Erhöhung der Absorption und Retention von P, wenn einer Mais-SES-Ration für wachsende Schweine 10 bzw. 20% Weizenkleie zugelegt wurde. Allerdings ist anzumerken, dass die P-Aufnahme mit der Ration durch die Zulage der Weizenkleie von 4,5 auf über 6 g/Tier und Tag anstieg und Weizenkleie zudem reich an Phytase ist (2.600 – 4.600 U/kg nach Angaben von EECKHOUT UND DE PAEPE, 1994). Auf die Absorption und Retention von Ca hatte die Zulage von Weizenkleie keinen Effekt. NSP aus Koppelprodukten der Getreideverarbeitung enthalten Mineralstoffe und zum Teil hohe Gehalte an Phytat, dadurch können Effekte nicht unbedingt der Faser zugeschrieben werden.

Im überwiegenden Teil der Untersuchungen führten unlösliche NSP zu einer Depression der P- und/oder Ca-Verdaulichkeit. Allerdings wurden Auswirkungen in unterschiedlichen Darmbereichen beobachtet.

PARTRIDGE (1978b) fanden bei Zulage von 3 bzw. 9% Cellulose zu einer semisynthetischen Ration eine signifikante Abnahme der Verdaulichkeit von P und Ca im Gesamttrakt um 8 bzw. 11%-Punkte, während die pc Verdaulichkeitsquotienten unbeeinflusst blieben. Er führte dies, im Falle des Ca, auf die Bindungsaffinität zu Kationen und, im Falle des P, auf eine durch den erhöhten Wassergehalt des Chymus verursachte Herabsetzung der transmukosalen Konzentration sowie der elektrochemischen Gradienten im Dickdarm zurück, wodurch die Absorption von P erschwert wird. Eine Zulage steigender Anteile an teilhydrolysiertem Strohmehl in einer Ration für wachsende Schweine bestätigte diese Beobachtung (PARTRIDGE ET AL., 1986). Offensichtlich kam es in beiden Untersuchungen zu einer Depression der P-Verdaulichkeit erst im postilealen Darmbereich.

DROCHNER (1984) stellte hingegen bei Miniaturschweinen, denen er 5% Cellulose zulegte, eine signifikante Abnahme der P-Verdaulichkeit bereits im pc Darmbereich fest.

Eine Zulage von 5% Cellulose hatte in einer Studie von DEN HARTOG ET AL. (1988) bei Schweinen eine signifikante Abnahme der Ca-Verdaulichkeit im Gesamttrakt zur Folge, zeigte auf P allerdings keinen Effekt.

VISSIA UND BEYNEN (1999) legten Ratten in verschiedenen Stufen Carboxylmethyl-Cellulose zu und stellten ebenfalls einen hemmenden Effekt auf die scheinbare Absorption von Calcium fest, während die scheinbare Absorption von P stimuliert wurde. Als mögliche Ursache für die Depression der Ca-Absorption zogen die Autoren eine durch die erhöhte Viskosität beeinträchtigte Durchmischung des Chymus und, damit verbunden, einen geringeren Transport von Ca an die absorptive Oberfläche der Mukosa, sowie die Bindung von Ca und anderer Kationen an die Cellulosefaser in Betracht. In diesem Kontext waren möglicherweise weniger Kationen zur Komplexbildung mit Phytat vorhanden, was als Ursache für die Stimulierung der P-Absorption durch einen verbesserten Phytatabbau gesehen werden kann.

LOPEZ ET AL. (1998) untersuchten den Einfluß einer Supplementierung von 11 g/kg Phytinsäure zu einer semisynthetischen Diät auf die Verwertung von u. a. Ca in Ratten in

Abhängigkeit vom Gehalt an fermentierbarer Substanz, indem sie 20% Weizenstärke in der Diät durch rohe Kartoffelstärke ersetzen. Dabei stellten sie einen positiven Effekt der Kartoffelstärke auf die Ca-Verdaulichkeit fest, wobei besonders die postileale Absorption von Ca positiv beeinflusst war. Supplementierte Phytinsäure zeigte keine negative Beeinflussung der Ca-Absorption. Die Autoren führten den Anstieg der Absorption von Ca im Dickdarm auf die fermentationsbedingte Produktion von SCFA zurück, woraus eine pH-Absenkung von 7,1 auf 5,9 resultierte. Ein pH-Wert im leicht sauren Bereich bietet günstigere Bedingungen für die Löslichkeit und Absorption von Ca. Durch die Hypertrophie des Caecums konnten SCFA (+400%) sowie Ca (+50%) in höherem Maße akkumuliert werden, verbunden mit einer Zunahme der absorptiven Oberfläche.

Zudem verfügt der Dickdarm der Ratte über kontrollierte Mechanismen zur Ca-Absorption, welche eine Kompensation einer geringeren Absorption auf pc Ebene ermöglichen (MC DOWELL, 2003). Über einen vergleichbaren aktiven Transport von Ca im Dickdarm von Schweinen liegen bisher keine gesicherten Daten vor.

Untersuchungen, die sich mit dem direkten Einfluss von NSP auf den Abbau von Phytat im Darmtrakt von Schweinen befassen, liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt nach des Autors Erachten nicht vor.

BALLAM ET AL. (1984) untersuchten den Einfluss faserhaltiger Futterkomponenten auf den Phytatabbau bei weiblichen Broilern in Abhängigkeit vom Gehalt an Ca und Nicht-Phytat-P in der Ration. Dabei stellten sie eine deutliche Abhängigkeit des Phytatabbaus vom Ca- und NPP-Level fest (23% bei 0,85% Ca und 0,42% NPP vs. 9,5% bei 1% Ca und 0,5% NPP), während für die einzelnen Faserquellen unterschiedliche Effekte zu beobachten waren. So war der Phytatabbau bei Zulage von 10% Baumwollsaat-Schalen und geringerem Ca- und NPP-Level auf 10,5% reduziert, bei Zulage von 15% Luzernemehl hingegen auf 36,4% erhöht. 10% Cellulose führten bei beiden Ca- und NPP-Levels zu einer Steigerung des Phytatabbaus (20,8 bzw. 42,4%). 15% Weizen- bzw. Reisschrot zeigten trotz ihres hohen Phytatgehaltes keinen Effekt, was vermutlich auf die gesteigerte Phytaseaktivität in diesen Faserquellen zurückzuführen ist. Ein unmittelbarer Effekt der Höhe des ADF-Gehaltes in der Ration auf den Abbau von Phytat scheint demnach nicht zu bestehen. Vielmehr hängt die Höhe des Phytatabbaus von der Art der Faserquelle ab, wobei in diesem Zusammenhang besonders der Phytatgehalt sowie die Phytaseaktivität der Faserquelle als Einflussgrößen in Betracht kommen.

Weitgehend unklar ist bislang die Bedeutung des postilealen Darmabschnittes für die Umsetzungen von P und Ca. Phytat wird zum Großteil im Dickdarm mikrobiell abgebaut. Inwieweit das dabei freigewordene Orthophosphat absorbiert wird, ist jedoch unklar. In der Literatur gehen die Meinungen diesbezüglich weit auseinander. Während einige Wissenschaftler für P bzw. Ca eine nicht unerhebliche Nettoabsorption im Dickdarm feststellten (DILGER UND ADEOLA, 2006; SEYNAEVE ET AL., 2000a; O'QUINN ET AL., 1997;

BRUCE UND SUNDSTØL, 1995; DEN HARTOG ET AL., 1988; DROCHNER; 1984), wurde von anderen Autoren eine Nettosekretion dieser Mineralstoffe ins Lumen des Dickdarms beobachtet (BÖNTGEN-SIMONET, 1993; LARSEN UND SANDSTRÖM, 1993). Ferner wurde in einigen Versuchen in Abhängigkeit von der Rationszusammensetzung sowohl eine Absorption als auch eine Sekretion (JONGBLOED ET AL., 1992; PARTRIDGE, 1978a) beschrieben. Es liegen ebenfalls Untersuchungen vor, in denen keine nennenswerten Nettobewegungen von P und Ca gefunden wurden (AJAKAIYE ET AL., 2003; SHEN ET AL., 2002; FAN ET AL., 2001; MROZ ET AL., 1994). Eine Beziehung zur Ration und zur Höhe der P-Versorgung erscheint in diesem Zusammenhang als wahrscheinlich. So vermuteten BREVES UND SCHRÖDER (1991) eine gesteigerte P-Absorption im Dickdarm in Verbindung mit einer hohen P-Versorgung. Dabei ist es möglich, dass dem NSP-Gehalt im Hinblick auf eine Beeinflussung der Mikroflora für die postilealen Umsetzungen von P und Ca eine besondere Bedeutung zuteil wird.

Bei der Interpretation der beschriebenen Ergebnisse ist allerdings zu beachten, dass die meisten Versuche bei bedarfsdeckender Versorgung mit P und Ca durchgeführt wurden, wodurch evtl. Effekte weniger deutlich hervortraten (z.B. PARTRIDGE, 1978b, PARTRIDGE ET AL., 1986; DROCHNER, 1984; DEN HARTOG ET AL., 1988).

Umsetzungen von Stickstoff

Über den Einfluss einer Stärkezulage auf die Verdaulichkeit von N liegen kaum Ergebnisse vor. Eine Depression der N-Verdaulichkeit durch Maisstärke kann nahezu ausgeschlossen werden, da diese im Dünndarm nahezu vollständig verdaut wird und somit keine nennenswerte negative Wirkung verursachen kann. MARTINEZ-PUIG ET AL. (2003) legten einer Basaldiät 25% Maisstärke bzw. rohe Kartoffelstärke zu und konnten bei zunehmender Versuchsdauer eine signifikant höhere N-Verdaulichkeit im Gesamtrakt bei Zulage von Maisstärke beobachten. Offensichtlich konnten Proteasen besser angreifen und N dadurch zu einem höheren Anteil absorbiert werden, da durch das Verschwinden des Stärkeanteils im vorderen Bereich des Verdauungstraktes ein weitaus geringerer Anteil an Chymus den Darm passierte.

Im Gegensatz zu leicht verdaulicher Stärke wurde in zahlreichen Untersuchungen ein negativer Einfluss nahezu aller NSP auf die scheinbare Verdaulichkeit von N bei Schweinen belegt.

Eine Zusammenstellung einer Auswahl an verschiedenen Nahrungsfaserquellen und deren Effekt findet sich bei FERNÁNDEZ UND JØRGENSEN (1986).

Negative Effekte auf die N-Verdaulichkeit beim Schwein wurden beschrieben für Zuckerrübenschnitzel (WANG ET AL., 2002; LONGLAND ET AL., 1993, GRAHAM ET AL., 1986), Weizenkleie (WANG ET AL., 2002), Erbsenfaser (JØRGENSEN ET AL., 1996), teilhydrolysiertes Strohmehl (PARTRIDGE ET AL., 1986), Sojabohnenschalen (FREIRE ET AL.,

2000) sowie Cellulose (OWUSU-ASIEDU ET AL., 2006; SAUER ET AL., 1991; PARTRIDGE ET AL., 1982).

Mögliche Ursachen für die Depression der N-Verdaulichkeit (VQ-N) durch NSP sind in Übersichtsarbeiten von DROCHNER (1993) und NOBLET UND LE GOFF (2001) umfassend beschrieben.

Zum einen kann es besonders bei unlöslichen NSP zu einer Adsorption von Aminosäuren und Peptiden durch die Faserstoffe kommen. Besonders Lignin, aber in geringerem Maße auch Cellulose adsorbieren Aminosäuren. Daher ist die VQ-N abhängig vom Lignifizierungsgrad der NSP-Quelle (BERGNER ET AL., 1981). In diesem Kontext muss ferner auch die Bindung von Verdauungsenzymen an Faserstoffe wie z. B. Trypsin und Chymotrypsin als Ursache eines geringeren Proteinabbaus gesehen werden (VAREL UND YEN, 1997; DUNAIF UND SCHNEEMAN, 1981).

Eine weitere Ursache kann eine erhöhte Abschilferung von Darmzellen und eine gesteigerte Produktion von Schleim aus den Mukosazellen gesehen werden, was eine Zunahme der endogenen N-Sekretion in Form von Muzinen und abgestorbenen Enterozyten zur Folge hat (VAREL UND YEN, 1997; SAUER ET AL., 1991; DROCHNER, 1984, TAVERNER ET AL., 1981). Eine erhöhte Proliferations- und Absterberate der Epithelzellen der Darmschleimhaut im Jejunum, Ileum und Colon von wachsenden Schweinen konnten auch JIN ET AL. (1994) bei Zulage von 10% Weizenstroh beobachten.

Der Einfluss von NSP auf die endogene Ausscheidung von N wird allerdings kontrovers diskutiert. FURUYA UND KAJI (1992) konnten nur einen geringen, nicht aber signifikanten Einfluss steigender Cellulosegaben zu einer proteinfreien Ration auf die endogenen N-Ausscheidungen am terminalen Ileum bei wachsenden Schweinen feststellen. Zu ähnlichen Aussagen kamen auch DE LANGE ET AL. (1989), die bei Zulage von 7% Cellulose zu einer stärkereichen, proteinfreien Basaldiät lediglich eine tendenzielle Erhöhung des Gehaltes an endogenem Protein am terminalen Ileum feststellen konnten.

Eine klare Abhängigkeit der endogenen N-Sekretion vom Gehalt an NSP im Futter konnten hingegen DE LANGE ET AL. (1990) mittels ¹⁵N-Isotopentechnik nachweisen.

Auch TAVERNER ET AL. (1981) beobachteten eine signifikante Zunahme der endogenen N-Ausscheidung bis zu einem NDF-Gehalt im Futter von 100 g/kg T. In einer *in vitro*-Studie untersuchten BOISEN UND FERNÁNDEZ (1995) die scheinbare N-Verdaulichkeit verschiedener Futtermittel und erhielten, besonders für faserreiche Futtermittel, höhere Werte als *in vivo*. Die Differenzen führten sie auf die endogene N-Sekretion *in vivo* zurück, deren Höhe stark von der Höhe des NSP-Gehaltes des Futters abhängt und positiv mit der Menge der unverdauten Trockensubstanz korreliert ist.

In einer Übersichtsarbeit beschreibt DROCHNER ET AL. (2004), dass mit zunehmendem Fasergehalt in der Ration und der damit verbundenen Volumenzunahme des Chymus die Konzentration der N-haltigen Sekrete endogenen Ursprungs zwar abnimmt (Verdünnungseffekt), die sekretierte N-Menge allerdings quantitativ zunimmt.

Auch fermentierbare NSP können eine Erhöhung der endogenen N-Sekretionen bewirken. So beobachteten DE LANGE ET AL. (1989) bei Zulage von 4% Pektin zu einer stärkereichen Protein-freien Basaldiät am terminalen Ileum einen signifikanten Anstieg des Gehaltes an endogenem Protein, während sich faecal kein Effekt zeigte.

In einer Untersuchung von ROTH-MAIER ET AL. (1993) führte eine orale Applikation von 400 g Pektin (20%) bei Sauen zu einer Zunahme der endogenen Protein-Sekretion.

Eine weitere große Bedeutung im Hinblick auf die Verwertung des N kommt der Mikroflora des Verdauungstraktes zu. Die bakterielle Besiedlung des Dickdarms ist hinreichend beschrieben. Nach Angaben von JØRGENSEN UND JUST (1988) reicht die Dichte der anaeroben Bakterien im Caecum und Colon von 10^{10} bis 10^{11} Bakterien/g Chymus.

Die mikrobielle Besiedlung des Verdauungstraktes beschränkt sich jedoch nicht ausschließlich auf den Bereich des Dickdarms. Besonders im Bereich des terminalen Ileums konnte eine hohe mikrobielle Aktivität direkt durch Bestimmung der Bakterienkonzentration (LESER ET AL., 2002; JENSEN UND JØRGENSEN, 1994) oder indirekt anhand eines hohen Anteils an Bakterien-N am Gesamt-N in diesem Darmbereich (DROCHNER, 1984; SEYNAEVE ET AL., 2000b) nachgewiesen werden. So beschrieb auch SAVAGE (1977) für den Bereich des Magens und proximalen Dünndarms kaum eine bakterielle Besiedlung, stellte aber einen starken Anstieg der Bakterienkonzentration im terminalen Dünndarmbereich fest.

Die mikrobielle Besiedlung des terminalen Ileums beim Schwein ist überdies umfassend in einer Übersichtsarbeit von WENK (2001) beschrieben.

Neben den bereits genannten Ursachen kann somit auch eine erhöhte Fixierung von N in Bakterienmasse des Verdauungstraktes die scheinbare Verdaulichkeit von N stark herabsetzen. Dabei stellt die N-Quelle für Bakterien zum einen aus unverdaulichem Futter- und abgestorbenem Mikrobenprotein freigesetzten Ammoniak bzw. zum anderen Harnstoff aus dem enterohepatischem Kreislauf dar. Bei Fütterung fermentierbarer Kohlenhydrate konnten VAN DER MEULEN UND JANSMAN (1997) eine Erhöhung des Ammoniak-Flusses im Verdauungstrakt von Schweinen feststellen.

Eine erhöhte Inkorporation von N in Bakterienmasse äußert sich deutlich durch eine Zunahme der faecalen N-Exkretion. Im Allgemeinen wird eine durch NSP verursachte Erhöhung der faecalen N-Ausscheidung je nach N-Versorgung durch eine abnehmende renale N-Ausscheidung (KIRCHGESSNER ET AL., 1987; AHRENS UND KAUFMANN, 1985; PARTRIDGE ET AL. 1982; GÄDEKEN, 1969) oder eine reduzierte N-Retention (TETENS ET AL., 1996 ROTH-MAIER ET AL., 1993; ALBERS UND HENKEL, 1979) ausgeglichen. Vergleichbare Beobachtungen wurden auch von MOSENTHIN ET AL. (1992b) bei Applikation von Maisstärke als fermentierbares Substrat ins Caecum von Schweinen gemacht, die postileal zu einem Wachstum der Bakterienmasse führte und eine Erhöhung der faecalen bei gleichzeitiger Abnahme der renalen N-Ausscheidung bewirkte, während die N-Retention

unbeeinflusst blieb. Die Autoren diskutierten in diesem Zusammenhang die Verwertung von ileal anflutendem endogenem Harnstoff durch intestinale Mikroben. Diese Art Kompensation wird auch in zahlreichen Studien für unlösliche und fermentierbare NSP beschrieben (ZERVAS UND ZJILSTRA, 2002; CANH ET AL., 1997).

Einen Nachweis für die Bedeutung der Bakterienflora bei der Verwertung des N erbrachte auch DE WILDE (1980), indem er bei oraler Verabreichung eines Antibiotikums (20 mg/kg LM) bei Schweinen eine signifikante Erhöhung der scheinbaren N-Verdaulichkeit feststellte. Eine 5%ige Zulage von Zitruspektin in Kombination mit der Verabreichung des Antibiotikums zeigte aufgrund der Hemmung der Mikroflora keinen Effekt auf die N Verwertung.

NSP vermindern also die scheinbare Verdaulichkeit des N im pc Darmbereich und im Gesamttrakt, senken aber nicht zwangsläufig die Effizienz der N-Retention (BINDELLE ET AL., 2008)

Bei der Beurteilung des Ausmaßes der Depression spielt die Höhe der Zulage offenbar eine wesentliche Rolle. Bei einer Zulage von 5% Cellulose bzw. Pektin fanden beispielsweise DEN HARTOG ET AL. (1988) keinen Einfluss auf die Verdaulichkeiten des N am terminalen Ileum und im Gesamttrakt.

3 Fragestellungen

Ein Großteil der Ergebnisse zur Wirkung von Faser auf die Verdaulichkeit von Nähr- und Mineralstoffen basiert auf Betrachtungen des Gesamtraktes. Informationen zu Effekten in einzelnen Darmabschnitten sind begrenzt. Ausgehend von den vorangegangenen Ausführungen können für die eigene Untersuchung folgende Fragestellungen formuliert werden:

1. Inwieweit verursachen unterschiedliche Kohlenhydrat-Substrate aufgrund ihrer heterogenen Eigenschaften bereits im praecaecalen Darmbereich eine Veränderung der Umsetzungen von P?
2. Welchen Einfluss üben unterschiedliche Kohlenhydrate bei marginaler P-Versorgung auf die Umsetzungen von P und den Abbau von Phytat im postilealen Darmabschnitt aus?
3. Hat die Fermentationsintensität einen Einfluss auf den Phytatabbau und die Nettoabsorption von pflanzlichem P in den einzelnen Darmabschnitten in Abhängigkeit von der Versorgung mit mineralischem P?
4. Hat die Fermentationsintensität einen Einfluss auf den Phytatabbau und die Nettoabsorption von pflanzlichem P in den einzelnen Darmabschnitten in Abhängigkeit von einer Supplementation mikrobieller Phytase?

Die Untersuchungen zu den Umsetzungen von P und den Abbau von Phytat werden durch die Quantifizierung von Effekten auf den Abbau und die Ausscheidungen der T und OS sowie die Umsetzungen und Ausscheidungen von N und Ca ergänzt. Die Interpretation dieser Ergebnisse stellt allerdings nicht vordergündig das Ziel dieser Arbeit dar, da Einflüsse verschiedener Kohlenhydrate auf den Abbau und die Verdaulichkeit von T, OS und N in der Literatur bereits hinreichend beschrieben wurden. Vielmehr sollen die in dieser Arbeit dazu gewonnenen Ergebnisse zur Erklärung evtl. Effekte auf die P-Umsetzungen hinzugezogen werden, da diese im Sinne mikrobieller bzw. homöostatischer Vorgänge eng miteinander verknüpft sind.

4 Material und Methoden

4.1 Allgemeiner Teil

Die den einzelnen Versuchen zugrunde liegenden allgemeinen methodischen und analytischen Ansätze waren weitgehend identisch und werden daher im Folgenden gemeinsam betrachtet.

Die Durchführung des tierexperimentellen Teils erfolgte für die Versuche Ia, II und III im Institut für Tierernährung der Universität Hohenheim. Versuch Ib wurde im Nutztierwissenschaftlichen Zentrum (NWZ) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Merbitz durchgeführt. Das Versuchsprotokoll wurde von der Ethik-Kommission für Tierversuche der Landesregierung Baden-Württemberg anerkannt. Die Haltung und Behandlung der Tiere erfolgte gemäß den Regelungen des Deutschen Tierschutzgesetzes (LORZ UND METZGER, 1999).

4.1.1 Tiermaterial

In den Versuchen Ia, II und III wurden Börgе der Gebrauchskreuzung Deutsche Landrasse (DL) x Piétrain (Pi) verwendet. Die Aufzucht erfolgte im Versuchsgut der Universität Hohenheim „Unterer Lindenhof“. Im Alter von etwa 12 Wochen wurden die Schweine zunächst paarweise in den Bilanzkäfigen aufgestellt.

Die in Versuch Ib verwendeten Tiere waren Hybriden der Dreirassenkreuzung DL x DE x Pi und entstammten dem Schweinezuchtbetrieb der Quellendorfer & Zehbitzer Agrar AG in Quellendorf. Die Einstallung der Schweine wurde im Alter von acht Wochen vorgenommen. In Tab. 1 ist die jeweilige mittlere Lebendmasse der Tiere zur Einstallung (Versuch Ib) bzw. zum Zeitpunkt der Fistulierung (Versuche Ia, II und III) dargestellt. Eine Wägung der fistulierten Tiere wurde während des Versuchszeitraumes nicht vorgenommen, um das Verletzungsrisiko im Operationsbereich zu minimieren. Die LM der Einzeltiere sind für alle Versuche dem Anhang, Tab. A-2 zu entnehmen.

Tabelle 1. Mittlere Lebendmasse der Tiere zur Einstallung (Versuch Ib) bzw. zur Fistulierung

Versuch	LM (MW ± s)
Ia	35,9 ± 0,83
Ib	29,6 ± 2,09
II	30,7 ± 0,78
III	29,5 ± 1,38

4.1.2 Futtermischungen

Die Durchführung von Bilanzversuchen zur Ermittlung bestimmter Effekte auf die Verdaulichkeit von Phosphor erfordert nach den vorgegebenen Empfehlungen der GfE (1994) eine suboptimale Versorgung der Tiere mit verdaulichem P (vP). Dadurch ist eine Minimierung der regulatorisch bedingten endogenen P-Ausscheidungen möglich. Somit sollte der Gehalt an vP in den Versuchsdiäten 2 g/kg T nicht überschreiten (KIRCHGESSNER, 1994). Diesen Anforderungen wurde in allen eingesetzten P-Mangel-Rationen Folge geleistet. Die Zusammensetzung der Basaldiäten war in allen vier Versuchen so gestaltet, dass überwiegend Komponenten mit einem geringen Gehalt an nativer Phytase und einem verhältnismäßig hohen Anteil an phytatgebundenem P (PP) am Gesamt-P zum Einsatz kamen. Auf diese Weise konnte eine suboptimale Versorgung mit vP gewährleistet werden. Die Hauptkomponenten der Basaldiäten stellten Körnermais und Sojaextraktionsschrot (SES) dar, beide arm an vP. Die Konzentration aller weiteren Nähr- und Mineralstoffe waren bedarfsdeckend nach den Vorgaben der GfE (1987). Die Versorgung mit ME entsprach etwa dem 2,1-fachen Erhaltungsbedarf. Die für die BD verwendeten Prämixe, deren Zusammensetzung dem Anhang, Tab. A-1 zu entnehmen ist, waren frei von mineralischem P.

Die Futtermischungen wurden im NWZ der Universität Halle in Merbitz bereit. Zu diesem Zweck stand ein Trommelmischer mit 1.000 kg Fassungsvermögen zur Verfügung. Alle Komponenten mit weniger als 2% Mischungsanteil wurden anfangs mit einem Teil der BD in einem handelsüblichen Betonmischer vorgemischt, bevor sie der Gesamtmischung zugeführt wurden. Titandioxid (TiO₂) wurde den Vormischungen in Konzentrationen von 3 g/kg (Versuche Ia, II und III) bzw. 5 g/kg als unverdaulicher Marker beigemischt.

Grobkörnige Futtermittel wurden vor dem Mischprozess auf 3 mm Siebdurchgang geschrotet. Nach dem Mischvorgang wurde aus jedem Futtersack eine Probe gezogen, welche dann zu einer der jeweiligen Ration entsprechenden repräsentativen Gesamtprobe zusammengeführt wurde. In dieser Gesamtprobe erfolgte zunächst die Bestimmung des P-, Ca- sowie TiO₂-Gehaltes im Vorfeld eines jeden Experimentes zu Kontrollzwecken.

Darüber hinaus erfolgte die Beprobung des Futters zur Bestimmung des Nähr- und Mineralstoffgehalts kontinuierlich bei der Futtereinwaage während der Versuche im Wochenrhythmus.

4.1.3 Versuchsbedingungen und –durchführung

Da die einzelnen Versuche zeitlich versetzt durchgeführt wurden, war die Einhaltung einheitlicher Rahmenbedingungen besonders wichtig. Die Durchschnittstemperatur in den Versuchsställen lag konstant bei 22 ± 2 °C.

Die Bilanzkäfige, die in den Versuchen Ia, II und III zum Einsatz kamen, hatten eine Grundfläche von 1,20 m². Die Seitenwände der Käfige waren aus Plexiglas gefertigt, um

den Sichtkontakt der Tiere untereinander zu gewährleisten. Den Käfigboden stellte ein kunststoffummanteltes Metallgitterrost dar. Die Reinigung der Käfige wurde täglich vor der Morgenfütterung vorgenommen. Die Tiere konnten sich in den Bilanzkäfigen frei bewegen, um Extremitäten- und Gelenkproblemen während des Versuchsablaufes vorzubeugen. Der *ad libitum* Zugang zu entmineralisiertem Wasser wurde über Nippeltränken gewährleistet. In Versuch Ib wurden die Tiere nur während der fünftägigen Bilanz (exklusive einer zweitägigen Adaptationphase an die Käfige) in Stoffwechsellkäfigen aufgestellt und mittels Brustriemen fixiert. Durch seitlich befindliche Gitterwände war eine individuelle Einstellung der Käfige auf die entsprechende Tiergröße möglich. Zugang zu entmineralisiertem Wasser hatten die Tiere in Versuch Ib nur unmittelbar nach der Fütterung.

Die Futtervorlage erfolgte in allen Versuchen zweimal täglich um 7:00 und 19:00 Uhr in Edelstahltrögen. Um eine bessere Futteraufnahme zu erreichen wurde das mehlartige Futter im Trog mit entmineralisiertem Wasser vermengt. Eventuell auftretende Futterverluste durch „Krümeln“ konnten mittels unterm Fressbereich befestigter Bleche erfasst werden. Dort wurde teils auch beim Saufen verschüttetes Wasser aufgefangen und entsorgt, dass dieses nicht in die Harnwanne gelangen konnte. Auftretende Futterreste wurden erfasst und bei der Datenauswertung berücksichtigt.

Ileum-T-Kanülen

In den Versuchen Ia, II und III wurden den Tieren Ileum-T-Kanülen eingesetzt. Der Aufbau des verwendeten Kanülentyps ist in Abb. 3 dargestellt. Die Kanülen für Versuch Ia wurden zunächst in der Technischen Zentrale der Universität Hohenheim aus Polyvinylidenfluorid gefertigt. Aufgrund auftretender Probleme mit Material und Abmessungen, kam bei den übrigen beiden Experimenten ein überarbeitetes Kanülenmodell aus Ultrahochmolekulargewicht-Polyethylen mit verlängertem Kanülenfuß zum Einsatz.

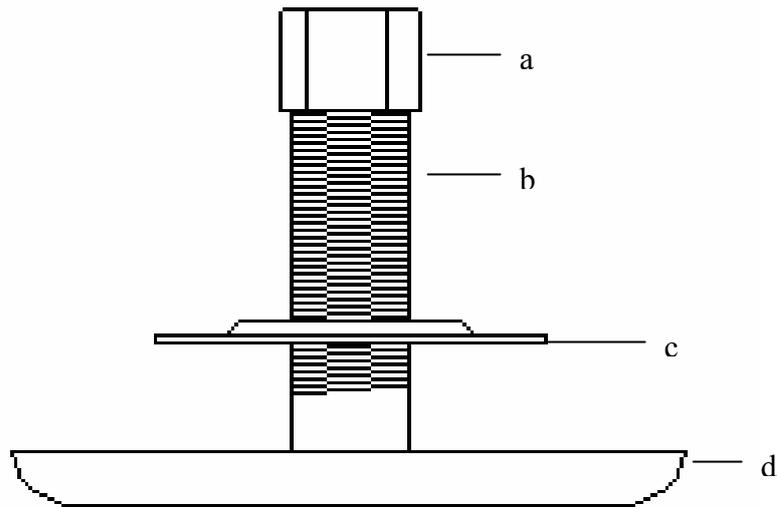


Abbildung 3. Schematische Darstellung der Ileum-T-Kanüle

a: schraubbarer Deckel

b: Kanülentubus mit Schraubgewinde (Länge: 8 cm, Innendurchmesser: 2,1 cm)

c: schraubbarer Überwurf (Durchmesser: 6 cm in Versuch Ia bzw. 7 cm in Versuchen II, III)

d: halbrunder Kanülenfuß (Länge: 8 cm in Versuch Ia bzw. 12 cm in Versuchen II, III; Innendurchmesser: 2,1 cm)

Prozedur der Fistulierung

Prämedikation und Narkose

Nach einer 24-stündigen Nüchterungsphase wurden als Narkosemittel für die Allgemeinanästhesie je kg LM 2 mg Azaperon (Stresnil[®], Serumwerk Bernburg) und 15 mg Ketamin (Ursotamin[®], Janssen) in Form einer intramuskulären Injektion verabreicht.

Danach erfolgte die Vorbereitung des Operationsbereiches an der hinteren linken Bauchwand. Die Aufrechterhaltung der Narkose während der Operation erfolgte durch Inhalation mit Isofluran über eine Maske.

Die Implantation der Ileum-T-Kanülen erfolgte nach dem Verfahren von LI ET AL. (1993) antimesenterial des cranialen *Ligamentum ileocaecale* ca. 5 cm vor dem *Ostium ileocaecocolicum*, wobei der abgerundete Kanülenfuß zunächst in den eröffneten Darmabschnitt eingeführt wurde, welcher danach mit Hilfe einer doppelten Tabaksbeutelnaht wieder fest verschlossen wurde. Zum Ausführen des Kanülentubus wurde die Haut im Bereich der hinteren Rippen zunächst mit einem Korkbohrer in Größe des Tubusdurchmessers perforiert und nachfolgend bis zur Bauchhöhle eröffnet. Durch diese Öffnung konnte der Kanülentubus unter Zuhilfenahme einer Mikuliczklammer zwischen den letzten beiden Rippenbögen nach außen gezogen werden. Zu Zwecken der Fixierung der Kanüle und um eine möglichst feste Verwachsung der Darmserosa mit dem Bauchfell zu erreichen, wurde an der Außenseite der Kanüle ein schraubbarer Überwurf befestigt, durch

den bei festem Hautkontakt die Arretierung der Kanüle mit dem Tier gewährleistet werden konnte.

In Versuch Ia erfolgte ein Ersatz herausgefallener Kanülen mit weicheren aus einer Plastisol-Lösung gefertigten Kanülen (Techniplast, FH & Sons Mfg., Ltd., Rexdale, Canada) in Anlehnung an das von LI ET AL. (1993) beschriebene Verfahren.

Postoperative Maßnahmen

Neben der dreimaligen Dosis (unmittelbar nach OP, sowie zwei Tage nach OP) von Depot-Penicillin-Streptomycin (Veracin-comp[®], Fa. Albrecht) in Höhe von 0,06 ml/kg LM zur Infektionsprophylaxe bekamen die Schweine an den ersten Tagen *post operatum* jeweils 0,1 mg/kg LM Meloxicam (Metacam[®], Boehringer Ingelheim) zur Schmerzlinderung intramuskulär verabreicht. In einer 10-tägigen Rekonvaleszenz wurde den Schweinen die Basaldiät zunächst in Höhe von 100 g/d vorgelegt und täglich um 100 g gesteigert. Die Fäden der Operationsnarbe wurden etwa 14 Tage nach der Fistulierung entfernt.

Während der gesamten Versuchsdurchführung erfolgte die Pflege des kanülisierten Bereiches mit warmem Wasser. Zum Schutz der betroffenen Hautregionen wurde mehrmals täglich nach vorheriger Reinigung eine Hautschutzpaste (Stomahesive[®], ConvaTec, München) aufgetragen um Hautreizungen, hervorgerufen durch seitlich austretenden Chymus, vorzubeugen. Zudem sollte ein zwischen Überwurf der Kanüle und Haut befindlicher Schaumstoffring austretenden Chymus aufsaugen und Leckstellen abdichten.

4.1.4 Probengewinnung

Sammlung der Exkremente

Die Sammlung des Kotes und des Harns erfolgte in allen Versuchen quantitativ über einen Zeitraum von 5 Tagen (Bilanzphase). Der abgesetzte Kot wurde in Plastikbeuteln aufgefangen, die über einem angeklebten Silikonring am Anus der Tiere befestigt waren. Der Harn lief über eine Edelstahlwanne in den Sammelbehälter, in dem die dort befindlichen 40 ml 20%ige H₂SO₄ der sofortigen Ansäuerung des Harns zur Vermeidung von N-Verlusten dienten. Das Gewicht der Kotproben wurde erfasst und das Probenmaterial anschließend bei -32°C tiefgefroren.

Ein Aliquot von 20% der täglich gewonnenen Harnproben wurde in einem Sammelkanister zusammengeführt und bei etwa 4°C gelagert. Aus jedem Kanister kamen 500 ml zur Probe.

Sammlung der Chymusproben

Nach der Bilanzphase schloss sich in den Versuchen Ia, II und III die Gewinnung von Chymusproben aus dem Ileum nach dem Prinzip des „Spot-samplings“ an. Die Chymussammlung erstreckte sich über einen Zeitraum von insgesamt zwei Tagen, wobei am 1. Tag eine 12-stündige Tagsammlung (7:00 – 19:00) und am 2. Tag eine 12-stündige

Nachtsammlung (19:00 – 7:00) erfolgte. Die 24-stündige Unterbrechung der Sammlung diente den Tieren zur Erholung, wobei der Tierkontakt auf das Nötigste begrenzt war. Während der Sammelperioden wurde der aus den geöffneten Kanülen austretende Chymus mittels an den Kanülen befestigter Polyethylentütchen aufgefangen. Gefüllte Tütchen wurden mindestens im 30-minütigen Rhythmus ausgewechselt und bei -32°C eingefroren. Um die fortschreitende mikrobielle Fermentation in den Chymusproben zu unterbinden, wurden die Sammeltütchen im Voraus mit 7 ml 2,5 M Ameisensäure befüllt.

4.1.5 Analytik

Im Rahmen der Probenaufbereitung wurde das Probenmaterial (Chymus und Kot) aufgetaut und homogenisiert. Somit konnte jeweils von Kot und Chymus eine repräsentative Sammelprobe gewonnen werden.

Trockensubstanz und Rohnährstoffe

Der Gehalt an Trockensubstanz wurde in frischem Probenmaterial bestimmt, indem die Proben über einen dreistündigen Zeitraum bei einer Temperatur von 105°C im Trockenschrank gelagert und nach anschließender Abkühlung im Exsikkator zurückgewogen wurden (VDLUFA-Methode 3.1). Zur weiteren Vorbereitung der Proben für die jeweiligen Analysen wurde ein Teil des Materials gefriergetrocknet und mit Hilfe einer Zentrifugalmühle (Pulverisette, Typ 14.702, Retsch) auf einen Siebdurchgang von 0,5 mm vermahlen. Futterproben wurden ebenfalls auf die genannte Partikelgröße zerkleinert. Erläuterungen zu den einzelnen Analysenschritten sind im Folgenden gegeben. Die Bestimmung der Gehalte an Rohasche und Rohprotein in Chymus-, Kot- und Futterproben sowie des Rohfasergehaltes im Futter erfolgte gemäß der von NAUMANN UND BASSLER (1976) beschriebenen Standardmethoden der VDLUFA. Die Rohnährstoffe im Probenmaterial der Versuche Ia, II und III wurden in der Landesanstalt für landwirtschaftliche Chemie in Hohenheim bzw. die Proben aus Versuch Ib im institutseigenen Labor der Universität Halle-Wittenberg analysiert. Alle Analysen wurden als Doppelbestimmung durchgeführt. Bei einer relativen Abweichung des Analysenmittelwertes von mehr als 3% wurde die Analyse wiederholt.

Die Analyse des Rohaschegehaltes wurde durch Verbrennung der Proben bei 550°C im Muffelofen vorgenommen (VDLUFA-Methode 8.1).

Die Bestimmung des Gehaltes an Gesamt-N im Futter, gefriergetrocknetem Chymus und Kot, sowie in frischen Harnproben wurde nach dem Kjeldahl-Verfahren durchgeführt (VDLUFA-Methode 4.1.1).

Phosphor, Calcium und Titandioxid

Die Bestimmung der Gehalte an Phosphor, Calcium sowie Titan (BOGUHN ET AL., eingereicht) in Futter, Chymus und Kot erfolgte in einem Analysendurchgang in

nassaufgeschlossenen Proben am optischen Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, JY 24, Jobin Yvon GmbH) wie nachfolgend beschrieben. Von gefriergetrocknetem und auf 0,5 mm vermahlenen Probenmaterial wurde eine Menge von etwa 0,5 g Chymus, 0,6 g Kot bzw. 1 g Futter in 100 ml Erlenmeyerkolben eingewogen und zu jeder Probe 2 ml 65%ige Salpetersäure sowie 20 ml konzentrierte Schwefelsäure zugegeben. Danach wurden die Lösungen auf einer Kochplatte zum Sieden gebracht und 5 min. am Sieden gehalten. Waren die Probenlösungen vollständig abgekühlt erfolgte eine erneute Zugabe von 2 ml 65%iger HNO₃. Wieder wurden die Lösungen erhitzt und 5 min. am Sieden gehalten. Anschließend köchelten die Lösungen bei schwacher Hitze 20 min.. Nach Abkühlung wurden die farblosen Probenlösungen in 250 ml Masskolben durch einen Papierfilter quantitativ überführt und die Kolben bis zum Eichstrich mit destilliertem Wasser aufgefüllt. In der so gewonnenen Probenlösung erfolgte die Messung der Elemente bei folgenden Wellenlängen:

P: 213,618 und 214,914 nm
Ca 315,887 und 317,933 nm
Ti 336,121 und 338,376 nm

Das Nassaufschlussverfahren bietet gegenüber dem Veraschungsaufschluss den Vorteil, dass in derselben Probe neben P und Ca auch der Ti-Gehalt bestimmt werden kann. Dadurch kann die Analytik im Hinblick auf den Zeit- und Kostenfaktor effizienter gestaltet werden.

Die Ca und P-Bestimmung in den Harnproben erfolgte nach herkömmlichen Verfahren aus Aschelösungen wie nachfolgend beschrieben (RODEHUTSCORD UND DIECKMANN, 2005). Zunächst wurde eine Harnmenge von etwa 28-30 g eingewogen und auf einem Sandbad bei ca. 400°C bis zur Trockene eingedampft. Danach schloss sich eine 13-stündige Veraschung im Muffelofen bei 550°C an. Im weiteren Verlauf wurden die Proben mit 10 ml 6 N HCl versehen und erneut auf dem Sandbad eingedampft. Diese Prozedur wurde einmal wiederholt. Im letzten Verfahrensschritt wurden den Proben jeweils 10 ml verdünnte HNO₃ zugeführt und die Lösungen 5 – 10 min am Sieden gehalten. Abschließend wurden die Lösungen in 100 ml Maßkolben überführt, welche mit destilliertem Wasser bis zur Eichmarke aufgefüllt wurden.

Die Messung der Elemente P und Ca am ICP-OES erfolgte wie oben beschrieben.

Phytaseaktivität

Die Aktivität der supplementierten Phytase im Futter wurde gemäß ENGELEN ET AL. (1994) bestimmt. Sie ist definiert als die Menge Enzym, die aus einer 0,005 molaren Natriumphytatlösung pro Minute 1 µmol anorganisches Phosphat bei einer Temperatur von 37°C und einem pH-Wert von 5,5 freisetzt.

Inositolphosphate

Die Analyse des *myo*-Inositol-1,2,3,4,5,6-hexakisdihydrogenphosphates (IP₆) und dessen Hydrolyseprodukte in Futter-, Chymus- und Kotproben erfolgte im Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik des Max Rubner-Instituts in Karlsruhe nach der Methode von SANDBERG UND AHDERINNE (1986) mittels Anionenaustausch über die Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatografie (HPLC). Dabei wurden zunächst 1 g Lyophilisat mit 20 ml 2,4% HCl extrahiert, um das Inositolphosphat in Lösung zu bringen. Nach anschließendem Zentrifugieren wurde der Überstand abgenommen und zur Proteinfällung über Nacht tiefgefroren. Nach wiederholtem Zentrifugieren wurden 2 ml Lösungsextrakt mit 60 ml destilliertem Wasser versetzt und zur Aufreinigung über eine Säule gegeben, die mit 0,5 g des Anionenaustauscherharzes AG1 – X4 (Chlorid-Form, Korngröße 200-400 mesh, Biorad GmbH, München) bepackt war. Durch Waschen mit 30 ml destilliertem Wasser und 25 ml 0,025M HCl wurden die meisten Nukleotide sowie organisches Phosphat (allerdings auch IP₁₋₂) quantitativ entfernt. Anschließend wurden die IP₆₋₃ mittels 25 ml 2 M HCl eluiert und in 25 ml Maßkolben aufgefangen. Im Rotationsverdampfer wurde die HCl bei 40°C unter Vakuum bis zur Trockene abgedampft (30 min). Danach wurde das Eluat in 1 ml Aqua bidest aufgenommen und 20 µl auf die HPLC aufgetragen.

Eine Unterteilung der einzelnen Abbaustufen der IP in die jeweiligen Isomere war mit diesem Verfahren nicht möglich.

In Versuch Ib wurde keine Bestimmung der Inositolphosphate vorgenommen, da die Ergebnisse aus Versuch Ia zeigten, dass im Kot keine IP mehr nachweisbar waren.

4.1.6 Berechnungen

Die praecaecalen (pc) und totalen (tt) Verdaulichkeitsquotienten (VQ) der Weender-Rohnnährstoffe, sowie die pc und tt Nettoabsorption des P und Ca wurden für jedes Einzeltier mittels Indikatormethode über den unverdaulichen Marker TiO₂ bestimmt. Die Berechnung der postilealen (pi) Verdaulichkeitsquotienten erfolgte analog über die Marker- bzw. Nährstoffkonzentrationen in Chymus und Kot. Die pi Verdaulichkeit bezieht sich dementsprechend nicht auf die Aufnahme eines Nähr- bzw. Mineralstoffes, sondern auf dessen Anflutung am terminalen Ileum und ist in der vorliegenden Untersuchung als der Anteil eines am terminalen Ileum anflutenden Nähr- bzw. Mineralstoffes zu verstehen, der nicht mit dem Kot ausgeschieden wird. Der im Folgenden verwendete Begriff der Verdaulichkeit versteht sich als „scheinbare“ VQ insofern, als das eine Berücksichtigung einer möglichen endogenen Sekretion nicht separat möglich war. Vereinfachend werden im weiteren Verlauf ferner die Begriffe Nettoabsorption und Verdaulichkeit synonym verwendet. In Versuch Ib erfolgte zudem die Berechnung der tt Verdaulichkeitsquotienten auf Basis quantitativer Daten. Die verwendeten Berechnungsformeln für die VQ sind nachfolgend dargestellt:

Berechnung der totalen Verdaulichkeit [%] (**tt VQ**)
(via Indikatormethode)

$$VQ = 100 - 100 \times \frac{MK_F \times NK_K}{MK_K \times NK_F} \quad (1)$$

mit MK_F : Konzentration des Markers (TiO_2) im Futter [g/kg T]
 MK_K : Konzentration des Markers (TiO_2) im Kot [g/kg T]
 NK_F : Konzentration des Nährstoffes im Futter [g/kg T]
 NK_K : Konzentration des Nährstoffes im Kot [g/kg T]

(quantitativ)

$$VQ = [(I-F)/I] \times 100 \quad (2)$$

mit I: mit dem Futter aufgenommene Nährstoffmenge [g/d]
 F: mit dem Kot ausgeschiedene Nährstoffmenge [g/d]

Berechnung der praecaecalen Verdaulichkeit [%] (**pc VQ**)
(via Indikatormethode)

$$VQ = 100 - 100 \times \frac{MK_F \times NK_C}{MK_C \times NK_F} \quad (3)$$

mit MK_F : Konzentration des Markers (TiO_2) im Futter [g/kg T]
 MK_C : Konzentration des Markers (TiO_2) im Chymus [g/kg T]
 NK_F : Konzentration des Nährstoffes im Futter [g/kg T]
 NK_C : Konzentration des Nährstoffes im Chymus [g/kg T]

Berechnung der postilealen Verdaulichkeit (**pi VQ**)
(via Indikatormethode)

$$VQ = 100 - 100 \times \frac{MK_C \times NK_K}{MK_K \times NK_C} \quad (4)$$

mit MK_C : Konzentration des Markers (TiO_2) im Chymus [g/kg T]
 MK_K : Konzentration des Markers (TiO_2) im Kot [g/kg T]
 NK_C : Konzentration des Nährstoffes im Chymus [g/kg T]
 NK_K : Konzentration des Nährstoffes im Kot [g/kg T]

Die Werte für den Abbau des Phytats in den jeweiligen Darmabschnitten wurden analog bestimmt. Der Anteil an abgebautem Phytat entspricht dabei dem Phytatanteil, welcher nicht im Chymus bzw. im Kot wiedergefunden wurde (Verschwindensrate).

Für N, Ca sowie P erfolgte in allen Versuchen ferner die Berechnung der Bilanzen nach Gleichung 5. Die Bilanz [%] entspricht dem nicht mit dem Kot und Harn ausgeschiedenen Anteil eines aufgenommenen Nähr- bzw. Mineralstoffes.

$$B = 100 \times \frac{[I - (F + R)]}{I} \quad (5)$$

mit I: mit dem Futter aufgenommene Nährstoffmenge [g/d]

F: mit dem Kot ausgeschiedene Nährstoffmenge [g/d]

R: mit dem Harn ausgeschiedene Nährstoffmenge [g/d]

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Bilanz auf Basis der tatsächlich gemessenen Harnausscheidung und der über Marker berechneten faecalen Ausscheidung bestimmt.

Des Weiteren wurde in den Versuchen Ia und Ib die Berechnung der Verdaulichkeit der OS aus den oral verabreichten Substraten nach dem Differenzverfahren vorgenommen. Für Versuch Ia erfolgte dies für den pc Darmabschnitt sowie für den Gesamttrakt unter Verwendung der entsprechenden VQ der Basaldiäten und der Testdiäten. In Versuch Ib konnte die Berechnung nur für den Gesamttrakt vorgenommen werden. Zudem wurde in den Versuchen II und III nach analoger Vorgehensweise die VQ der OS des intracaecal applizierten Pektins im pi Darmbereich berechnet.

Berechnung der Verdaulichkeit der OS der Substrate nach dem Differenzverfahren

Zunächst wurde der dem Substrat zuzuschreibende OS-Anteil in der Testdiät ($0 < a \leq 1$) über den mengenmäßigen Anteil des Substrats sowie dessen OS-Gehalt nach folgender Formel berechnet.

$$a = \frac{OS_S \times A_S}{OS_{TD}} \quad (6)$$

mit OS_S : OS-Gehalt im Substrat [g/kg T]

A_S : Anteil des Substrates an der Testdiät [kg/kg]

OS_{TD} : OS-Gehalt in der Testdiät [g/kg T]

Anhand des berechneten Anteils wurde die Berechnung der VQ der OS aus dem Substrat wie folgt vorgenommen.

$$VQ_S = \frac{VQ_{TD} - VQ_{BD} \times (1 - a)}{a} \quad (7)$$

mit VQ_S : gemessener Verdaulichkeitsquotient der OS im Substrat [%]

VQ_{TD} : gemessener Verdaulichkeitsquotient der OS in der Testdiät [%]

VQ_{BD} : gemessener Verdaulichkeitsquotient der OS in der Basaldiät [%]

Nach dieser Vorgehensweise wurde die VQ der OS aus dem intracaecal applizierten Pektin im Dickdarm berechnet, mit dem Unterschied, dass anstelle der OS-Aufnahme und des OS-Anteils aus der oralen Substratgabe die täglich am terminalen Ileum anflutende OS-Menge sowie der OS-Anteil aus dem applizierten Pektin (a) als Berechnungsgrundlage dienten.

4.1.7 Datenauswertung

Die durchschnittliche Aufnahme an T, OS, N, P, Ca und Phytat in den einzelnen Behandlungen stellt den arithmetischen Mittelwert über alle Versuchsperioden dar. Da die vorgelegte Futtermenge während des Versuchsverlaufs gesteigert wurde, werden die Mittelwerte für die Aufnahmen ohne Standardabweichung angegeben.

Der Fluss am terminalen Ileum, sowie die renale und faecale Ausscheidung sind als prozentualer Anteil der Aufnahme des jeweiligen Nähr- bzw. Mineralstoffes ausgedrückt. Dabei wurden als Ausgangsbasis für den ilealen Fluss sowie die faecale Ausscheidung die mittels Marker berechneten Verdaulichkeiten verwendet.

Statistische Berechnungen

Entsprechend der Datenstruktur wurden unterschiedliche Auswertungsmodelle verwendet, die unter 4.2 näher beschrieben sind.

Die rechentechnische Bearbeitung erfolgte unter Verwendung des gemischten linearen Modells (PROC MIXED) mittels SAS-Software (Versuch 9.1; SAS Institute Inc.). Die Freiheitsgradapproximation wurde nach KENWARD UND ROGER (1997) vorgenommen (ddfm = kr). Auf signifikante bzw. tendenzielle Unterschiede zwischen den Behandlungen im jeweils betrachteten Merkmal (Vergleichsbasis: Least Square Means, LSmeans) wurde mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 bzw. 10% entschieden (nach Tukey).

4.2 Spezieller Teil

Im Folgenden sollen spezielle methodische Aspekte genannt werden, die sich aus den Zielstellungen der einzelnen Versuche bzw. Versuchskomplexe ergaben. Dabei wurden jeweils die Versuche Ia und Ib sowie Versuche II und III gemeinsam betrachtet.

4.2.1 Versuche Ia und Ib

Anhand des Versuchs Ia sollte der Einfluss verschiedener Kohlenhydratquellen im Futter auf Umsetzungs- und Fermentationsprozesse im pc und pi Darmabschnitt geklärt werden. Ursprünglich war nur ein Versuch geplant, aufgrund größerer im Versuchsverlauf auftretender Probleme wurde zur Festigung bzw. Erweiterung der Datengrundlage auf Ebene des Gesamtrakts ein weiterer Versuch (Ib) zu dieser Fragestellung durchgeführt.

Rationen

Zum Einsatz kam eine Basaldiät (BD), deren kalkulierter Gehalt an NPP (Differenz aus Gesamt-P und Phytat-P) mit 1,3 g/kg T in Versuch Ia bzw. 1,6 g/kg T in Versuch Ib gering war (siehe 2.1.2). Mit Ausnahme der Gehalte an Körnermais, Futterkalk und TiO₂ waren beide Diäten in ihrer Zusammensetzung identisch (Tab.2).

Tabelle 2. Zusammensetzung der Basaldiäten [g/kg]

Komponente	Versuch Ia	Versuch Ib
Körnermais	573	571
SES (geschält)	140	140
Maisstärke	100	100
Kartoffeleiweiß	50	50
Melasseschnitzel	50	50
getr. Eiklar	30	30
Sojaöl	20	20
Futterkalk	14	12
Dextrose	10	10
Prämix ¹⁾	10	10
DL-Methionin	1	1
L-Tryptophan	1	1
TiO ₂	3	5

¹⁾ Angaben zur Zusammensetzung des Prämix sind dem Anhang, Tabelle A-1 zu entnehmen

Es wurden Kohlenhydratquellen mit verschiedenartigen strukturellen und chemischen Eigenschaften ausgewählt. Verwendet wurden Cellulose, Maisstärke und Pektin.

Bei der Cellulose handelte es sich um ein Weichholzfaserprodukt (Typ: Jeluxyl® WEHO 500 S, Josef Ehrler GmbH & Co. KG, Rosenberg), eine reine Lignocellulose mit einem Rohfasergehalt von mehr als 65 % und einer Wasserabsorption von ca. 500% (Produktbeschreibung, Jelu-Werk).

Als Stärkezulage kam ein herkömmliches Maisstärkeprodukt (Saba-Mühle, Nürnberg) zum Einsatz.

Das Pektin, ein Apfelpektin des Types AU 202 (Herbstreith & Fox KG, Neuenbürg), zeichnete sich durch einen hohen Veresterungsgrad von etwa 72% (Werksangabe) aus, wodurch eine Komplexierung von freien Ca-Ionen im Verdauungstrakt weitestgehend unterbunden war.

Die Analyse des P-Gehalts der Substrate ergab erwartungsgemäß geringe Werte von <1 g/kg T (Tab. 3).

Geprüft wurden drei Testdiäten und die Basaldiät (**BD**) als Kontrolle. Die Testdiäten setzten sich jeweils aus 75% BD und 25% des jeweiligen Substrates zusammen. Im Einzelnen waren dies die Basaldiät mit Cellulose (**BDc**), die Basaldiät mit Maisstärke (**BDs**) und die Basaldiät mit Pektin (**BDp**). In Versuch Ib konnte, aufgrund von Akzeptanzproblemen bei der Aufnahme der BDc, Cellulose nur zu einem Anteil von 15% eingesetzt werden.

Aufgrund der geringen P-Konzentration in den Substraten, lag der P-Gehalt in den Testdiäten noch unter dem der BD.

Das Einmischen der Substrate in die Testdiäten wurde unmittelbar vor der Fütterung vorgenommen. Vorgelegt wurde das Futter mit entmineralisiertem Wasser in breiiger Konsistenz. In Tabelle 3 ist die chemische Zusammensetzung der in beiden Versuchen verwendeten BD sowie der zugelegten Substrate dargestellt.

Tabelle 3. Chemische Zusammensetzung der Basaldiäten und der Substrate in den Versuchen Ia und Ib [g/kg T]

	BD/Ia	BD/Ib	Cellulose	Stärke	Pektin
P(total)	2,93	3,20	0,07	0,21	0,79
Ca	9,09	9,07	1,11	0,04	1,54
Phytat-P	1,59	1,58	0	0	0
IP ₆ (Phytat)	5,66	5,62	0	0	0
IP ₅	1,07	1,02	0	0	0
Rohasche	49	50	6,2	0,6	40
Rohprotein	201	205	16	4	11
Rohfaser	30	35	744	0	4

Versuchsdesign

Versuch Ia

Es wurden acht Börgen mit durchschnittlich 35,9 kg LM (Tab. 1) fistuliert und danach einzeln in Stoffwechsellkäfigen aufgestellt. Der Versuch war ursprünglich im Design eines doppelt besetzten 4 x 4 Lateinischen Quadrates mit vier Behandlungen und vier aufeinander folgenden Durchgängen (DG) (n=8) geplant. Allerdings konnte das Lateinische Quadrat aufgrund des vorzeitigen problembedingten Versuchsabbruches nicht vollständig realisiert werden.

Versuch Ib

Zwölf Börge wurden mit einer LM von 29,6 kg (Tab. 1) zunächst für 12 Tage in Einzelboxen mit Betonvollspaltenboden (1,60 x 0,70 m) aufgestellt, um sie an die Versuchsbedingungen zu gewöhnen. Der Bilanzversuch folgte dem Design eines unvollständigen dreifach besetzten 4 x 2 Lateinischen Quadrats mit vier Behandlungen, die in zwei aufeinander folgenden Versuchsdurchgängen getestet wurden (n=6).

Die Verteilung der Tiere auf die einzelnen Behandlungen erfolgte in beiden Versuchen nach dem Zufallsprinzip (Tab. 4) und wurde so vorgenommen, dass kein Tier die gleiche Behandlung doppelt erfahren sollte.

Tabelle 4. Randomisierte Verteilung der Tiere auf die Behandlungen in den Versuchen Ia und Ib

Tier-Nr.	Versuch Ia			Versuch Ib	
	1. DG	2. DG	3. DG	1. DG	2. DG
1	BD	BDp	BDc	BD	BDc
2	BD	BDp	BDc	BDc	BDs
3	BDc	BD	BDs	BDs	BDp
4	BDc	BD	BDp	BDp	BD
5/5E ¹⁾	BDs	BDc	BDp	BD	BDs
6	BDs	BDc	BDp	BDc	BDp
7	BDp	BDs	BD	BDs	²⁾
8	BDp	BDs	BD	BDp	BDs
9				BD	BDp
10				BDc	BD
11				BDs	BD
12				BDp	BDc

¹⁾ Tier 5 wurde ab 2. DG durch unfistuliertes Tier 5E ersetzt

²⁾ Tier 7 wurde nach dem 1. DG eliminiert

Durchführung

Versuch Ia

Die Durchführung des Versuches erfolgte in drei aufeinanderfolgenden Durchgängen mit jeweils 22 Tagen. Jeder der drei Durchgänge begann zunächst mit einer 15-tägigen Adaptation zur Gewöhnung der Schweine an die Versuchsdiäten. Dabei wurde die Zulage der Substrate während der ersten acht Tage im zweitägigen Rhythmus in 5%-Schritten gesteigert. Ab dem 9. Tag der Adaptation wurden den Tieren die Versuchsdiäten mit 25% Substrat vorgelegt. An die Adaptation schloss sich jeweils eine fünftägige Bilanzphase an, während der Kot und Harn quantitativ gesammelt wurden. Gefolgt wurde diese von einer zweitägigen Gewinnung von Chymusproben nach dem unter 3.1.4 beschriebenen Prinzip.

Die tägliche Futtermenge war im 1. DG auf 1,0 kg begrenzt und wurde in den folgenden Durchgängen um jeweils 0,2 kg gesteigert. Die Begrenzung der Futtermenge sollte einen möglichst vollständigen Verzehr der Versuchsdäten ermöglichen.

Versuch Ib

Der Versuch wurde in insgesamt zwei Durchgängen mit einer Dauer von jeweils 18 Tagen realisiert. Aus technischen Gründen wurde die Adaptation in diesem Versuch auf 13 Tage verkürzt, in denen ebenfalls während der ersten acht Tage eine schrittweise Steigerung des Substratanteils (5% je 2 Tage) vorgenommen wurde. In den sich anschließenden fünf Tagen erhielten die Tiere die geplanten Substratanteile. Zwei Tage vor Beginn der Bilanzphase wurden die Schweine in die Stoffwechsellkäfige verbracht, damit sie sich an die Prozedur gewöhnen konnten. Die fünftägige Bilanzphase mit quantitativer Sammlung der Exkremente schloss sich an die Adaptation an.

Gefüttert wurde den Schweinen im 1. DG eine tägliche Menge von 1,2 kg, welche mit Beginn des 2. DG auf 1,4 kg erhöht wurde.

Datenauswertung

Die Auswertung erfolgte in Versuch Ia nach dem Design eines unvollständigen doppelt besetzten 4 x 3 Lateinischen Quadrates bzw. in Versuch Ib eines unvollständigen dreifach besetzten 4 x 2 Lateinischen Quadrats.

Aufgrund auftretender Probleme mit den Kanülen, die unter 6.1.1 beschrieben werden, mussten Tiere während des Versuches Ia eliminiert werden. Ein Tier konnte dabei durch ein intaktes Reservetier ersetzt werden. Überdies wurden die Daten eines weiteren Tieres mit Ausnahme der Kot- /Harndaten im 1. DG von der Auswertung ausgeschlossen. Aus der sich daraus ergebenden ungleichen Anzahl an Wiederholungen je Behandlung folgte eine unbalancierte Klassenbesetzung in Versuch Ia, die nachfolgend dargestellt ist.

		Behandlung			
		BD	BDc	BDs	BDp
Messung	pc	5	5	4	5
	pi	5	5	4	5
	tt	5	6	4	7

In Versuch Ib musste ein Tier nach dem 1. DG eliminiert werden, woraus sich eine Anzahl an Wiederholungen je Behandlung von 6 für BD, BDs und BDp bzw. 5 für die BDc ergab.

Im Weiteren erfolgte die Auswertung wie unter 3.1.6 beschrieben.

Da der Mittelwertvergleich mit unbalancierten Daten erfolgte, wurde in beiden Versuchen eine Anpassung des P-Wertes nach der Tukey-Kramer-Korrektur vorgenommen.

Neben dem interessierenden festen Effekt (Behandlung, in diesem Falle Diät) waren wiederholte Messungen am Tier (zufälliger Effekt) zu berücksichtigen. Entsprechend war für den Versuch das folgende gemischte lineare Modell zu bearbeiten:

$$y_{ikl} = \mu + D_i + Tier_k + e_{ikl} \quad (8)$$

mit μ : allgemeines Mittel

D_i : fester Effekt der i -ten Behandlung

$Tier_k$: zufälliger Effekt des k -ten Tier, $Tier_k \sim N(0; \sigma^2_{Tier})$

e_{ikl} : zufälliger Resteffekt, $e_{ikl} \sim N(0; \sigma^2_{Rest})$

4.2.2 Versuche II und III

Ziel war es, den Einfluss einer Verabreichung von fermentierbarer Substanz in den Dickdarm auf die Umsetzungen von P, Ca, N sowie den Abbau der OS in Abhängigkeit vom Versorgungsniveau mit vP zu untersuchen. Hierzu wurden zwei Versuche durchgeführt.

Rationen

In beiden Versuchen wurde als Kontrolle eine Basaldiät verwendet, deren Zusammensetzung im Wesentlichen mit der in den Versuchen Ia und Ib eingesetzten BD identisch war (Tab. 5). Die kalkulierten Gehalte an NPP lagen in den BD bei 1,66 (Versuch II) bzw. 1,42 g/kg T (Versuch III). Neben der P-Mangeldiät als Kontrolle kam in Versuch II eine Diät mit bedarfsdeckender Versorgung an vP zum Einsatz. Die Anhebung des vP-Versorgungsniveaus erfolgte durch die Zulage von 15 g/kg mineralischem Phosphat in Form von Monocalciumphosphat (MCP) im Austausch gegen Maisstärke. Der kalkulierte Gehalt an vP wurde in dieser Behandlung (Behandlung **MCP**) somit auf 5,68 g/kg T erhöht. Es wurde damit bewusst eine den Bedarf an vP überschreitende Versorgung gewählt.

In Versuch III wurde durch die Supplementation von 1.000 U/kg mikrobieller Phytase des Produktstammes *Aspergillus niger* (Typ: Natuphos 5000 G, BASF, Ludwigshafen) zur BD eine Steigerung der Versorgung mit vP erreicht (Behandlung **PHY**).

Tabelle 5. Zusammensetzung der Basaldiäten in den Versuchen II und III [g/kg]

Komponente	Versuch II		Versuch III
	BD	MCP	BD/PHY
Körnermais	573	573	573
SES (geschält)	140	140	140
Maisstärke	100	85	100
Kartoffeleiweiß	50	50	50
Melasseschnitzel	50	50	50
getr. Eiklar	30	30	30
Sojaöl	20	20	20
Futterkalk	12	12	12
Dextrose	10	10	10
Premix	10	10	10
DL-Methionin	1	1	1
L-Tryptophan	1	1	1
TiO ₂	3	3	3
MCP	-	15	- ¹⁾

¹⁾ Supplementierung von 1.000 U Phytase (Natuphos 5000 G)/kg Futter

Pektinapplikation

Als zweiter Faktor sollte der Einfluss einer intracaecalen Applikation von Apfelpektin desselben Typs wie in den Versuchen Ia und Ib untersucht werden. Es war geplant, Pektin in einer Menge von täglich 200 g/Tier mit entmineralisiertem Wasser zu vermengen und den Schweinen durch die Kanülen in den Dickdarm zu applizieren. Diese Menge konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht realisiert werden, da das enorme Wasserbindungsvermögen des Pektins die maximale Aufnahmemenge des Darmes auch bei mehrmaliger Verabreichung kleinerer Teilmengen in starkem Maße begrenzte. Die Injektion der Pektinlösung in dieser Höhe hätte somit kontinuierlich erfolgen müssen, was nicht realisierbar war. Die Pektinmenge wurde demnach auf 60 g/Tier und Tag reduziert. Angaben zur chemischen Zusammensetzung der Diäten sowie des applizierten Pektins sind Tab. 6 zu entnehmen.

Tabelle 6. Chemische Zusammensetzung der in den Versuchen II und III verwendeten Basaldiäten und des Pektins [g/kg T]

	Versuch II		Versuch III		Pektin
	BD	MCP	BD	PHY	
P(total)	3,25	7,25	3,00	3,06	0,79
Ca	7,80	11,4	8,89	8,39	1,54
Phytat-P	1,59	1,57	1,58	1,62	0
IP ₆ (Phytat)	5,65	5,57	5,60	5,75	0
IP ₅	0,99	0,89	0,96	0,97	0
Rohasche	51	63	50	48	40
Rohprotein	200	199	198	196	11
Rohfaser	32	32	33	31	4

Versuchsdesign

Es wurden jeweils acht Börgе aufgestellt. Die Fistulierung erfolgte bei einer mittleren LM von 30,7 (Versuch II) bzw. 29,5 kg (Versuch III) (Tab. 1).

Beide Versuche folgten dem Design eines zweifaktoriellen, doppelt besetzten 4 x 2 Lateinischen Quadrats mit den Faktoren vP-Versorgung und intracaecale Applikation von Pektin. Auf diese Weise wurden je Versuch vier Behandlungen in zwei Durchgängen geprüft. Das Schema des Versuchsaufbaus ist Abb. 4 zu entnehmen.

		Pektinapplikation	
		ja	nein
Versorgung mit vP	hoch	MCP+ oder PHY+	MCP- oder PHY-
	niedrig	BD+	BD-

Abbildung 4. Schema des zweifaktoriellen Versuchsdesigns in den Versuchen II und III

Die randomisierte Verteilung der Tiere auf die einzelnen Behandlungen erfolgte nach dem in Tab. 7 dargestellten Schema.

Tabelle 7. Randomisierte Verteilung der Tiere auf die Behandlungen in den Versuchen II und III

Tier-Nr. ¹⁾	Versuch II		Versuch III	
	1. DG	2. DG	1. DG	2. DG
1	BD+	MCP+	BD+	PHY-
2	MCP-	BD+	PHY+	BD+
3	BD-	MCP-	PHY+	BD-
4	MCP-	BD-	BD-	BD+
5	MCP+	BD+	BD-	PHY-
6	MCP+	MCP-	PHY-	PHY+
7	BD-	MCP+	PHY-	BD-
8	BD+	BD-	BD+	PHY+

¹⁾ In Versuch III wurden andere Tiere eingesetzt als in Versuch II

Durchführung

Beide Versuche wurden in jeweils zwei Durchgängen realisiert, wobei jeder Durchgang 22 Tage umfasste. Dabei diente die 15-tägige Adaptation der Gewöhnung der Tiere an die Behandlungen, wobei die Pektindosis während der ersten acht Tage aller zwei Tage um 12 g gesteigert wurde und an den übrigen sieben Tagen Pektin in Höhe von 60 g appliziert wurde. Daran schloss sich, analog dem Versuch Ia, eine 5-tägige Bilanzphase und 2-tägige Chymussammlung an.

Die intracaecale Applikation des Pektins erfolgte täglich in drei Gaben à 20 g (8:30; 13:30 und 16:30 Uhr). Das Pektin wurde vermischт mit entmineralisiertem Wasser im Verhältnis 1:30 appliziert, woraus sich je Gabe eine Menge von 600 ml Pektinlösung ergab.

Unmittelbar vor jeder Applikation wurden die bereiteten Lösungen im Wasserbad entsprechend der Körpertemperatur der Tiere auf 38°C erwärmt. Die Applikation der Lösung erfolgte mit einer 60 ml Injektionsspritze und einem mittels Gummistopfen an der Kanüle befestigten Schlauch.

Die Versuchstiere der Kontrollbehandlung bekamen eine Blindlösung in Form von entmineralisiertem Wasser in gleicher Menge (1,8 L/Tag) analog dazu verabreicht.

Datenauswertung

Die Auswertung beider Versuche wurde gemäß dem Design eines unvollständigen doppelt besetzten 4 x 2 Lateinischen Quadrates mit gleicher Klassenbesetzung vorgenommen (n=4) und erfolgte mittels zweifaktorieller Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktoren Pektinapplikation (Pek) und P-Versorgungsniveau (P) sowie deren Interaktion (Pek×P).

Dabei wurde das obige Modell (8) um einen fixen Effekt erweitert. Auf die Untersuchung eines möglichen Periodeneffekts wurde aufgrund der geringen Tierzahl je Behandlung und Periode (n=2) verzichtet. Alle weiteren statistischen Schritte der Auswertung erfolgten analog den Versuchen Ia und b. Das folgende gemischte lineare Modell wurde genutzt:

$$y_{ijkl} = \mu + P_i + Pek_j + (P \times Pek)_{ij} + Tier_k + e_{ijkl} \quad (9)$$

mit μ : allgemeines Mittel

P_i : fester Effekt der i-ten Phosphorstufe

Pek_j : fester Effekt der j-ten Pektinstufe

$(P \times Pek)_{ij}$: Wechselwirkung

$Tier_k$: zufälliger Effekt des k-ten Tier, $Tier_k \sim N(0; \sigma^2_{Tier})$

e_{ijkl} : zufälliger Resteffekt, $e_{ijkl} \sim N(0; \sigma^2_{Rest})$

5 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse aus den einzelnen Versuchen soll sich auf die Angabe der Mittelwerte (für die Nähr- bzw. Mineralstoffaufnahmen) bzw. der LSmeans (übrige Daten) beschränken. Alle diesen Werten zugrunde liegenden Analysendaten für T, OS, P, Ca, N sowie TiO₂ im Chymus und Kot der Einzeltiere finden sich in den jeweiligen Anhangstabellen (Versuch Ia: Tab. A-3; Versuch Ib: Tab. A-10; Versuch II: A-16 und Versuch III: Tab. A-23). Anhand dieser Analysendaten wurden unter Anwendung der Markermethode die Verdaulichkeitsquotienten der entsprechenden Nähr- bzw. Mineralstoffe berechnet, wobei die Einzeltierdaten für die VQ ebenfalls dem Anhang zu entnehmen sind. In den Versuchen II und III wurde auf die Berechnung der Verdaulichkeiten der T verzichtet. Es wurden lediglich die T-Gehalte im Ileumchymus und Kot angegeben.

Die Bilanzen für P, Ca und N wurden auf Basis der angegebenen Analysendaten aus dem Kot und dem Harn berechnet, wobei sich die Einzeltierdaten für die renale Exkretion und die Bilanzen in den entsprechenden Anhangstabellen wieder finden.

Die Konzentrationen der einzelnen IP im Chymus bzw. Kot der Einzeltiere, sowie die Abbauraten für Phytat sind ebenfalls dem Anhang zu entnehmen.

5.1 Versuch Ia

Während der Durchführung des Versuches traten teils erhebliche Probleme auf, die im Kapitel Fehlerbetrachtung (6.1.1) genauer beleuchtet und diskutiert werden.

Am Ende des Versuches erreichten die Tiere eine mittlere LM von $62,9 \pm 4,4$ kg. Die LM der Einzeltiere sind im Anhang, Tab. A-2 aufgezeigt.

Die mittleren Aufnahmen an T, OS, P, Ca und N während des Versuches sind in den Tabellen 8 – 12 dargestellt. Drei Tiere hinterließen an einzelnen Tagen Futterreste, deren Zusammensetzung bei der Berechnung berücksichtigt wurde. Durchschnittlich lagen diese bei:

2. Durchgang: BDc: 44,6 g T/d (Tier 6),

3. Durchgang: BDc: 94,6 g T/d (Tier 1)

BDp: 402,7 gT/d (Tier 4)

Die höchsten Aufnahmen an P, Ca und N wurden erwartungsgemäß für die BD beobachtet. Aufgrund des Verdünnungseffektes der Zulagen waren die Aufnahmen der genannten Nähr- bzw. Mineralstoffe bei gleicher Futteraufnahme in den übrigen Behandlungen entsprechend geringer.

Trockensubstanz

Tabelle 8 zeigt die für den Ileumchymus und den Kot ermittelten T-Gehalte sowie die mittleren Verdaulichkeitsquotienten für die T (VQ-T). Die den Mittelwerten (bzw. LSmeans) zugrunde liegenden Einzeltierdaten finden sich im Anhang, Tab. A-4.

Während der T-Gehalt im Ileumchymus keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen zeigte, bewirkten Cellulose und Pektin eine Abnahme des T-Gehaltes im Kot.

Auf pc Ebene war die VQ-T sowohl bei Zulage von Cellulose als auch Pektin in etwa gleichem Maße signifikant vermindert, während Stärke eine numerische Erhöhung der VQ-T zur Folge hatte. Im Bereich des Dickdarms wurden in den Behandlungen BD und BDs etwa 57% der einfließenden T verdaut. In diesem Darmbereich zeigte sich ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der VQ-T zwischen Pektin und Cellulose. Pektin führte zu einer numerischen Erhöhung (16%-Punkte), Cellulose hingegen zu einer signifikanten Abnahme der piVQ-T. Lediglich 5,6% der einfließenden T konnten in dieser Behandlung pi verdaut werden.

Da im Gesamttrakt bei Zulage von Stärke signifikant mehr T verdaut wurde, war in dieser Behandlung demzufolge eine verminderte T-Exkretion zu beobachten. Die Zulage von Cellulose führte zu einer deutlichen Depression der ttVQ-T um mehr als 30%-Punkte, wohingegen Pektin keinen Einfluss hatte.

Tabelle 8. Aufnahme (MW), Konzentration, Exkretion und Verdaulichkeit der Trockensubstanz (LSmeans, Stdf.) in Versuch Ia

	BD	BDc	BDs	BDp	p
Aufnahme [g/d]	1.051	1.070	1.040	1.060	
T-Gehalt [%]					
Ileumchymus	11 (1,1)	12 (1,1)	9,8 (1,22)	11 (1,2)	0,584
Kot	37 ^a (1,2)	30 ^b (1,1)	42 ^a (1,4)	32 ^b (1,1)	<0,001
Exkretion [% d. T-Aufnahme]					
faecal	12 ^b (0,7)	44 ^a (0,6)	8,7 ^c (0,77)	14 ^b (0,6)	<0,001
Verdaulichkeit [%]					
praecaecal	73 ^a (2,5)	52 ^b (2,5)	80 ^a (2,8)	51 ^b (2,5)	<0,001
postileal	56 ^a (4,8)	5,6 ^b (4,85)	58 ^a (5,4)	72 ^a (4,8)	<0,001
total	88 ^b (0,7)	56 ^c (0,6)	91 ^a (0,8)	86 ^b (0,6)	<0,001

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

Organische Substanz

Die mittleren Verdaulichkeitsquotienten für die OS (VQ-OS) in den einzelnen Darmabschnitten sind in Tab. 9 dargestellt (Einzeltierdaten im Anhang, Tab. A-5). Die Verdaulichkeit der OS im pc Darmbereich lag für die Kontrolle bei durchschnittlich 76%. Wurde der Basaldiät Cellulose bzw. Pektin zugelegt, fiel die VQ signifikant um 21%-

Punkte. Bei einer Supplementation mit Stärke wurde hingegen ein leichter Anstieg beobachtet. Ein differentes Bild zeigte sich für die VQ im pi Darmbereich analog zu den für die T gemachten Beobachtungen. Hier war ein senkender Effekt auf die Verdaulichkeit der OS nur bei Zulage von Cellulose festzustellen, während die mittlere VQ bei Zulage von Pektin mit 74% deutlich höher lag als in den anderen Behandlungen. Bei Betrachtung des Gesamttraktes lag die mittlere Verdaulichkeit der OS in der BDc mit 57% signifikant unter dem Niveau der übrigen Behandlungen. Dementsprechend wurde in dieser Behandlung signifikant mehr OS faecal ausgeschieden. Die Differenz in der BDp in Bezug auf die ttVQ-OS ließ sich nur gegenüber der BDs statistisch absichern. Gegenüber der Kontrolle konnte für die Pektinzulage kein Effekt nachgewiesen werden.

Tabelle 9. Aufnahme (MW), Exkretion und Verdaulichkeit der Organischen Substanz (LSmeans, Std.f.) in Versuch Ia

	BD	BDc	BDs	BDp	p
Aufnahme [g/d]	1.000	1.030	1.002	1.011	
Exkretion [% d. OS-Aufnahme]					
faecal	9,8 ^{bc} (0,74)	43 ^a (0,7)	7,5 ^c (0,53)	12 ^b (0,6)	<0,001
Verdaulichkeit [%]					
praecaecal	76 ^a (2,5)	55 ^b (2,5)	81 ^a (2,8)	55 ^b (2,5)	<0,001
postileal	60 ^a (5,4)	1,0 ^b (5,37)	62 ^a (6,0)	74 ^a (5,4)	<0,001
total	90 ^{ab} (0,7)	57 ^c (0,7)	93 ^a (0,8)	88 ^b (0,6)	<0,001

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

Phosphor

Die tägliche P-Aufnahme war mit maximal 3,1 g in der BD bzw. 2,3 – 2,6 g in den Testdiäten gering.

Die analysierten P-Konzentrationen im Ileumchymus sind in Tabelle 10 dargestellt und erreichten mit über 9 g/kg T bei Zulage von Stärke das höchste Niveau, wobei ein signifikanter Unterschied zu allen übrigen Behandlungen bestand. Sowohl Pektin als auch Cellulose führten zu einer deutlichen Abnahme der P-Konzentration im Ileumchymus. Im Kot lagen die P-Konzentrationen für die BDs und die Kontrolle mit durchschnittlich 20 bzw. 18 g/kg T auf etwa gleichem Niveau. Wurde Cellulose zugelegt, blieb die P-Konzentration mit 4 g/kg T vergleichbar gering wie im Chymus. Bei Zulage von Pektin war gegenüber der Kontrolle und der BDs ebenfalls eine signifikante Reduzierung der P-Konzentration zu beobachten, allerdings in signifikant geringerem Maße im Vergleich zur BDc.

Im pc Darmabschnitt lag die mittlere Verdaulichkeit (pcVQ-P) des Phosphors bei den Kontrolltieren sowie den Tieren, welchen Cellulose vorgelegt wurde, am höchsten (Tabelle 10). In beiden Behandlungen wurde etwa ein Viertel des aufgenommenen Phosphors verdaut. Wurde der BD Stärke bzw. Pektin zugelegt, kam es zu einer deutlichen, jedoch nicht signifikanten Absenkung der pcVQ. Mit 11%-Punkten Differenz gegenüber der Kontrolle hatte die Stärkezulage einen tendenziellen Einfluss auf die pcVQ des P. Die mittlere Verdaulichkeit von P im pi Darmbereich war mit -4,6 bzw. -4,4% negativ, wenn Cellulose bzw. Pektin supplementiert wurde. Für die Kontrolle sowie die Behandlung mit zugelegter Stärke konnten im Durchschnitt positive piVQ ermittelt werden, wobei der mit 8,8% höchste Wert für die BDs beobachtet wurde. Die Differenz zwischen diesem und den Werten für die BDc und BDp konnte statistisch gesichert werden.

Im Gesamtrakt wurde für die Kontrolle mit durchschnittlich 28% die höchste P-Verdaulichkeit beobachtet. Eine Zulage von Cellulose bzw. Stärke verursachte eine leichte und im Falle des Pektins eine signifikante Abnahme der ttVQ-P. Bei Vorlage der BDp verdauten die Schweine insgesamt nur durchschnittlich 15% des aufgenommenen Phosphors. Dementsprechend wurde in dieser Behandlung ein signifikant höherer Anteil P mit dem Kot ausgeschieden als in der Kontrolle.

Der Anteil des mit dem Harn ausgeschiedenen Phosphors war mit weniger als 1% der Aufnahme sehr gering, lediglich die Zulage von Cellulose bewirkte eine signifikante Erhöhung der renalen P-Ausscheidung auf 2,3%.

Aufgrund des geringen renalen Anteils war die P-Bilanz nahezu vergleichbar mit der VQ-P im Gesamtrakt. Die Darstellung der Einzeltierdaten zum P sind dem Anhang, Tab. A-6 zu entnehmen.

Tabelle 10. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Phosphor (LSmeans, Stdf.) sowie Aufnahme (MW) und Abbau von Phytat (LSmeans, Stdf.) in Versuch Ia

	BD	BDc	BDs	BDp	p
Aufnahme [g/d]	3,1	2,4	2,3	2,6	
P-Konzentration [g/kg T]					
Ileumchymus	8,16 ^b (0,29)	3,41 ^c (0,29)	9,29 ^a (0,32)	4,12 ^c (0,29)	<0,001
Kot	18,2 ^{ab*} (0,90)	3,86 ^c (0,81)	19,8 ^a (1,01)	15,2 ^{b*} (0,74)	<0,001
Exkretion [% d. P-Aufnahme]					
faecal	72 ^b (2,8)	77 ^{ab*} (2,5)	77 ^{ab} (3,1)	85 ^{a*} (2,3)	0,015
renal	0,7 ^b (0,33)	2,3 ^a (0,30)	0,8 ^b (0,37)	0,7 ^b (0,30)	0,004
Bilanz [% der P-Aufnahme]	27 ^a (2,9)	21 ^{ab*} (2,6)	23 ^{ab} (3,3)	12 ^{b*} (2,6)	0,014
Verdaulichkeit [%]					
praecaecal	26 [*] (2,9)	25 (2,9)	15 [*] (3,3)	17 (2,9)	0,034
postileal	3,0 ^{ab} (3,0)	-4,6 ^b (3,0)	8,8 ^a (3,3)	-4,4 ^b (3,0)	0,023
total	28 ^a (2,8)	24 ^{ab*} (2,5)	23 ^{ab} (3,1)	15 ^{b*} (2,3)	0,015
Phytataufnahme [g/d]	5,95	4,54	4,42	4,50	
pc Phytatabbau [%]	60 (15,2)	60 (17,0)	18 (17,0)	64 (15,2)	0,202

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,05$)

* gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,1$)

Inositolphosphate und Phytatabbau

Die Verteilung der einzelnen IP im Futter und Chymus ist Abb. 5 zu entnehmen. Die in der BD enthaltenen IP setzten sich zum überwiegenden Teil (84%) aus Phytat und zu geringerem Anteil aus IP₅ (16%) zusammen. Geringer phosphorylierte IP konnten in der BD nicht nachgewiesen werden. Die IP-Analyse der KH-Substrate ergab, dass dort keine IP enthalten waren. Im Ileumchymus der Kontrolltiere machte Phytat mit etwa 50% etwa die Hälfte der vorhandenen IP aus. Die übrigen 50% verteilten sich in dieser Behandlung auf die geringer phosphorylierten IP, wobei die Abbaustufe IP₃ mit etwa 7% den geringsten Anteil hatte. Die Existenz der IP₄ und IP₃ lassen einen gewissen pc Abbau der IP₆ und IP₅ erkennen. Eine ähnliche Verteilung war im Ileumchymus der Tiere zu beobachten, denen Cellulose vorgelegt wurde.

Die IP-Konzentrationen im Ileumchymus der Einzeltiere sind dem Anhang, Tab A-7 zu entnehmen. Im Kot der Tiere konnten keine IP nachgewiesen werden.

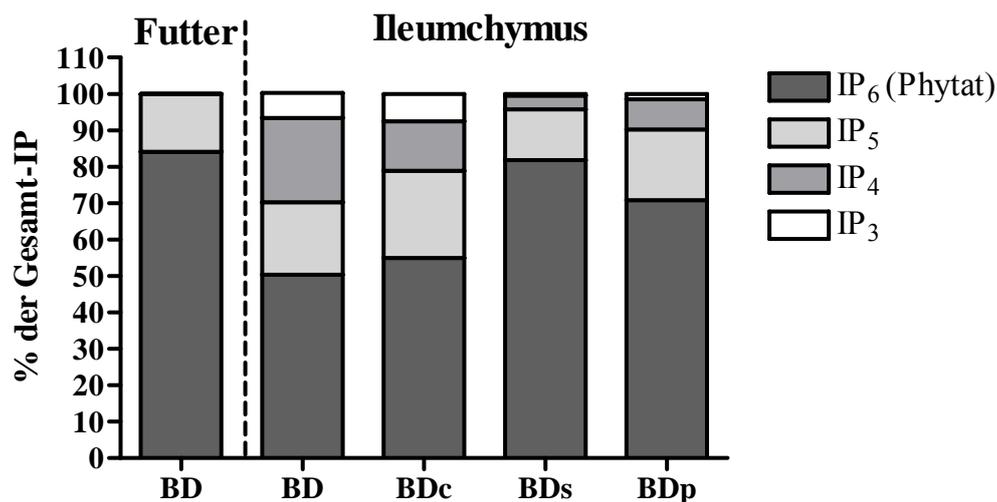


Abbildung 5. IP_x-Muster im Futter und Chymus in Versuch Ia (MW)

Die mittleren Phytataufnahmen sind in Tab. 10 (bzw. auf Einzeltierbasis dem Anhang, Tab. A-7) dargestellt.

Für den mittleren pc Phytatabbau wurden mit Ausnahme der BDs etwa vergleichbare Werte ermittelt. Am terminalen Ileum wurde Phytat bereits zu etwa zwei Drittel hydrolysiert. Weder Pektin noch Cellulose zeigten hier Effekte. Lediglich eine geringfügige Steigerung des Phytatabbaus um 4%-Punkte wurde beobachtet, wenn der BD Pektin zugelegt wurde. Demgegenüber bewirkte die Zulage von Maisstärke eine deutliche Abnahme des pc Phytatabbaus um 42%-Punkte. Aufgrund der hohen Standardfehler konnte diese Differenz jedoch nicht statistisch gesichert werden.

Im Kot der Tiere konnte kein Phytat nachgewiesen werden. Der Abbau von Phytat im pi Darmbereich war dementsprechend vollständig. Auf die Darstellung der mittleren Abbauraten für den Bereich des Dickdarms und des Gesamtrakts von 100% wurde verzichtet.

Calcium

Die Zulage von Pektin bzw. Cellulose führte zu einer signifikanten Abnahme der Ca-Konzentration im Ileumchymus um 4,8 bzw. 9 g/kg T. Die Ca-Konzentration im Kot war hingegen nur durch Cellulose hochsignifikant um 25 g/kg T vermindert, während Pektin und Stärke eine numerische Erhöhung bewirkten.

Die in Tabelle 11 dargestellten mittleren pcVQ für Calcium (pcVQ-Ca) lagen bei Zulage von Cellulose bzw. Stärke mit 62% leicht über dem für die Kontrolle ermittelten Wert. Wurde Pektin zugelegt zeigte sich hingegen eine signifikante Abnahme der pc Ca-Verdaulichkeit um fast die Hälfte. Postileal wurden für alle Behandlungen negative Werte ermittelt, die bei Stärke- bzw. Pektinsupplementation besonders gering ausfielen. Effekte konnten aufgrund der hohen Standardfehler nicht beobachtet werden. Für die Verdaulichkeit des Ca im Gesamtrakt zeigte sich ein ähnliches Bild wie bereits auf pc Ebene. Für die Kontrolle sowie die BDc wurde eine durchschnittliche VQ von 60%

ermittelt. Bei Stärkezulage war eine numerische Abnahme um 4%-Punkte gegenüber der Kontrolle zu beobachten. Die Depression der VQ-Ca um 50% bei Zulage von Pektin war auch im Gesamttrakt anzutreffen.

Die mittlere renale Ausscheidung von Ca belief sich für die Kontrolle auf 36% der Ca-Aufnahme. Bei der Ergänzung mit Cellulose kam es zu einer leichten Abnahme, bei Stärkezulage hingegen zu einer leichten Zunahme der relativen renalen Ca-Exkretion. Wurde den Rationen Pektin zugelegt, schieden die Tiere signifikant weniger Ca mit dem Harn aus.

Es zeigte sich eine deutliche Verschiebung der Ausscheidungen von renal (22% der Ausscheidung) nach faecal (77% der Ausscheidung) wenn der Basaldiät Pektin zugelegt wurde.

Die mittlere Ca-Bilanz lag bei 24% für die Kontrolle, entsprechend entgegengesetzt zur renalen Ausscheidung, konnte für die BDs ein numerisch geringerer bzw. für die BDc ein numerisch höherer Wert festgestellt werden. Pektin bewirkte einen signifikanten Rückgang der Ca-Bilanz. Die Einzeltierdaten für die Ca-Umsetzungen finden sich im Anhang, Tab. A-8.

Tabelle 11. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Calcium (LSmeans; Stdf.) in Versuch Ia

	BD	BDc	BDs	BDp	p
Aufnahme [g/d]	9,6	7,6	7,2	7,6	
Ca-Konzentration [g/kg T]					
Ileumchymus	14,8 ^a (0,79)	5,79 ^c (0,79)	12,6 ^{ab} (0,88)	9,98 ^b (0,79)	<0,001
Kot	31,2 ^a (2,52)	6,38 ^b (2,30)	35,0 ^a (2,82)	37,5 ^a (2,13)	<0,001
rel. Exkretion [% d. Ca-Aufn.]					
faecal	40 ^b (2,8)	39 ^b (2,5)	44 ^b (3,2)	70 ^a (2,3)	<0,001
renal	36 ^a (3,3)	31 ^{ab} (3,0)	39 ^a (3,6)	20 ^b (3,0)	0,009
Bilanz [% der Ca-Aufnahme]	24 ^a (4,2)	30 ^a (3,9)	17 ^{ab} (4,7)	6,8 ^b (3,9)	0,004
Verdaulichkeit [%]					
praecaecal	59 ^a (3,8)	62 ^a (3,8)	62 ^a (4,3)	31 ^b (3,8)	<0,001
postileal	-0,6 (9,19)	-2,9 (9,19)	-15 (10,3)	-9,3 (9,19)	0,735
total	60 ^a (2,8)	61 ^a (2,5)	56 ^a (3,2)	30 ^b (2,3)	<0,001

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

Stickstoff

Eine signifikante Abnahme der N-Konzentration im Ileumchymus um 15 g/kg T gegenüber der Kontrolle war bei Zulage von Cellulose zu beobachten, während Pektin nur in der Tendenz eine Abnahme bewirkte (Tabelle 12). Im Kot hingegen war die N-Konzentration von der Pektinzulage beeinflusst und lag signifikant höher als in den übrigen Behandlungen. Stärke führte im Vergleich zur Kontrolle nur zu einer tendenziellen Abnahme der Konzentration um etwa 4 g/kg T. Die mit 14,4 g/kg T signifikant geringste N-Konzentration im Kot war bei Zulage von Cellulose zu beobachten.

Die mittlere pc Verdaulichkeit des Stickstoffs (pcVQ-N) lag für die Kontrolle sowie für die Stärke-supplementierte Behandlung bei 73 bzw. 74%. Wurde der BD Cellulose zugelegt, konnte ein Rückgang der Verdaulichkeit um 8%-Punkte beobachtet werden, der allerdings nicht signifikant war. Die Zulage von Pektin verminderte die N-Verdaulichkeit gegenüber der Kontrolle signifikant um 25%-Punkte. Im postilealen Darmabschnitt verdauten die Tiere der Kontrolle durchschnittlich 52% des anflutenden Stickstoffs. In der Stärke-supplementierten Behandlung wurde ein etwas höherer Anteil des in den Dickdarm einfließenden N verdaut, während in der Pektin-supplementierten Behandlung ein leichter Rückgang zu verzeichnen war. Die Zulage von Cellulose führte zu einer Abnahme der pi N-Verdaulichkeit auf 28%, die jedoch nur im Vergleich zur BDs signifikant war. Die N-Verdaulichkeit lag im Gesamttrakt für die Kontrolle bei 87% und für die Ration mit Stärkezulage numerisch darüber. Die Effekte zwischen den Behandlungen waren vergleichbar mit den beobachteten Tendenzen im pc Darmabschnitt. Die Verdaulichkeit des N war durch die Zulage von Cellulose bzw. Pektin gleichermaßen signifikant vermindert. Gegenüber dem pc Wert konnte für die Verdaulichkeit des N in der BDp im Gesamttrakt eine deutliche Steigerung festgestellt werden.

Die mittlere N-Ausscheidung mit dem Harn betrug für die Kontrolle im Mittel 45% der N-Aufnahme. Bei Zulage von Stärke bzw. Cellulose waren die renalen Ausscheidungen gegenüber der Kontrolle numerisch vermindert bzw. erhöht. Pektin führte zu einer tendenziellen Reduzierung der renalen N-Ausscheidung. Während in den Behandlungen BD und BDs N zu etwa 77% auf renalem Wege ausgeschieden wurde, verminderte sich dieser Anteil bei Zulage von Pektin auf 55% bzw. von Cellulose auf 66%. Somit bewirkte besonders Pektin entsprechend eine deutliche Verschiebung der Ausscheidungswege des N von renal nach faecal. Dementsprechend hatte die Pektinzulage keinen Einfluss auf die N-Bilanz. Eine tendenzielle Verminderung der N-Bilanz war lediglich bei Zulage von Cellulose zu beobachten. Bei Zulage von Stärke wurde über die Hälfte des aufgenommenen N retiniert, was gegenüber der Kontrolle eine numerische Steigerung darstellt. Alle Einzeltierdaten zur Aufnahme, Ausscheidung, Verdaulichkeit und Bilanz des N sind im Anhang, Tab. A-9 dargestellt.

Tabelle 12. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen (LSmeans, Stdf.) von Stickstoff in Versuch Ia

	BD	BDc	BDs	BDp	p
Aufnahme [g/d]	34	27	25	26	
N-Konzentration [g/kg T]					
Ileumchymus	32,7 ^{a*} (2,08)	17,6 ^b (2,08)	31,1 ^a (2,32)	25,9 ^{a*} (2,08)	<0,001
Kot	34,4 ^{b*} (1,25)	14,4 ^c (1,18)	30,2 ^b (1,38)	42,9 ^a (1,11)	<0,001
Exkretion [% d. N-Aufnahme]					
faecal	13 ^b (1,1)	25 ^a (1,1)	11 ^b (1,2)	24 ^a (1,0)	<0,001
renal	45 ^{ab*} (4,1)	49 ^a (3,7)	36 ^{ab} (4,6)	31 ^{b*} (3,6)	0,015
Bilanz [% der N-Aufnahme]	42 ^{ab*} (4,1)	27 ^{b*} (3,7)	53 ^a (4,5)	45 ^a (3,7)	0,002
Verdaulichkeit [%]					
praecaecal	73 ^a (4,9)	65 ^{ab*} (4,9)	74 ^a (5,5)	48 ^{b*} (4,9)	0,006
postileal	52 ^{ab*} (6,1)	28 ^{b*} (6,1)	58 ^a (6,8)	49 ^{ab} (6,1)	0,022
total	87 ^a (1,1)	75 ^b (1,1)	89 ^a (1,2)	76 ^b (1,1)	<0,001

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,05$)
^{*, +} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,1$)

5.2 Versuch Ib

Während der beiden Bilanzphasen traten keine Komplikationen auf. Ein Tier musste während der Vorfütterungsperiode im 2. Durchgang aufgrund einer Verletzung eliminiert werden.

Die mittleren LM am Ende des 1. bzw. 2. DG lagen bei $40,2 \pm 2,6$ bzw. $48,8 \pm 2,9$ kg (Einzeltierwerte: Anhang, Tab A-2). Für den Zeitraum vom Beginn der 1. Bilanzphase bis zum Ende des Versuches ergaben sich tägliche LM-Zunahmen von durchschnittlich 486 ± 73 g. Ein Effekt der Behandlungen auf die Tageszunahmen konnte nicht festgestellt werden.

Die mittleren Aufnahmen an T, OS, P, Ca und N während des Versuches sind in den Tabellen 13 und 14 dargestellt. Drei Tiere nahmen an Einzeltagen ihre Rationen nicht vollständig auf und hinterließen Futterreste in Höhe von durchschnittlich:

1. Durchgang: BDc: 60,8 g T/d (Tier 2),
2. Durchgang: BDp: 65,5 g T/d (Tier 3) und 138,5 g T/d (Tier 6).

Die höchsten Aufnahmen an P, Ca und N wurden, wie bereits für Versuch Ia beschrieben, für die Kontrolle beobachtet. Aufgrund des Verdünnungseffektes der Zulagen waren die Aufnahmen der genannten Nähr- bzw. Mineralstoffe bei gleicher Futtermittelaufnahme in den übrigen Behandlungen entsprechend geringer.

Eine Zusammenstellung der analysierten Gehalte an T, P, Ca, N sowie TiO₂ im Kot der Einzeltiere findet sich im Anhang, Tabelle A-10.

Bei den im folgenden dargestellten Werten für die relative faecale Exkretion handelt es sich nicht um die durch quantitative Sammlung tatsächlich gemessenen relativen Kottauscheidungen, sondern um Werte, die, wie in den übrigen Versuchen, anhand der mittels Markermethode berechneten VQ kalkuliert wurden. Diese Vorgehensweise diente der Sicherstellung der Vergleichbarkeit zwischen beiden Versuchen.

Die nach Gleichung (2) ermittelten quantitativen VQ sollen im Diskussionsteil unter 6.1.2 der Darstellung und näheren Beschreibung unterzogen werden.

Trockensubstanz

Die mittleren T-Gehalte und VQ-T sind in Tabelle 13 dargestellt. Pektin bewirkte eine signifikante Abnahme des T-Gehaltes im Kot um 5%-Punkte.

Die Verdaulichkeit der T war sowohl von der Cellulose- als auch Pektinzulage beeinflusst. Während Pektin die VQ-T um 4%-Punkte verminderte, führte Cellulose zu einer Abnahme um 18%-Punkte. Die Einzeltierdaten zur T finden sich im Anhang, Tab. A-11.

Tabelle 13. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Verdaulichkeit der T und OS (LSmeans, Std.f.) in Versuch Ib

	BD	BDc	BDs	BDp	p
<i>Trockensubstanz</i>					
Aufnahme [g/d]	1.174	1.148	1.173	1.146	
T-Gehalt im Kot [%]	34 ^a (1,4)	30 ^{ab} (1,5)	35 ^a (1,4)	29 ^b (1,4)	<0,012
tt Verdaulichkeit [%]	88 ^b (0,8)	70 ^d (0,9)	91 ^a (0,8)	84 ^c (0,8)	<0,001
<i>Organische Substanz</i>					
Aufnahme [g/d]	1.115	1.098	1.129	1.091	
tt Verdaulichkeit [%]	90 ^a (0,8)	72 ^c (0,8)	93 ^a (0,8)	86 ^b (0,8)	<0,001

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

^{*, +} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

Organische Substanz

Es waren die gleichen Effekte auf die VQ der OS zu beobachten, wie sie bereits für die VQ der T beschrieben wurden (Tabelle 13). Gegenüber der VQ-T lagen die VQ-OS einheitlich um 2%-Punkte höher. Im Anhang, Tab. A-12 sind die Einzeltierdaten dazu dargestellt.

Phosphor

In Tabelle 14 sind die P-Konzentrationen im Kot dargestellt. Es zeigte sich ein Effekt für Pektin sowie Cellulose. Beide Substrate führten zu einer Abnahme der P-Konzentration, wobei der mit 6,7 g/kg T signifikant geringste Wert bei Zulage von Cellulose ermittelt wurde.

Die mittlere VQ für Phosphor lag für die Kontrolle, sowie für die BDc und BDs in einem vergleichbaren Bereich von 27 bis 30%. Die Zulage von Pektin verursachte eine signifikant verminderte Verdaulichkeit des P gegenüber der Kontrolle um mehr als die Hälfte.

Die relative P-Ausscheidung mit dem Harn war mit etwa 1% der P-Aufnahme auf sehr geringem Niveau und blieb von den KH-Substraten unbeeinflusst. Die Einzeltierdaten zur Aufnahme, Ausscheidung, Bilanz und Verdaulichkeit des P sind dem Anhang, Tab. A-13 zu entnehmen.

Calcium

Der Gehalt an Ca im Kot war bei Zulage von Cellulose signifikant um 18%-Punkte vermindert, während er von den übrigen KH-Substraten nahezu unberührt blieb (Tab. 14).

Auf die Verdaulichkeit des Calciums war ein negativer Effekt des Pektins festzustellen. Entsprechend war in der BDp ein signifikanter Anstieg der faecalen Ca-Exkretion zu beobachten. Die Ergänzung mit Cellulose verminderte die Ca-Verdaulichkeit gegenüber der Kontrolle numerisch. Die höchste VQ für Ca wurde bei Supplementation mit Stärke beobachtet. Sie lagen im Mittel bei 65% und somit tendenziell höher als in der BDc.

Im Mittel aller Behandlungen wurden etwa 17% des aufgenommenen Calciums mit dem Harn ausgeschieden. Auch hier zeigten sich keine Effekte der Zulagen. Die Ca-Bilanz war dementsprechend nur von der Pektinzulage negativ beeinflusst. Die Einzeltierdaten sind im Anhang, Tab. A-14 dargestellt.

Stickstoff

Während die Cellulosezulage eine Reduzierung der N-Konzentration im Kot verursachte, war bei Zulage von Pektin eine Erhöhung des N-Gehaltes im Kot zu beobachten. Stärke hatte keinen Einfluss auf die N-Konzentration (Tabelle 14).

Die mittlere Stickstoff-Verdaulichkeit lag für die Kontrolle sowie für die Stärkesupplementierte Behandlung bei 85 bzw. 86%. Wurde der BD Cellulose zugelegt, konnte eine Absenkung der Verdaulichkeit beobachtet werden, die allerdings nicht signifikant war. Eine Zulage von Pektin hingegen verminderte die N-Verdaulichkeit gegenüber der Kontrolle signifikant um 19%-Punkte. Entsprechend war in beiden Behandlungen ein numerischer (BDc) bzw. signifikanter (BDp) Anstieg der faecalen N-Exkretion festzustellen.

Die höchste mittlere renale Exkretion von N konnte mit 45% der N-Aufnahme für die Kontrolle beobachtet werden. Alle KH-Substrate bewirkten eine signifikante Abnahme der

renalen N-Exkretion, wobei mit 29% der N-Aufnahme die N-Exkretion über die Nieren am geringsten war, wenn den Tieren Pektin vorgelegt wurde.

Aufgrund der eingeschränkten renalen N-Exkretion war die N-Bilanz bei Zulage von Stärke gegenüber der Kontrolle signifikant erhöht. Die übrigen Substrate zeigten diesbezüglich keinen Effekt. Die Darstellung der Einzeltierdaten ist dem Anhang, Tab. A-15 zu entnehmen.

Tabelle 14. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen (LSmeans, Stdf.) von Phosphor, Calcium und Stickstoff in Versuch Ib

	BD	BDc	BDs	BDp	p
<i>Phosphor</i>					
Aufnahme [g/d]	3,8	3,1	2,9	3,0	
P-Konzentration im Kot [g/kg T]	19 ^a (0,7)	6,7 ^c (0,7)	19 ^a (0,7)	14 ^b (0,16)	<0,001
faecale Exkretion [% d. P-Aufnahme]	71 ^b (2,9)	73 ^b (3,1)	70 ^b (2,9)	86 ^a (2,9)	0,002
renale Exkretion [% d. P-Aufnahme]	0,7 (0,16)	0,8 (0,17)	1,0 (0,16)	0,9 (0,16)	0,763
tt VQ [%]	29 ^a (2,9)	27 ^a (3,1)	30 ^a (2,9)	14 ^b (2,9)	0,002
Bilanz [% der P-Aufnahme]	28 ^a (2,9)	27 ^a (3,1)	29 ^a (2,9)	13 ^b (2,9)	0,002
<i>Calcium</i>					
Aufnahme [g/d]	10,6	9,0	8,0	8,2	
Ca-Konzentration im Kot [g/kg T]	30 ^a (1,5)	12 ^b (1,6)	27 ^a (1,5)	28 ^a (1,5)	<0,001
faecale Exkretion [% d. Ca-Aufnahme]	39 ^b (2,8)	46 ^{b*} (3,0)	35 ^{b*} (2,8)	60 ^a (2,8)	<0,001
renale Exkretion [% d. Ca-Aufnahme]	17 (1,3)	17 (1,4)	18 (1,3)	16 (1,3)	0,771
tt VQ [%]	61 ^a (2,8)	54 ^{a*} (3,0)	65 ^{a*} (2,8)	40 ^b (2,8)	<0,001
Bilanz [% der Ca-Aufnahme]	44 ^{ab} (2,5)	37 ^b (2,7)	47 ^a (2,5)	24 ^c (2,5)	<0,001
<i>Stickstoff</i>					
Aufnahme [g/d]	39	32	29	29	
N-Konzentration im Kot [g/kg T]	40 ^b (1,6)	22 ^c (1,7)	40 ^b (1,6)	51 ^a (1,6)	<0,001
faecale Exkretion [% d. N-Aufnahme]	15 ^b (2,4)	23 ^{b*} (2,6)	14 ^{b*} (2,4)	34 ^a (2,4)	<0,001
renale Exkretion [% d. N-Aufnahme]	45 ^a (2,1)	35 ^b (2,3)	35 ^b (2,1)	29 ^b (2,1)	<0,001
tt VQ [%]	85 ^a (2,4)	77 ^{a*} (2,6)	86 ^{a*} (2,4)	66 ^b (2,4)	<0,001
Bilanz [% der N-Aufnahme]	40 ^b (2,3)	42 ^{ab*} (2,5)	51 ^{a*} (2,3)	38 ^b (2,3)	0,005

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

* gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

5.3 Versuch II

Während der Versuchsdurchführung traten nur geringfügige Probleme auf, die unter 6.1.1 näher beschrieben werden. Am Versuchsende erreichten die Tiere eine Lebendmasse von durchschnittlich $53,0 \pm 2,6$ kg (Anhang, Tab. A-2). Futterreste fielen nicht an.

Organische Substanz

Die mittlere Aufnahme an Organischer Substanz ist Tabelle 15 zu entnehmen. In den beiden Behandlungen, in denen Pektin appliziert wurde, ist die Menge der aus dem Pektin stammenden OS in Höhe von 53 g/d der Aufnahme zugerechnet worden.

Es konnten zwischen den einzelnen Behandlungen keine Unterschiede in der pc Verdaulichkeit der OS festgestellt werden. Im Mittel wurden 74% der OS im pc Darmabschnitt verdaut.

Von der am terminalen Ileum anflutenden Menge an OS, zuzüglich des applizierten Pektins, wurden im postilealen Darmbereich der Kontrolltiere 63% verdaut. Es zeigte sich, dass sowohl die Pektinapplikation als auch das P-Versorgungsniveau einen Einfluss auf die pi Verdaulichkeit der OS ausübten.

Wurde den P-unterversorgten Tieren Pektin ins terminale Ileum appliziert, kam es zu einem tendenziellen Anstieg der pi OS-Verdaulichkeit. Ein signifikanter Effekt konnte bei Zulage des MCP beobachtet werden. Die MCP-Zulage führte zu einer Verminderung der pi Verdaulichkeit der OS auf 58%. Wurde allerdings Pektin intracaecal verabreicht, war dieser Effekt nicht mehr feststellbar.

Bei der Betrachtung der OS-Verdaulichkeit im Gesamttrakt zeigte sich ein signifikanter Einfluss der P-Versorgung, wobei die tt OS-Verdaulichkeit bei Zulage von MCP reduziert war. Die Verabreichung von Pektin hatte keinen Effekt auf die totale Verdaulichkeit der OS. Dem Anhang, Tab A-17 sind die Einzeltierdaten zu entnehmen.

Tabelle 15. Aufnahme (MW), relative faecale Exkretion und Verdaulichkeit der Organischen Substanz (LSmeans) in Versuch II

	ANOVA							
	BD-	BD+	MCP-	MCP+	Stdf.	Pek	P	Pek×P
Aufnahme [g/d]	928	981 ¹⁾	920	973 ¹⁾				
Exkretion [% d. OS-Aufn.]								
faecal	9,5 ^c	9,6 ^{bc*}	10,7 ^{ab*}	10,8 ^a	0,4	0,887	0,012	0,996
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	74	74	74	74	0,6	0,542	0,781	0,567
postileal	63 ^{a+}	68 ^{a*+}	58 ^b	64 ^{a*}	1,4	0,008	0,014	0,568
total	91 ^a	90 ^{ab*}	89 ^{bc*}	89 ^c	0,4	0,887	0,012	0,996

¹⁾+53 g OS/d aus appliziertem Pektin

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,05$)

^{*, +} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,1$)

Phosphor

Die mittlere Aufnahme an Phosphor war in den beiden MCP-supplementierten Behandlungen um nahezu 4 g höher (Tabelle 16). Der P-Eintrag ins terminale Ileum mit der Pektingabe betrug in beiden Durchgängen 0,04 g.

Die Zulage von MCP bewirkte signifikant höhere P-Konzentrationen im Ileumchymus und im Kot der Schweine, wobei Pektin die P-Konzentration im Kot in Verbindung mit MCP tendenziell weiter erhöhte.

Im Bezug auf die praecaecale Verdaulichkeit des Phosphors zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Einfluss der Zulage mineralischen Phosphats. Die pcVQ-P betrug im Mittel beider MCP-Behandlungen 52% und lag somit um etwa 22%-Punkte über dem Wert für die Kontrollration. Ein Einfluss des Pektins auf die VQ-P konnte praecaecal nicht festgestellt werden. Im postilealen Darmabschnitt wurden für die beiden MCP-Behandlungen negative mittlere VQ für P ermittelt, die mit -9,4% besonders gering waren, wenn Pektin intracaecal verabreicht wurde. Für die beiden Behandlungen mit marginaler P-Versorgung konnten hingegen schwach positive Werte festgestellt werden. Hinsichtlich des Einflusses der P-Versorgung war jedoch lediglich ein Trend zu beobachten, wobei die P-unterversorgten Tiere tendenziell mehr P im Dickdarm verdauten. Ein Effekt des Pektins konnte nicht nachgewiesen werden. Die mittlere P-Verdaulichkeit im Gesamttrakt lag in beiden P-Mangelbehandlungen mit etwa 30% auf ähnlichem Niveau wie bereits praecaecal, wobei eine marginale Steigerung zu beobachten war. Im Gegensatz dazu wurde in den beiden MCP-Behandlungen im Gesamttrakt etwas weniger P verdaut als praecaecal. Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Versorgung mit mineralischem P auf die tt Verdaulichkeit des P, wobei diese durch die MCP-Zulage gegenüber der Kontrolle um etwa 18%-Punkte erhöht war. Auch auf totaler Ebene war die P-Verdaulichkeit durch die Pektinapplikation nicht signifikant beeinflusst. Entsprechend des Effekts des MCP auf die ttVQ des P wurde in diesen Behandlungen relativ zur P-Aufnahme weniger P mit dem Kot ausgeschieden. In absoluten Zahlen ausgedrückt war die faecale P-Exkretion bei Zulage von MCP mit durchschnittlich 3,7 g/d allerdings deutlich höher als in den beiden BD-Behandlungen, in denen im Mittel 2,3 g P täglich faecal ausgeschieden wurden.

Die mittlere relative renale P-Ausscheidung war bei den P-unterversorgten Tieren mit weniger als 1% der P-Aufnahme gering. Pektin hatte in diesen Behandlungen keinen Einfluss. Wurde allerdings MCP zugelegt, war ein signifikanter Anstieg der renalen P-Exkretion auf 4,6% relativ zur P-Aufnahme zu beobachten. Absolut ausgedrückt stellte dies eine Erhöhung der täglichen N-Ausscheidung mit dem Harn von 25 mg in den BD auf 330 mg in der MCP- dar. Dieser Effekt des MCP zeigte sich jedoch nur, wenn kein Pektin appliziert wurde. Erhielten die Tiere der MCP-Behandlung eine intracaecale Pektininfusion, wurde der Effekt des MCP vollständig aufgehoben. Dementsprechend lag die renale P-Ausscheidung in der Behandlung MCP+ auf dem Niveau der P-Mangelbehandlungen.

Die P-Bilanzen waren durch die Zulage von MCP signifikant erhöht, wobei Pektin hierauf keinen Einfluss hatte. Alle Einzeltierdaten für die Aufnahme, Ausscheidung, Verdaulichkeit sowie die Bilanz von P sind im Anhang, Tab. A-18 dargestellt.

Tabelle 16. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Phosphor (LSmeans) in Versuch II

	ANOVA							
	BD-	BD+	MCP-	MCP+	Stdf.	Pek	P	Pek×P
Aufnahme [g/d]	3,18	3,22 ¹⁾	7,12	7,16 ¹⁾				
P-Konzentration [g/kg T]								
Ileumchymus	8,10 ^b	8,25 ^b	12,4 ^{a*}	11,8 ^{a*}	0,2	0,319	<0,001	0,122
Kot	19,5 ^b	19,4 ^b	27,5 ^a	27,5 ^a	1,2	0,976	<0,001	0,976
Exkretion [% d. P-Aufn.]								
faecal	70 ^a	70 ^a	51 ^b	52 ^b	3,1	0,700	<0,001	0,963
renal	0,8 ^b	0,8 ^b	4,6 ^a	0,7 ^b	0,3	<0,001	<0,001	<0,001
Bilanz [% d. P-Aufnahme]	30 ^b	29 ^b	45 ^a	47 ^a	3,1	0,813	<0,001	0,577
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	30 ^b	27 ^b	51 ^a	53 ^a	1,7	0,841	<0,001	0,141
postileal	0,5	3,2 [*]	-2,9	-9,4 [*]	4,3	0,664	0,086	0,308
total	31 ^b	29 ^b	49 ^a	48 ^a	3,2	0,673	<0,001	0,995

¹⁾ +0,04 g P/d aus appliziertem Pektin

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

* gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

Inositolphosphate und Phytatabbau

Die Verteilung der einzelnen Inositolphosphate im Futter, sowie im Ileumchymus und Kot der Tiere ist in Abb. 6 dargestellt. Im Futter der beiden Varianten lagen IP zu etwa 86% als Phytat und zu 15% als IP₅ vor.

Das IP-Muster im Ileumchymus war weder von MCP noch von Pektin beeinflusst. Am terminalen Ileum der Tiere waren einheitlich kaum IP in geringeren Phosphorylierungsstufen als IP₅ (14%) zu finden waren. Der Anteil der IP₄ lag im Mittel bei lediglich 4,2%.

Für den Kot zeigte sich ein differenzierteres Muster. Während in der BD- nur IP₆ und IP₅ nachgewiesen werden konnten, wurden bei Zulage von MCP zudem geringe Anteile an IP₄ (5,9%) und IP₃ (1,6%) gefunden. Weiterhin wird deutlich, dass die Pektininfusion in der BD+ zu einem höheren Anteil IP₅ (15,8%) führte. Die IP-Konzentration im Chymus und Kot der Einzeltiere sind im Anhang, Tab. A-19 zu finden.

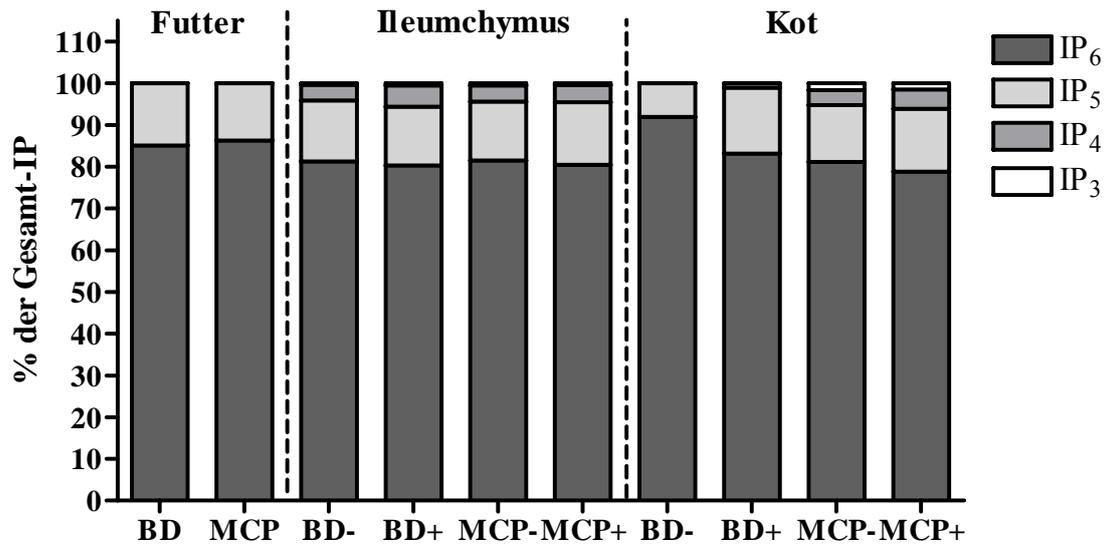


Abbildung 6. IP_x-Muster im Futter, Chymus und Kot in Versuch II (MW)

In Tabelle 17 sind die mittleren Werte für die Phytataufnahme sowie für den Phytatabbau in den einzelnen Darmbereichen dargestellt (Einzeltierdaten im Anhang, Tab. A-20). Alle Werte sind von hohen Standardfehlern begleitet. Praecaecal war kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Behandlungen sichtbar. Während die intracaecale Applikation von Pektin bei den P-unterversorgten Tieren offenbar eine leichte Steigerung des Phytatabbaus verursachte, bewirkte sie in Verbindung mit der MCP-Zulage hingegen offenbar eine Abnahme der Werte im Mittel um 7 %-Punkte. Die Zulage von MCP führte in der pektinfreien Behandlung zu einem leichten Anstieg des Phytatabbaus gegenüber der Kontrolle. Postileal anflutendes Phytat konnte von den P-unterversorgten Tieren im Dickdarm nahezu vollständig abgebaut werden. Im Gegensatz dazu verursachte die Zulage von mineralischem Phosphat eine hochsignifikante Reduzierung des π Phytatabbaus, wobei dieser Effekt tendenziell durch appliziertes Pektin um 18%-Punkte abgeschwächt wurde. Für den Gesamttrakt wurden für beide BD-Behandlungen identische Werte wie postileal ermittelt. Insgesamt wurden in diesen Behandlungen 98 bzw. 97% des aufgenommenen Phytats abgebaut. In Analogie zu den π Werten wurden für beide MCP-Behandlungen signifikant verminderte Abbauraten für Phytat ermittelt. Es wurden in diesen Behandlungen insgesamt 53 bzw. 62% des aufgenommenen Phytats abgebaut, wobei die Pektingabe einen um 9%-Punkte höheren Abbau zur Folge hatte.

Tabelle 17. Aufnahme (MW) und Abbau (LSmeans) von Phytat in Versuch II

	ANOVA							
	BD-	BD+	MCP-	MCP+	Stdf.	Pek	P	Pek×P
Aufnahme [g/d]	5,52	5,52	5,47	5,47				
Abbau [%]								
praecaecal	13	17	20	13	6,3	0,914	0,922	0,418
postileal	98 ^a	97 ^a	41 ^{b*}	59 ^{b*}	6,3	0,209	<0,001	0,143
total	98 ^a	97 ^a	53 ^b	62 ^b	6,2	0,542	<0,001	0,449

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,05$)

* gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,1$)

Calcium

Die Tiere nahmen bei Zulage von MCP durchschnittlich 3,5 g mehr Calcium auf als die Tiere, denen die Basaldiät vorgelegt wurde. Mit der intracaecalen Pektingabe wurden weitere 0,09 g Ca durch die T-Kanüle verabreicht (Tabelle 18).

Die Zulage von MCP war verbunden mit einer signifikanten Erhöhung der Ca-Konzentration sowohl im Ileumchymus als auch im Kot der Tiere. Die Applikation von Pektin blieb ohne Auswirkungen.

Es zeigte sich ein Effekt der MCP-Zulage gegenüber der Kontrolle in Form einer Senkung der mittleren pc Ca-Verdaulichkeit, der allerdings nur auftrat, wenn kein Pektin appliziert wurde. In der Behandlung MCP+ lag der Wert für die pc Ca-Verdaulichkeit mit 53% auf einem der beiden BD-Behandlungen vergleichbarem Niveau. Während die Pektinapplikation bei P-Unterversorgung scheinbar eher zu einer Senkung der mittleren Ca-Verdaulichkeit führte, bewirkte sie bei Zulage von MCP tendenziell eine Erhöhung der VQ. Es trat eine Wechselwirkung zwischen der P-Versorgung und der intracaecalen Pektingabe zutage.

Im postilealen Darmabschnitt lagen die VQ für die Kontrolle sowie für die Behandlung MCP+ im negativen Bereich. Für die beiden übrigen Behandlungen konnten jedoch positive Werte ermittelt werden. Es waren hohe tierindividuelle Schwankungen zu beobachten. Weder ein gerichteter Einfluss der P-Versorgung noch der Pektingabe konnte nachgewiesen werden.

Die VQ-Ca im Gesamttrakt lagen leicht über (BD-, BD+, MCP-) bzw. unter (MCP+) dem Niveau der pc Werte. Es waren keine signifikanten Effekte der P-Versorgung oder des Pektins feststellbar. In der Tendenz waren die ttVQ-Ca gegenüber der Kontrolle durch die MCP-Zulage vermindert. Somit wurde in diesen Behandlungen tendenziell mehr Ca faecal ausgeschieden.

Renal wurde bei Zulage von MCP relativ zur Ca-Aufnahme weniger Ca ausgeschieden. Diese Differenz war allerdings nur gegenüber der BD+ statistisch gesichert, da die Pektininfusion in dieser Behandlung einen numerischen Anstieg der renalen Ca-Exkretion gegenüber der BD- bewirkte. In Verbindung mit der MCP-Zulage zeigte sich für Pektin kein Einfluss im Hinblick auf die Ausscheidungen von Ca.

Die Ca-Bilanz blieb unbeeinflusst von der P-Versorgung sowie der Pektingabe. Es waren bei Infusion von Pektin lediglich numerische Differenzen erkennbar, die aber ungerichtet waren. Die den Mittelwerten (bzw. LSmeans) zugrunde liegenden Einzeltierdaten sind im Anhang, Tab. A-19 zu finden.

Tabelle 18. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Calcium (LSmeans) in Versuch II

	ANOVA							
	BD-	BD+	MCP-	MCP+	Stdf.	Pek	P	Pek×P
Aufnahme [g/d]	7,62	7,71 ¹⁾	11,1	11,2 ¹⁾				
Ca-Konzentration [g/kg T]								
Ileumchymus	12,5 ^b	13,9 ^b	21,7 ^a	19,4 ^a	1,2	0,714	<0,001	0,086
Kot	29,5 ^b	31,0 ^b	44,8 ^a	43,1 ^a	2,6	0,962	<0,001	0,538
Exkretion [% d. Ca-Aufn.]								
faecal	43 ^{*+}	46	52 ⁺	51 [*]	3,1	0,718	0,033	0,531
renal	11 ^{ab}	18 ^a	4,7 ^b	3,8 ^b	3,5	0,453	0,019	0,306
Bilanz [% d. Ca-Aufn.]	46	37	43	45	3,9	0,337	0,532	0,170
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	56 ^a	51 ^{ab}	45 ^{b*}	53 ^{ab*}	3,0	0,612	0,067	0,021
postileal	-5,1	7,2	4,9	-1,4	6,0	0,627	0,921	0,150
total	57 ^{*+}	54	48 ⁺	49 [*]	3,1	0,699	0,035	0,515

¹⁾+0,09 g Ca/d aus appliziertem Pektin

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

^{*, +} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

Stickstoff

Die mittlere Aufnahme an Stickstoff mit dem Futter ist in Tabelle 19 dargestellt und betrug in allen Behandlungen etwa 31 g. Mit der Pektingabe gelangten weitere 0,1 g N in das Caecum der Tiere.

Die N-Konzentration im Ileumchymus blieb von der Pektingabe unberührt und zeigte bei Zulage von MCP eine numerische Abnahme. Im Kot war der N-Gehalt signifikant durch die MCP-Zulage vermindert. Pektin verursachte in Verbindung mit einer hohen P-Versorgung einen tendenziellen Anstieg der N-Konzentration im Kot.

Die pc Verdaulichkeit des N lag für alle Behandlungen auf einem vergleichbaren Niveau, wobei bei Zulage von MCP geringfügig mehr N pc verdaut wurde. Diese Differenz war jedoch marginal und nicht statistisch abzusichern. Auf pi Ebene zeigte sich ein Einfluss sowohl des Pektins als auch der P-Versorgung. Die Zulage von mineralischem Phosphat bewirkte eine Reduzierung der mittleren N-Verdaulichkeit gegenüber der Kontrolle. Auch die Applikation von Pektin verursachte eine Verminderung der VQ-N. Die negative Wirkung zeigte sich in der MCP+ mit 37% am deutlichsten. Im Gesamttrakt lagen die mittleren VQ für N bei Verabreichung der Basaldiät sowie der MCP-Diät bei 86%. Auch auf totaler Ebene des Verdauungstraktes war ein Einfluss des Pektins zu beobachten, der aber nur bei Zulage von MCP signifikant war. Die Einzeltierdaten zu den Umsetzungen von N sind im Anhang, Tab. A-22 dargestellt.

Tabelle 19. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Stickstoff (LSmeans) in Versuch II

	ANOVA							
	BD-	BD+	MCP-	MCP+	Stdf.	Pek	P	Pek×P
Aufnahme [g/d]	31,3	31,4 ¹⁾	31,2	31,3 ¹⁾				
N-Konzentration [g/kg T]								
Ileumchymus	31,1	31,4	29,1	29,5	1,2	0,757	0,081	0,919
Kot	39,2 ^a	39,9 ^a	34,9 ^{b*}	38,4 ^{ab*}	1,4	0,126	0,029	0,212
Exkretion [% d. N-Aufn.]								
faecal	14 ^b	15 ^b	14 ^b	17 ^a	0,8	0,024	0,081	0,175
renal	45 ^a	42 ^{ab}	35 ^b	36 ^b	2,6	0,671	0,013	0,415
Bilanz [% d. N-Aufnahme]	41 ^b	43 ^{ab*}	51 ^{a*}	47 ^{ab}	2,7	0,846	0,021	0,201
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	72	72	74	73	1,0	0,559	0,078	0,580
postileal	50 ^a	46 ^{ab}	45 ^b	37 ^c	2,1	0,007	0,001	0,101
total	86 ^a	85 ^{ab*}	86 ^a	83 ^{b*}	0,8	0,026	0,095	0,216

¹⁾+0,1 g N/d aus appliziertem Pektin
^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)
* gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

5.4 Versuch III

Abgesehen von geringfügigen Problemen bei der Pektininfusion, auf die unter 6.1.1 näher eingegangen werden soll, verlief der Versuch ohne Komplikationen. Die mittlere LM am Ende des Versuches lag bei $52,8 \pm 1,7$ kg (Einzeltierdaten im Anhang, Tab. A-2). Futterreste wurden nicht hinterlassen.

Die Analyse der Phytaseaktivität ergab im supplementierten Futter für die PHY-Behandlungen einen Wert von 910 U/kg. Das entspricht in etwa dem erwarteten Wert von 1.000 U/kg Futter. Die Phytaseaktivität in der Basaldiät lag unter 100 U/kg.

Organische Substanz

Tabelle 20 zeigt die mittleren Aufnahmen an OS in den einzelnen Behandlungen, die, wie für Versuch II beschrieben, in den Behandlungen BD+ und PHY+ den Eintrag an OS mit der Pektinapplikation in Höhe von 53 g einschließen.

Im praecaecalen Darmabschnitt war ein signifikanter Einfluss der P-Versorgung durch die Supplementation mit Phytase auf die Verdaulichkeit der OS festzustellen, wobei Phytase eine Abnahme der Verdaulichkeit um 5 bzw. 6%-Punkte bewirkte. Die Applikation von Pektin hatte im pc Darmbereich keinen Einfluss. Ein umgekehrtes Bild zeigte sich im pi Darmbereich. Dort verursachte die Zulage von Phytase höhere VQ. Besonders deutlich war der Effekt in Kombination mit der intracaecalen Pektingabe, wobei der mittlere VQ für die OS in der Behandlung PHY+ 12%-Punkte höher lag als in der Kontrolle, in der lediglich 58% der anflutenden OS im pi Darmabschnitt verdaut werden konnten. Auch in den BD-Behandlungen führte Pektin zu einem Anstieg der Verdaulichkeit der OS auf 63%. Auf Ebene des Gesamtraktes waren ausgeglichene VQ zu beobachten. Es zeigte sich kein

Effekt des applizierten Pektins. Alle Einzeltierdaten zur OS befinden sich im Anhang, Tab. A-24.

Tabelle 20. Aufnahme (MW), relative faecale Exkretion und Verdaulichkeit (LSmeans) der Organischen Substanz in Versuch III

	ANOVA							
	BD-	BD+	PHY-	PHY+	Stdf.	Pek	Phy	Pek×Phy
Aufnahme [g/d]	929	982 ¹⁾	932	985 ¹⁾				
Exkretion [% d. OS-Aufn.]								
faecal	9,3	9,8	9,5	9,7	0,2	0,159	0,676	0,477
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	78 ^a	78 ^a	73 ^b	72 ^b	1,2	0,553	<0,001	0,527
postileal	58 ^{b+}	63 ^{ab*}	64 ^{ab+}	70 ^{a*}	2,4	0,065	0,021	0,967
total	91	90	91	90	0,2	0,159	0,676	0,477

¹⁾+53 g OS/d aus appliziertem Pektin

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

^{*, +} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

Phosphor

In Tabelle 21 sind die mittleren Aufnahmen sowie die Exkretionen und Verdaulichkeitsquotienten für Phosphor dargestellt. Die mittlere P-Aufnahme lag in den beiden PHY-Behandlungen geringfügig über dem Wert der BD-Behandlungen.

Es war eine signifikante Reduzierung der P-Konzentrationen im Ileumchymus um mehr als 50% zu beobachten, wenn der Basaldiät Phytase zugesetzt wurde. Die P-Konzentration im Kot war ebenfalls durch Phytase signifikant vermindert, jedoch in geringerem Ausmaß. Während für Pektin kein Einfluss auf die P-Konzentration im Ileumchymus nachgewiesen werden konnte, war der P-Gehalt im Kot der Tiere in der phytasefreien Behandlung durch die Pektingabe signifikant reduziert.

Die Phytase-Supplementation bewirkte eine hochsignifikante Erhöhung der P-Verdaulichkeit im praecaecalen Darmabschnitt von 33 auf 62%, während die VQ vom Pektin unbeeinflusst blieb. Postileal anflutender P wurde von den Tieren der Kontrolle zu -3,1% verdaut, was eine Sekretion von P ins Darmlumen andeutet. Phytase führte postileal zu einer Verminderung der P-Verdaulichkeit auf -11%, wobei die Pektininfusion die negative Wirkung der Phytase im Dickdarm teilweise wieder aufgehoben hat. Auch in der BD war die piVQ-P bei Infusion von Pektin numerisch erhöht. Im Vergleich zu den pektinfreien Behandlungen wurden in den Behandlungen BD+ und PHY+ 5,3 bzw. 2,1 Einheiten mehr P verdaut. Der positive Effekt der Phytasesupplementation auf die pcVQ-P spiegelte sich auf Ebene des gesamten Verdauungstraktes wieder. Phytase führte zu einem Anstieg der ttVQ-P um 27%-Punkte. Entsprechend war eine signifikante Reduzierung der P-Exkretion mit dem Kot von 69 auf 42% festzustellen, was einer absoluten Verminderung um etwa 0,8 g P/d entspricht.

Die Pektingabe hatte keinen Einfluss auf die ttVQ-P bzw. auf die faecalen P-Ausscheidungen.

Supplementierte Phytase bewirkte eine numerische Abnahme der relativen renalen P-Exkretion, wobei dieser Effekt durch die Pektingabe noch verstärkt wurde. In der Behandlung PHY+ wurde lediglich 0,5% des aufgenommenen P über die Nieren ausgeschieden, wobei die Differenz gegenüber den BD-Behandlungen signifikant war. In Kombination mit der BD war für Pektin kein Einfluss nachweisbar. Entsprechend der verminderten P-Exkretion war eine Erhöhung der P-Bilanz festzustellen, wenn dem Futter Phytase zugelegt wurde. In den PHY-Behandlungen wurden mehr als die Hälfte des aufgenommenen P retiniert. Daten zu den P-Umsetzungen auf Einzeltierbasis sind dem Anhang, Tab. A-25 zu entnehmen.

Tabelle 21. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Phosphor sowie Aufnahme (MW) und Abbau (LSmeans) von Phytat in Versuch III

	ANOVA							
	BD-	BD+	PHY-	PHY+	Stdf.	Pek	Phy	Pek×Phy
Aufnahme [g/d]	2,94	2,98 ¹⁾	2,99	3,03 ¹⁾				
P-Konzentration [g/kg T]								
Ileumchymus	8,28 ^a	8,69 ^a	4,02 ^b	3,72 ^b	0,4	0,900	<0,001	0,345
Kot	18,5 ^{a*}	16,9 ^{a*}	11,8 ^b	11,0 ^b	0,5	0,042	<0,001	0,453
Exkretion [% d. P-Aufn.]								
faecal	69 ^a	68 ^a	42 ^b	41 ^b	2,9	0,809	<0,001	0,977
renal	0,8 ^a	0,8 ^a	0,7 ^{ab}	0,5 ^b	0,1	0,334	0,049	0,260
Bilanz [% d. P-Aufn.]	31 ^b	31 ^b	57 ^a	58 ^a	2,9	0,788	<0,001	0,950
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	33 ^b	31 ^b	62 ^a	63 ^a	2,1	0,797	<0,001	0,400
postileal	-3,1	2,2 [*]	-11 [*]	-8,9	4,4	0,406	0,049	0,743
total	31 ^b	32 ^b	58 ^a	59 ^a	2,9	0,809	<0,001	0,977
Phytataufnahme [g/d]	5,48	5,48	5,63	5,63				
pc Phytatabbau [%]	50 ^b	47 ^b	88 ^a	52 ^b	7,4	0,024	0,022	0,070

¹⁾+0,04 g P/d aus appliziertem Pektin

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,05$)

^{*, +} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,1$)

Inositolphosphate und Phytatabbau

Die Verteilung der einzelnen Inositolphosphate im Futter und im Ileumchymus ist in Abb. 7 dargestellt. Der Anteil an Phytat im Futter lag in beiden Rationen bei 85%. Den übrigen Anteil (15%) machte IP₅ aus. IP_{<5} konnten im Futter nicht nachgewiesen werden. Auch am IP_x-Muster des Ileumchymus hatte Phytat den höchsten Anteil mit Ausnahme der Behandlung PHY-, in der Phytat lediglich einen Anteil von 45% ausmachte und IP₅₋₃ zu etwa gleichen Anteilen vertreten waren. In Verbindung mit Pektin wurde wiederum deutlich geringere Anteile IP₄ (13%) und IP₃ (4,4%) gefunden. Generell bewirkte Phytase eine stärkere Differenzierung des IP_x-Musters im Vergleich zu den BD-Behandlungen. Die IP-Konzentrationen im Chymus der Einzeltiere sind im Anhang, Tab. A-26 dargestellt.

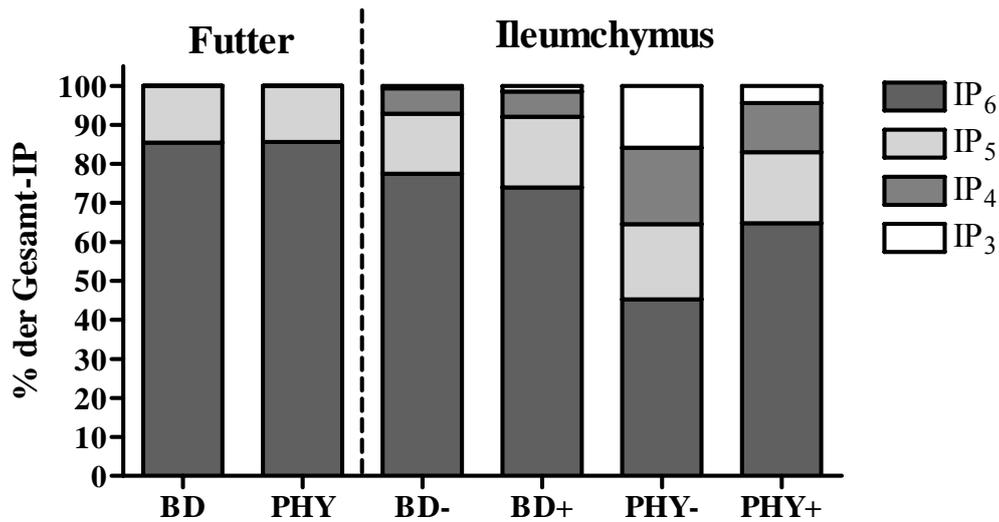


Abbildung 7. IP_x-Muster im Futter und Chymus in Versuch III

Die Mittelwerte für die Aufnahme und den Abbau von Phytat sind ebenfalls in Tabelle 21 dargestellt (Einzeltierdaten im Anhang, Tab. A-26). Für den Abbau des Phytats im pc Darmabschnitt wurde für die Tiere, denen die BD vorgelegt wurde, ein mittlerer Wert von 50% ermittelt. Wurde den Tieren Pektin injiziert, konnte eine geringfügige Abnahme des Phytatabbaus um 3%-Punkte festgestellt werden. Die Supplementation mit Phytase bewirkte eine signifikante Steigerung des pc Phytatabbaus auf 88%, allerdings war dieser Effekt nur bei den Tieren zu beobachten, denen kein Pektin appliziert wurde. Bei diesen Tieren wurden praecaecal durchschnittlich nur 52% des Phytats abgebaut, was etwa dem Niveau der Kontrolle entspricht. Der positive Effekt der Phytase auf den Abbau von Phytat wurde durch die Pektingabe vollständig aufgehoben.

Calcium

Aufgrund der Differenz im Ca-Gehalt zwischen den Behandlungen BD und PHY in Höhe von 0,5 g/kg T war die mittlere Ca-Aufnahme mit der Basaldiät um 0,52 g geringer als bei Verabreichung der Phytase-supplementierten Diät (Tabelle 22).

Die Supplementation mit Phytase bewirkte eine signifikante Abnahme der Ca-Konzentration im Ileumchymus, die nicht allein der geringeren Ca-Aufnahme geschuldet war. Pektin verursachte eine Reduzierung der Ca-Konzentration im Chymus, allerdings nur in der Kontrolle. In Verbindung mit Phytase war kein Effekt des Pektins sichtbar.

Im Kot bewirkte Phytase nur in der Tendenz eine Abnahme der Ca-Konzentration. Pektin verursachte zwar auch im Kot eine Verminderung des Ca-Gehalts, diese war allerdings nicht statistisch gesichert.

Im pc Darmabschnitt konnte weder ein Einfluss der Pektinapplikation noch der Phytase-Supplementation beobachtet werden. Es war lediglich eine Tendenz des Pektins in den BD auszumachen, die mit einer Steigerung der Ca-Verdaulichkeit um 8%-Punkte einherging. Wurde den Diäten Phytase zugelegt, war hingegen in Verbindung mit appliziertem Pektin

eine Abnahme der VQ zu beobachten. Mit -19% wurde für die Behandlung BD+ im postilealen Darmbereich der geringste Wert ermittelt. Auch für die Kontrolle war eine scheinbare Nettosekretion von Ca in den Dickdarm festzustellen. Etwas höher lagen dagegen die VQ bei Zulage von Phytase. Auch hier ist aufgrund der extrem hohen tierindividuellen Schwankungen kein Effekt erkennbar. Die Verdaulichkeit des Ca erreichte im gesamten Verdauungstrakt einen mittleren Wert von 60% für die Kontrolle. Trotz der etwas höheren Werte für die übrigen Behandlungen zeigte sich kein Einfluss der Phytasezulage oder der Pektingabe. Somit blieben auch die Ca-Exkretionen mit dem Kot unberührt von beiden Faktoren.

Renal wurde bei Supplementation mit Phytase, gemessen an der Ca-Aufnahme, weniger Ca ausgeschieden. Dieser Unterschied war allerdings nur gegenüber der BD+ signifikant. Es zeigte sich folglich ein Anstieg der Ca-Bilanz in Verbindung mit der Phytasesupplementation. Pektin bewirkte keine statistisch gesicherte Veränderung in Bezug auf die Exkretionen und die Bilanz von Ca. Die Einzeltierwerte zu den beschriebenen Ergebnissen für Ca finden sich im Anhang, Tab. A-27.

Tabelle 22. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Calcium (LSmeans) in Versuch III

	ANOVA							
	BD-	BD+	PHY-	PHY+	Stdf.	Pek	Phy	Pek×Phy
Aufnahme [g/d]	8,71	8,80 ¹⁾	8,19	8,28 ¹⁾				
Ca-Konzentration [g/kg T]								
Ileumchymus	13,9 ^a	11,0 ^{b+}	9,26 ^c	9,75 ^{bc+}	0,5	0,039	<0,001	0,005
Kot	32,0 [*]	27,3	23,8 [*]	25,0	3,0	0,581	<0,106	0,342
Exkretion [% d. Ca-Aufn.]								
faecal	40	38	31	35	4,1	0,840	0,165	0,432
renal	14 ^{ab}	15 ^a	12 ^b	12 ^b	1,1	0,655	0,014	0,426
Bilanz [%]	46 [*]	47 ⁺	57 ⁺⁺	55	3,8	0,804	0,031	0,655
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	62 [*]	70 [*]	68	64	2,9	0,516	0,903	0,059
postileal	-5,9	-19	-1,0	0	14,4	0,694	0,433	0,643
total	60	63	69	65	4,1	0,841	0,166	0,433

¹⁾ +0,09 g Ca/d aus appliziertem Pektin

^{a, b} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,05$)

^{*} gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile ($p \leq 0,1$)

Stickstoff

Wie in Tabelle 23 ersichtlich, war die Aufnahme an Stickstoff in allen Behandlungen nahezu identisch.

Die N-Konzentration im Ileumchymus war weder signifikant von der Phytasezulage noch von der Pektinapplikation beeinflusst. Es zeigte sich lediglich eine Tendenz zwischen den Behandlungen BD+ und PHY+, die auf einen numerischen Unterschied von 3%-Punkten zurückzuführen war. Für den N-Gehalt des Kots konnte in den Behandlungen, in denen keine Pektininfusion vorgenommen wurde, kein Effekt der Phytase nachgewiesen werden.

Wurde neben der Phytasesupplementation auch Pektin appliziert, war eine Abnahme des N-Gehaltes im Kot gegenüber der BD+ zu beobachten. Die Pektingabe verursachte, unabhängig von der Phytasezulage, einen Anstieg der N-Konzentration im Kot.

Auf pc Ebene des Verdauungstraktes war ein negativer Effekt der Phytase erkennbar, der zu einer Abnahme der N-Verdaulichkeit im Vergleich zur BD um 5 bzw. 6%-Punkte führte.

Wurde den Tieren Pektin appliziert, war sowohl in der BD+ als auch in der PHY+ eine geringfügige Verringerung der VQ-N zu beobachten, welche jedoch nicht signifikant war.

Im pi Darmbereich war hingegen ein Anstieg der VQ-N zu beobachten, wenn den Diäten Phytase zugelegt wurde. Signifikanz erreichten diese Differenzen jedoch nur gegenüber der BD+. Auch postileal hat die Verabreichung des Pektins zu einer Abnahme der N-Verdaulichkeit um 10 bzw. 6%-Punkte für die BD+ bzw. PHY+ geführt, die ebenfalls nicht statistisch gesichert war. Für die VQ-N im Gesamtrakt konnte gegenüber der Behandlung BD+ ein Einfluss der Phytase nachgewiesen werden, der sich in einem Anstieg äußerte. Pektin bewirkte unabhängig von der Phytasesupplementation hingegen eine Senkung der ttVQ-N.

Die relative faecale N-Ausscheidung war dementsprechend durch Phytase vermindert, wobei die Pektingabe eine signifikant höhere relative N-Ausscheidung mit dem Kot zur Folge hatte. Die relative N-Exkretion war signifikant (BD– vs. PHY–) bzw. tendenziell (BD– vs. PHY+) vermindert, wenn der Basaldiät Phytase zugelegt wurde. Die intracaecale Pektininfusion zeigte keinen Einfluss auf die N-Exkretion mit dem Harn.

Die N-Bilanz war folglich durch die Phytasesupplementation signifikant erhöht (BD– vs. PHY–). Allerdings führte die Pektininfusion in Verbindung mit Phytase wiederum zu einer numerischen Abnahme der N-Bilanz. Im Anhang, Tab. A-28 sind die Einzeltierdaten zu finden.

Tabelle 23. Aufnahme (MW), Konzentrationen und Umsetzungen von Stickstoff (LSmeans) in Versuch III

	ANOVA							
	BD–	BD+	PHY–	PHY+	Stdf.	Pek	Phy	Pek×Phy
Aufnahme [g/d]	31,0	31,1 ¹⁾	30,7	30,8 ¹⁾				
N-Konzentration [g/kg T]								
Ileumchymus	30,5	32,5*	30,0	29,5*	1,1	0,548	0,125	0,269
Kot	37,2 ^{bc}	42,1 ^a	35,7 ^c	38,8 ^b	1,0	0,024	0,018	0,264
Exkretion [% d. N-Aufn.]								
faecal	13 ^{bc*}	16 ^a	12 ^c	14 ^{b*}	0,6	0,002	0,043	0,324
renal	38 ^{a*}	35 ^{ab}	34 ^b	34 ^{ab*}	1,5	0,347	0,106	0,186
Bilanz [% d. N-Aufnahme]	49 ^b	49 ^b	54 ^a	51 ^{ab}	1,7	0,368	0,040	0,407
Verdaulichkeit [%]								
praecaecal	77 ^a	75 ^{ab*}	72 ^b	71 ^{b*}	1,4	0,356	0,013	0,887
postileal	44 ^{ab*}	34 ^b	56 ^{a*}	50 ^a	4,2	0,103	0,010	0,596
total	87 ^{ab*}	84 ^c	88 ^a	86 ^{b*}	0,6	0,002	0,047	0,288

¹⁾ +0,1 g N/d aus appliziertem Pektin

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,05)

* gleiche Symbole kennzeichnen tendenzielle Unterschiede innerhalb einer Zeile (p≤0,1)

6 Diskussion

6.1 Fehlerbetrachtung

6.1.1 Versuchsspezifische Fehlerquellen

Versuch Ia

Während der Durchführung von Versuch Ia kam es zu massiven Problemen im Zusammenhang mit den T-Kanülen, was ein vorzeitiges Versuchsende zur Folge hatte. Als Ursache dafür ist in erster Linie die Länge des Kanülenfußes zu sehen. Dieser war zu kurz geplant und hatte damit nur unzureichenden Halt unter den Rippenbögen. Durch Bewegung kam es bei den meisten Tieren im Zeitverlauf zu einer Drehung der Kanüle, was dazu führte, dass die Kanülenfüße unter den Rippenbögen hervorrutschten und die Kanüle somit ihre Verankerung verlor. In Folge dessen kam es letztlich während des Versuchs bei sechs Tieren zum Verlust der Kanülen.

Bei vier Tieren konnte eine Nachfistulierung mit einer selbstgefertigten Silikonkanüle unter Narkotisierung des Tieres relativ problemlos vorgenommen werden.

Da die „Ersatzkanülen“ allerdings einen geringeren Tubusdurchmesser hatten als die Originalkanülen, kam es bei den nachfistulierten Tieren zum vermehrten Austritt von Chymus an der Kanülenbasis. Besonders hoch war der Chymusverlust durch die gelartige Konsistenz des Chymus in den Pektin-supplementierten Behandlungen.

Aufgrund der genannten Probleme und der Narkotisierung der Tiere ist überdies nicht auszuschließen, dass es zu einer teils erheblichen Beeinflussung der Verdauungsprozesse gekommen sein kann.

Zwei Tiere mussten vorzeitig euthanasiert werden, da das Einsetzen einer neuen Kanüle aus tiermedizinischer Sicht nicht möglich war. Der erste Tierverlust am Ende des 1. DG konnte durch die Aufstallung eines unfistulierten Reservetieres ausgeglichen werden, was allerdings nur Verdaulichkeitsmessungen auf Ebene des Gesamtraktes zuließ.

Probleme traten weiterhin bei der Sammlung von Chymus vorrangig bei den Tieren auf, denen die cellulosereiche Diät verabreicht wurde. Besonders bei den nachfistulierten Tieren konnte kaum Chymus aus dem engen Kanülentubus gewonnen werden, da die Ausprägung einer festen Chymusphase aus Cellulosepartikeln eine Verstopfung der Kanülen verursachte, die selbst durch häufiges Spülen mit NaCl-Lösung nur schwer beseitigt werden konnte.

Trotz einer Adaptationsphase von 14 Tagen ist überdies ein gewisser Effekt der Vorratung (bzw. evtl. auch der „Vorvorratung“) nicht auszuschließen. Besonders im Fall der BDp aber auch der BDc als Vorratung könnten die Tiere nachhaltig von einem evtl. erhöhten

Darmvolumen im Sinne einer Vergrößerung der absorptiven Darmoberfläche profitiert haben. Als weiterer Aspekt könnte eine evtl. bessere Anpassung der Mikroflora im Dickdarm durch Pektin bzw. Cellulose gesehen werden, wodurch in den Dickdarm einfließende Futterpartikel möglicherweise in höherem Maße fermentiert wurden. Aufgrund der geringen Tierzahl (je DG zwei Tiere/Behandlung) und der damit verbundenen unsicheren Aussage wurde allerdings auf eine Prüfung des Effekts des Versuchsdurchgangs im Rahmen der statistischen Auswertung verzichtet.

Ausschluss von Tieren

Wie unter 4.2.1 bereits angesprochen wurde ein Tier im 2. und 3. Durchgang von der statistischen Auswertung ausgeschlossen. Im 1. DG wurden für dieses Tier aufgrund von Problemen mit der Kanüle nur Daten auf Ebene des Gesamtraktes erhoben. Für ein weiteres Tier musste im 3. DG der gesammelte Harn verworfen werden, da dieser durch austretenden Chymus erheblich kontaminiert war. Somit konnten für dieses Tier keine renalen Ausscheidungen und Bilanzen ermittelt werden. Die Eliminierung von Einzeltierdaten aus der Auswertung bzw. das vorzeitige Ausscheiden von Versuchstieren führte dazu, dass die Anzahl an Wiederholungen zwischen den Behandlungen bzw. zwischen den einzelnen Darmabschnitten innerhalb einer Behandlung variierte (n=4 bis 7).

Versuch Ib

Bei der Durchführung des Versuches traten keine größeren Probleme auf. Ein Tier musste nach dem 1. DG aufgrund einer Fraktur des Hinterbeines, die es sich beim Umstellen aus den Bilanzkäfigen in die Vorstapelboxen zugezogen hatte, eliminiert werden.

Insgesamt drei Tiere hinterließen Futterreste (siehe 5.2), die gesammelt und analysiert wurden. Somit konnte dies bei der Berechnung der quantitativen VQ berücksichtigt werden.

Weitergehende Ausführungen zu Versuch Ib hinsichtlich einer Gegenüberstellung der Marker basierten mit quantitativen Daten folgen unter der Überschrift Methodik der Verdaulichkeitsbestimmung.

Versuche II und III

Insgesamt verliefen beide Versuche ohne Probleme. Es kam lediglich in Verbindung mit der Pektinapplikation zu einem vermehrten Austritt von Chymus an den Kanülen.

Trotz nahezu identischer Zusammensetzung der Basaldiäten in beiden Versuchen (Ausnahme: Ca-Gehalt in BD in Versuch III um 1 g/kg T höher als in Versuch II) wurden für beide Basaldiäten (BD- und BD+) in Versuch III durchweg höhere Verdaulichkeitsquotienten im pc Darmbereich ermittelt. So lag beispielsweise die Verdaulichkeit der OS im pc Darmbereich in den BD des Versuchs II bei 74%, während in Versuch III 78% der OS pc verdaut wurden (Tab. 17 und 23). Als Ursache dessen könnte

unter anderem die unterschiedlich hohe mittlere TiO_2 -Konzentration im Chymus zwischen beiden Versuchen in Betracht gezogen werden (Anhang, Tab. A-16 und A-23). In Versuch III lag diese für die BD- bzw. BD+ um 1,9 bzw. 2,3 g/kg T über den in Versuch II gemessenen Werten. Ursächlich dafür könnten evtl. Unterschiede in der Passagerate gewesen sein. Bei Anwendung der Markermethode werden bei vergleichbarer Nährstoffkonzentration und steigender TiO_2 -Konzentration im Chymus höhere Verdaulichkeitsquotienten ermittelt. Unterschiede in der Nähr- bzw. Mineralstoffkonzentration verstärken zudem die Differenz zwischen den Verdaulichkeitsquotienten.

Die für den postilealen Darmabschnitt ermittelten Verdaulichkeitsquotienten sind dementsgegen bei den Tieren in Versuch III um 5%-Punkte geringer. Dies beruht auf der Tatsache, dass die piVQ auf Basis der Nährstoff- bzw. TiO_2 -Konzentrationen im Chymus und im Kot berechnet wurden, und in Versuch III dementsprechend höheren TiO_2 -Konzentrationen im Chymus vergleichbare TiO_2 -Konzentrationen im Kot gegenüberstehen, was zu geringeren piVQ als in Versuch II führte.

Im Bezug auf die gemachten Ausführungen ist weiterhin anzumerken, dass die gemessenen TiO_2 -Konzentrationen im Chymus selbst innerhalb des Versuchs III deutlich variierten, wobei in den PHY-Behandlungen gegenüber den BD-Behandlungen deutlich geringere TiO_2 -Konzentrationen analysiert wurden, die im Bereich der für Versuch II gemessenen lagen. Eine Erklärung dafür kann nicht gegeben werden, da die Messung der TiO_2 -Gehalte im Chymus für Versuch III komplett in einem Aufschluss und Analysengang unter Verwendung der gleichen Standardlösung durchgeführt wurde und die Probenreihenfolge auch zufällig und nicht sortiert nach Behandlungen erfolgte.

Eine veränderte Passagerate scheint als Erklärung ebenfalls nicht geeignet, da der einzige Unterschied zwischen den Behandlungen BD und PHY in der Supplementation mit Phytase lag. Bei der Interpretation der für die BD-Behandlungen in Versuch III ermittelten VQ sollte somit besonders sensibel vorgegangen werden.

Die VQ für die Basaldiäten im Gesamttrakt waren in beiden Versuchen aufgrund der vergleichbaren TiO_2 -Konzentrationen im Kot hingegen nahezu ausgeglichen.

Neben der genannten Ursache könnten evtl. auch Differenzen in beiden verwendeten Futterchargen die Unterschiede in der Verdaulichkeit herbeigeführt haben. So beobachtete beispielsweise HOVENJÜRGEN (2000) Differenzen in Bezug auf die VQ von P im Gesamttrakt von Schweinen bei Verwendung unterschiedlicher Mais-, Gersten- bzw. SES-Chargen. Im genannten Fall könnten die Differenzen evtl. auf Unterschiede in der Phytaseaktivität bzw. im Phytatgehalt der verwendeten Futtermittel zurückgeführt werden.

6.1.2 Versuchsübergreifende Betrachtung

Tierindividuelle Schwankungen

Die begrenzte Versuchskapazität (8 Bilanzkäfige) sowie der hohe tierindividuelle Betreuungsaufwand machten nur eine geringe Anzahl an Wiederholungen für die einzelnen Behandlungen möglich (n=4 bis 7). Verstärkt wurde dies zudem durch eine starke Begrenzung der Nutzungsdauer der fistulierten Tiere im Versuch, die dazu führte, dass von ursprünglich geplanten vier Versuchsdurchgängen je Versuch nur drei (Versuch Ia) bzw. zwei Durchgänge (Versuch II und III) realisiert werden konnten. Bedingt durch die geringe Anzahl an Wiederholungen waren die für die einzelnen Behandlungen berechneten Mittelwerte (LSmeans) zum Teil durch ein hohes Maß an Streuung gekennzeichnet. Die Verdaulichkeitsquotienten innerhalb der Behandlungen unterlagen teils erheblichen Schwankungen, was sich in der Höhe der Standardfehler der Schätzungen widerspiegelte. Dabei lagen die Standardfehler in allen Versuchen für P und Ca am höchsten. Ein in Tabelle 24 beispielhaft für die OS dargestellter Vergleich der Standardfehler der einzelnen Darmabschnitte zeigte, dass auf postilealer Ebene die größten Schwankungen auftraten. Dies galt auch für N, P und Ca. Am geringsten waren die Standardfehler mit Ausnahme von P und Ca in den Versuchen II und III bei der Schätzung der mittleren Verdaulichkeitsquotienten auf Ebene des Gesamttraktes.

Tabelle 24. Vergleich der Standardfehler der mittleren VQ (LSmeans) für die OS

	praecaecal	postileal	Gesamttrakt
Versuch Ia	2,58	5,55	0,70
Versuch II	0,55	1,43	0,37
Versuch III	1,15	2,44	0,24

Ähnliche Beobachtungen diesbezüglich wurden auch von WILFART ET AL. (2007a) für OS, Rohprotein und Rohasche gemacht. Bei doppelt kanülierten Schweinen (proximales Duodenum und terminales Ileum) ermittelten die Autoren die höchsten Werte für die RSD (residual standard deviation) im Duodenum und die geringsten Werte für den Gesamttrakt. Die Autoren führten dies unter anderem auf eine unzureichende Probenmenge zurück, die durch die T-Kanülen am Duodenum und Ileum gewonnen werden kann, während Kot nahezu vollständig gesammelt wird. Somit ist nicht auszuschließen, dass bei der Probenahme von Chymus durch die T-Kanüle im sogenannten Spot-sampling-Prinzip diese Proben nicht oder nur begrenzt repräsentativ für den jeweiligen Darmabschnitt sind (TITGEMEYER, 1997). Weiterhin können Unterschiede im Fließverhalten zwischen Chymus und Marker zu einer Über- bzw. Unterschätzung der Verdaulichkeit führen, wie bei TITGEMEYER (1997) beschrieben. So ist es vorstellbar, dass sowohl der geringe T-Gehalt als auch die Ausprägung von festen und flüssigen Phasen im Chymus zu einer ungleichen Verteilung und einem diskontinuierlichen Fluss der Marker im Chymus führen kann.

Besonders bei geringen P-Gehalten im Futter treten große tierindividuelle Schwankungen hinsichtlich der P-Verdaulichkeit auf (RODEHUTSCORD ET AL., 1994, HOVENJÜRGEN, 2000), die deutlich höher sind als für die organische Fraktion.

Als weiterer Erklärungsansatz dient zudem die Tatsache, dass die mikrobielle Gemeinschaft im Verdauungstrakt hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Ausprägung stark einzeltierabhängig ist (HILL ET AL., 2005)

Die höchsten tierindividuellen Variationen waren bei der Berechnung des Phytatabbaus im pc Darmabschnitt zu verzeichnen. Die Spanne reichte dabei von zweistelligen Werten im negativen bis zu zweistelligen Werten im positiven Bereich. Hohe tierindividuelle Schwankungen innerhalb einer Behandlung im pc Phytatabbau ermittelte auch RAPP (1998). Er machte das ungleiche Fließverhalten von Phytat und Marker für die Diskrepanz verantwortlich, wobei er einen schnelleren Fluss des Markers unterstellte.

BRAUDE ET AL. (1976) führten bei Schweinen Messungen des Chymusflusses unter anderem am terminalen Ileum mittels Kanülentechnik durch und fanden erhebliche Variationen zwischen den Einzeltieren.

Da eine Sekretion von Phytat in den Darmtrakt bisher nicht nachgewiesen wurde und auch aufgrund der Größe des Moleküls sehr unwahrscheinlich ist, wurden die Abbauraten mit negativem Vorzeichen gleich 0 gesetzt.

Koprophagie

Eine weitere Fehlerquelle (Versuche Ia, II und III) stellte vermutlich in einzelnen Ausnahmefällen Koprophagie dar, die durch das nächtliche Abstreifen der Kotbeutel nicht vermieden werden konnte. Als mögliche Folge der Kotalaufnahme könnte es zu einer vermeintlichen Erhöhung der P-Verdaulichkeit gekommen sein, da zum einen aus abgebautem Phytat freigesetztes anorganisches Phosphat aufgenommen und nun absorbiert werden konnte und zum anderen mit den Faeces eine beträchtliche Aufnahme von TiO₂ erfolgte, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurde und sich in erhöhten Konzentrationen in Chymus und Kot niedergeschlagen haben könnte, was evtl. fälschlicherweise zu einer Überschätzung der Verdaulichkeitsquotienten führte. Bei einer Vorlage von 40 g Frischkot/kg Futter ermittelten KEMME ET AL. (1997) bei wachsenden Schweinen bei suboptimaler vP-Versorgung einen numerischen Anstieg der VQ von P und Ca im Gesamttrakt von 4,1 bzw. 1,7%-Punkten. Auch in Ratten wurden bei zugelassener Koprophagie höhere Werte für die Ca-Absorption festgestellt als bei Unterbindung (CREE ET AL., 1986).

Methodik der Verdaulichkeitsbestimmung

Aufgrund der unvermeidlichen Chymusverluste über die Kanülen war bei den fistulierten Tieren (Versuche Ia, II und III) keine quantitative Sammlung von Kot möglich. Demzufolge wurde bei diesen Tieren die Berechnung der Verdaulichkeitsquotienten für den Gesamttrakt ebenfalls nach Gleichung (1) über die Markermethode vorgenommen. Die

Berechnung der Verdaulichkeitsquotienten im Gesamttrakt mittels Marker war zudem unabdingbar, um die Vergleichbarkeit mit den pc Werten herzustellen, die nur auf Markerbasis ermittelt werden konnten.

Ausgehend von den Problemen in Versuch Ia wurde eine Wiederholung des Versuches mit intakten Tieren geplant. Ergänzend zu Versuch Ia wurde Versuch Ib durchgeführt, um dadurch weitere Verdaulichkeitsquotienten auf Ebene des Gesamttraktes und somit evtl. diesbezüglich eine gesichertere Aussage zu erhalten. Dabei sollte zudem anhand der vollständigen Erfassung der Kotmenge die Wiederfindung für den Marker TiO_2 (**TiO_2 -Wiederfindung [%] = $100 \times \text{TiO}_2$ -Ausscheidung [g/d] / TiO_2 -Aufnahme [g/d]**) ermittelt und ein Vergleich zwischen quantitativen und mittels Marker berechneten Verdaulichkeitsquotienten vorgenommen werden. Diese Gegenüberstellung brachte teils erhebliche Differenzen zutage (Tabelle 25), deren Ursache zumeist in der unzureichenden Wiederfindung des TiO_2 begründet lag und sich besonders deutlich für Nähr- bzw. Mineralstoffe mit verhältnismäßig geringer Verdaulichkeit, wie etwa P, zeigte. Verglichen mit quantitativen Werten ist das Fehlerrisiko des Einzelwertes bei auf Marker basierenden Daten weitaus höher, da neben den evtl. mit Analysefehlern behafteten Konzentrationen des Nähr- bzw. Mineralstoffes zudem mögliche Fehler bei der Bestimmung des TiO_2 -Gehaltes im Futter sowie im Chymus bzw. Kot Eingang in die Berechnung finden. Dabei ist besonders die Bestimmung des TiO_2 -Gehaltes in Futterproben von Analyse zu Analyse großen Schwankungen unterworfen, was dazu geführt hat, in dieser Untersuchung von den kalkulierten Gehalten im Futter auszugehen.

Im Ergebnis konnte in keiner der Behandlungen TiO_2 vollständig bzw. zu einem Anteil von >90% wiedergefunden werden. Die höchsten Werte wurden bei Zulage von Maisstärke erreicht, die Zulage von Pektin führte hingegen zu einer signifikanten Abnahme der Wiederfindung auf unter 75%. Dies widerspricht den in zahlreichen Untersuchungen ermittelten hohen TiO_2 -Wiederfindungen (Schwein: JAGGER ET AL., 1992; Huhn: SHORT ET AL., 1996). Die mit 92,3% geringste Wiederfindung für TiO_2 bei Schweinen wurde in der Arbeit von KAVANAGH ET AL. (2001) gefunden.

Tabelle 25. Vergleich der quantitativen mit den Marker-basierten VQ und Wiederfindung des TiO₂ in Versuch Ib

		BD	BDc	BDs	BDp	p
T	<i>quantitativ</i>	90 ^b (0,6)	75 ^c (0,6)	92 ^a (0,6)	88 ^b (0,6)	<0,001
	<i>Marker</i>	88 ^b (0,8)	70 ^d (0,9)	91 ^a (0,8)	84 ^c (0,8)	<0,001
OS	<i>quantitativ</i>	92 ^{ab*+} (0,5)	76 ^c (0,6)	94 ^{a*} (0,5)	90 ^{b+} (0,5)	<0,001
	<i>Marker</i>	90 ^a (0,8)	72 ^c (0,8)	93 ^a (0,8)	86 ^b (0,8)	<0,001
N	<i>quantitativ</i>	87 ^a (1,7)	80 ^b (1,8)	88 ^a (1,7)	76 ^b (1,7)	<0,001
	<i>Marker</i>	85 ^a (2,4)	77 ^{a*} (2,6)	86 ^{a*} (2,4)	66 ^b (2,4)	<0,001
P	<i>quantitativ</i>	39 (3,0)	38 (3,3)	39 (3,0)	36 (3,0)	0,907
	<i>Marker</i>	29 ^a (2,9)	27 ^a (3,1)	30 ^a (2,9)	14 ^b (2,9)	0,002
Ca	<i>quantitativ</i>	67 ^{ab*} (1,9)	61 ^{bc*+} (2,1)	69 ^a (1,9)	55 ^{c+} (1,9)	<0,001
	<i>Marker</i>	61 ^a (2,8)	54 ^{a*} (3,0)	65 ^{a*} (2,8)	40 ^b (2,8)	<0,001
TiO ₂ -Wiederfindung		86 ^{ab} (3,6)	85 ^{ab} (3,9)	88 ^a (3,6)	74 ^b (3,6)	0,048

^{a, b, c} unterschiedliche Hochbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (p≤0,05)

¹⁾ means; ²⁾ LSmeans (Standardfehler)

In der vorliegenden Untersuchung könnte es aufgrund der unterlassenen Pelletierung unter Umständen zu einer Entmischung des TiO₂ gekommen sein. Die geringe Wiederfindung spiegelte sich dementsprechend auch im Vergleich der quantitativ bestimmten mit den Marker-basierten VQ in Versuch Ib wider (Tab. 25). Da die quantitativ bestimmten VQ die Marker-basierten VQ, je nach Wiederfindung des TiO₂, überschritten, war entsprechend eine Änderung der Ausprägung von Effekten der KH-Substrate durch veränderte Signifikanzen bzw. Tendenzen zu beobachten. Demnach konnte die durch die Zulage von Pektin verursachte Differenz der VQ für T, OS und P auf Basis der quantitativen Werte nicht statistisch gesichert werden, was in Folge dessen einen Effekt des Pektins ausschließt. Demgegenüber führte die Cellulosezulage unter Verwendung der quantitativen Werte zu einer signifikanten Abnahme der VQ-N sowie zu einer tendenziellen Verminderung der VQ-Ca, während auf Basis der Marker-Daten kein Effekt der Cellulose zu beobachten war. Somit wird deutlich, dass die Auswertung der quantitativen im Vergleich zu den Marker-basierten Daten zu einer anderen Aussage führt.

Im Hinblick auf die Genauigkeit der Schätzung ist zudem zu bemerken, dass die LSmeans der VQ bei quantitativer Bestimmung aufgrund der geringeren Streuung zwischen den Einzeltierdaten innerhalb einer Behandlung mit deutlich geringeren Standardfehlern behaftet waren als dies für die Marker-basierten Werte der Fall war. Eine Ausnahme stellt hier lediglich die VQ des P dar, bei der für beide Varianten vergleichbare Standardfehler ermittelt wurden. Dies ist wiederum ein Indiz dafür, dass selbst bei quantitativer Bestimmung, die Verdaulichkeitsquotienten des P starken tierindividuellen Schwankungen unterworfen sind.

Die beschriebenen Beobachtungen bestärken die Auffassung der Autorin, wonach bei der Durchführung von Verdaulichkeitsbestimmungen, im Rahmen der Möglichkeiten, generell die Erhebung von quantitativen Daten als Methode der Wahl betrachtet werden sollte. Besonders bei der Verwendung extremer Diäten (z.B. mit hohem Pektinanteil) ist der Markereinsatz aufgrund eines ungleichmäßigen Markerflusses als kritisch zu bewerten. Für die Diskussion der Ergebnisse aus Versuch Ib werden im Weiteren allerdings die Marker-basierten Werte hinzugezogen, um eine Vergleichbarkeit zu den übrigen Versuchen, insbesondere Versuch Ia, zu gewährleisten.

6.2 Einfluss einer oralen Zulage von Kohlenhydrat-Substraten

Die Ergebnisse aus Versuch Ib bestätigen weitgehend die in Versuch Ia erhaltenen Werte. Effekte und Tendenzen der einzelnen Behandlungen stimmen überwiegend überein. Eine Ausnahme bildet lediglich die BDC aufgrund der unterschiedlichen Zulagehöhe der Cellulose. Da Versuch Ib hier nur als Zusatzversuch diente, soll die Diskussion im Folgenden vorrangig auf die Ergebnisse aus Versuch Ia beschränkt bleiben.

6.2.1 Verdaulichkeit der OS der Kohlenhydrat-Substrate

Stärke

Wie erwartet, wurde die Maisstärke bereits im pc Darmbereich nahezu vollständig verdaut. Mittels Differenzrechnung wurde für die OS der Maisstärke eine mittlere pcVQ von 92% ermittelt. Im Gesamttrakt wurde die OS der Maisstärke in Versuch Ia zu 98% und in Versuch Ib zu 100% verdaut. Dies entspricht den Ergebnissen zur Verdaulichkeit von Maisstärke, die aus zahlreichen Untersuchungen hervorgehen (z.B. BACH KNUDSEN UND CANIBE, 2000; VAN DER MEULEN ET AL., 1997; GRAHAM ET AL., 1986, RÉRAT, 1978). Beispielhaft sei hier auch die Untersuchung von MARTINEZ-PUIG ET AL. (2003) angeführt, in der Maisstärke bei wachsenden Schweinen am terminalen Ileum zu 97% und im Gesamttrakt vollständig abgebaut wurde.

Cellulose

Für die Verdaulichkeit der OS aus Cellulose wurden in Versuch Ia im Bereich des Dünndarms bzw. des Gesamttraktes negative Werte von -4,4% bzw. -38% berechnet. Auch

bei Einsatz von nur 15% Cellulose (Versuch Ib) lag die durchschnittliche ttVQ-OS lediglich bei -27%. Dies ist ein deutliches Indiz für das Unvermögen der monogastrischen Darmflora zum Abbau von Cellulose. Die negativen VQ lassen zudem eine erhebliche Beeinflussung der Verdaulichkeit der OS der Komponenten der Basaldiät vermuten.

Dementsprechend erfolgte in dieser Behandlung ein häufiger Absatz von Faeces, der auf eine gesteigerte Passagerate schließen lässt. Eine Erhöhung der Passagerate verbunden mit einer Zunahme des mittleren Caecumvolumens von wachsenden Schweinen von 144 auf 264 ml beobachteten FARRELL UND JOHNSON (1970) bei Zulage von 26% Ligno-Cellulose im Vergleich zu einer 8%igen Zulage zu einer Basaldiät. Eine Zunahme der Länge als auch des Gewichtes des Darmtraktes – besonders des Dickdarmes – von Schweinen und Ratten mit steigender Zulage von faserreichen NSP wurde vielfach beschrieben (JØRGENSEN ET AL., 1996; GOODLAND UND MATHERS, 1990; BAGHERI UND GUEGUEN, 1983; VAREL, 1987). Die Ursachen, die zu einer solchen Hypertrophie führen (Muskelaufbau durch gesteigerte Transportleistung), wurden bereits unter 2.5.5 angesprochen.

KIRCHGESSNER ET AL. (1987) infundierten Sauen täglich etwa 550 – 600 g Cellulose in das Caecum und ermittelten einen postilealen fermentativen Abbau für Cellulose von 52%. Diese Beobachtung deutet auf die hohe Kapazität des Dickdarms von Sauen zum Abbau von unlöslichen NSP hin (siehe 2.5.4). Da es sich bei den in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Schweinen um Tiere in einem LM-Bereich zwischen 30 und 50 kg handelte, ist demnach von einer weitaus geringeren postilealen Fermentationskapazität auszugehen, was die Ergebnisse zum Celluloseabbau bestätigen.

Wie unter 4.2.1 beschrieben handelte es sich bei der verwendeten Cellulose um eine Weichholz-Cellulose mit einem vergleichsweise hohen Ligninanteil (265 g/kg T).

Es ist daher anzumerken, dass die in anderen Untersuchungen verwendete Cellulose (meist Solka-floc [LIVESEY ET AL., 1995; FARRELL UND JOHNSON, 1970; PARTRIDGE ET AL., 1982]) eine andere physikalische Zusammensetzung aufweist und ein Vergleich daher nur bedingt möglich ist. Da die Kapazität zum Abbau der Cellulose stark von der Cellulosequelle abhängt, sind unterschiedliche VQ der Cellulosen selbst sowie unterschiedliche Effekt auf die VQ anderer Nähr- bzw. Mineralstoffe zu erwarten. Generell ist davon auszugehen: je höher der Grad der Lignifizierung (Lignininkrustierung), desto größer das Ausmaß der Depression (DROCHNER, 1984). Der Unterschied in der Wirkung verschiedener Cellulosen wird auch in der Untersuchung von DROCHNER (1984) deutlich, in der Cellulose sowohl in Form eines Holzfaserstoffs als auch in aufbereiteter Form (Reincellulose) zum Einsatz kam. Im Gegensatz zur Reincellulose führte die Verabreichung des Holzfaserstoffs (5%) zu einer Erhöhung der Flussmenge von Chymus im Dünndarm von Miniaturschweinen um 45%.

Pektin

Mittels Differenzverfahren wurde für das Pektin eine mittlere Verdaulichkeit der OS im pc Darmbereich von -5,6% berechnet. Pektin scheint demnach im Dünndarm nicht abgebaut worden zu sein. Vielmehr scheint sogar eine Depression der VQ-OS der anderen Komponenten der Diät aufgetreten zu sein. Dies steht der in der Literatur verbreiteten Aussage einer begrenzten pc Fermentierbarkeit des Pektins durch die mikrobielle Besiedlung des vorderen Darmbereiches (v. a. *Lactobacilli* und *Streptococci*) entgegen (JENSEN, 2001). So ermittelte beispielsweise KERLER (2002) in Absetzferkeln für Pektine unterschiedlicher Herkunft (10% in der Ration) eine praecaecale Verdaulichkeit zwischen 10 und 15%.

In einer Übersichtsarbeit von DROCHNER (1993) wird für die pcVQ von Pektin beim Schwein ein Bereich von 2 – 4% angegeben, wobei der Autor die Ursache des begrenzten Abbaus in der mikrobiellen Aktivität in Magen und terminalem Dünndarm sieht.

Eine Pektinverdaulichkeit von 16% fanden DEN HARTOG ET AL. (1988) im pc Darmbereich von Schweinen bei Zulage von 5% Pektin.

SANDBERG ET AL. (1983) verabreichten ileostomierten Patienten täglich 15 g Zitruspektin und fanden 70 – 100% der Uronsäuren im Ileumchymus wieder, was auf eine vergleichsweise hohe Variabilität im Ausmaß des fermentativen Abbaus zwischen den einzelnen Patienten hindeutet.

Der negative Wert für die pcVQ in der vorliegenden Untersuchung kann nicht abschließend geklärt werden. Möglicherweise hat die negative Wirkung des Pektins auf die Verdaulichkeit der OS der übrigen Rationskomponenten den Abbau der OS des Pektins in der vorliegenden Untersuchung überdeckt, da die Pektinzulage mit 25% in der eigenen Untersuchung deutlich höher lag als dies in anderen Versuchen der Fall war. Beim Vergleich der eigenen Werte mit den Ergebnissen in der Literatur ist überdies anzumerken, dass die Fermentationsintensität zudem abhängig von Herkunft und Veresterungsgrad des Pektins ist. So fand KERLER (2002) die höchsten *in vitro*-Gasbildungsraten für hochverestertes (VE=71%) Zitruspektin, während für niederverestertes (VE=5%) Apfelpektin die geringste Gasmenge gemessen wurde. Dies lässt ein unterschiedliches Fermentationsverhalten der Pektine auch im Verdauungstrakt erwarten.

Im Gesamttrakt wurde in Versuch Ia eine mittlere Verdaulichkeit der OS aus Pektin von 83% ermittelt. Der Vergleichswert aus Versuch Ib war allerdings mit 73% um 10%-Punkte geringer. Als Ursache dessen muss die für die Behandlung BDp geringe TiO₂-Wiederfindung in Versuch Ib gesehen werden, da bei Verwendung der quantitativen VQ als Ausgangsbasis in der Differenzrechnung ein mittlerer VQ für die OS des Pektins im Gesamttrakt von 84% resultierte. Die in beiden Versuchen bemerkenswerte Steigerung der VQ von pc nach tt deutet auf eine hohe Fermentation von Pektin im pi Darmbereich hin. Aufgrund des positiven Beitrags des Dickdarms zur Verdauung fermentierbarer NSP

kommt es auf Ebene des Gesamtraktes zu einer nahezu vollständigen Kompensation der negativen Wirkung im pc Darmbereich.

Allerdings ist davon auszugehen, dass die VQ im Gesamtrakt auf Basis der OS besonders für fermentierbare NSP wie das Pektin unterschätzt wird, da zum einen der fermentationsbedingt erhöhte Anteil an OS mikrobiellen Ursprungs im Kot als Anteil nicht verdauter OS der Zulage angesehen wird und zum anderen überproportional mehr organische Bestandteile faecal ausgeschieden wurden, als in der Pektinzulage enthalten waren.

Eine hohe Verdaulichkeit fermentierbarer NSP im Dickdarm von Schweinen wurde unter anderem von LAPLACE ET AL. (1989) bei Einsatz von Weizenkleie und Sojabohnenschalen sowie von MÜLLER UND KIRCHGESSNER (1985) bei Zulage von Pektin beobachtet. Letztere beschrieben für Pektin eine Verdaulichkeit, besonders im Dickdarm, von über 80%.

Die fast vollständige Fermentation von Pektin ist in zahlreichen Studien belegt. So wurde eine 5%ige Pektinzulage beispielsweise im Gesamtrakt von Miniaturschweinen zu 80 – 90% (DROCHNER, 1984) bzw. von wachsenden Schweinen zu 92% (DEN HARTOG ET AL., 1988) fermentiert. Bei Sauen, deren Rationen täglich 400 g Pektin zugelegt wurden, beobachteten ROTH-MAIER ET AL. (1993) einen fermentativen Abbau des Pektins im Gesamtrakt von 95%.

ALBERS UND HENKEL (1979) legten einer Basaldiät für Schweine 10% Pektin zu und berichten von einer scheinbaren Verdaulichkeit der Pektinstoffe im Gesamtrakt in Höhe von 95-99%.

Ähnliche Beobachtungen wurden von GÄDEKEN (1969) auch bei Ratten gemacht. Bei Vorlage von 12 bzw. 23,7% Apfelpektin ermittelte er für die scheinbare Verdaulichkeit im Gesamtrakt Werte von 97,1 bzw. 93,4%. In seiner Untersuchung zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Ausmaßes der Fermentation von der Höhe der Pektinzulage.

Pektin ist in höherem Maße durch die Mikroflora im Dickdarm fermentierbar als Cellulose (SUNVOLD ET AL., 1995; LIVESEY ET AL., 1995; KIRCHGESSNER ET AL., 1987; DROCHNER, 1984). Dies belegen auch die im ermittelten Daten zur Konzentration der beim fermentativen Abbau entstandenen SCFA im Kot der Tiere, die bei Zulage von Pektin mit 451 mmol/kg T signifikant über denen bei Cellulosegabe mit 195 mmol/kg T lagen (METZLER ET AL., 2009a). Erhöhte SCFA-Konzentrationen können dabei als Indiz für eine gesteigerte Fermentation gesehen werden. Eine Erhöhung der SCFA-Konzentrationen im Caecum und Kot in Verbindung mit der Gabe von Pektin wurde vielfach für Schweine (DROCHNER ET AL., 2004), Ratten (DONGOWSKI ET AL., 2002) und Menschen (SPILLER ET AL., 1980) nachgewiesen.

Wie bereits eingangs (2.5.5) ausführlich beschrieben, besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Art und Höhe der verwendeten NSP und Geschwindigkeit der Passagerate des Chymus im Verdauungstrakt. Aussagen zum Einfluss der eingesetzten KH auf die

Passagerate können in der vorliegenden Arbeit nicht getroffen werden, da dies nicht Gegenstand der Untersuchung war. Es ist allerdings anzunehmen, dass, entsprechend der herrschenden Meinung, Cellulose eine Beschleunigung der Passage im Gesamtrakt bewirkt hat. Die beschleunigende Wirkung des Pektins auf die Chymuspassage war vermutlich nur im Dünndarm anzutreffen. Im Bereich des Dickdarms hat Pektin hingegen aller Voraussicht nach zu einer Verlangsamung der Passage geführt. Eine Ausdehnung der Transitzeit von fermentierbarer Faser im Dickdarm wurde auch von MOSENTHIN ET AL. (1999) im Dickdarm von Ferkeln beobachtet.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass die einzelnen KH-Substrate Unterschiede in Zusammensetzung, Wachstum sowie metabolischer Aktivität der Darmflora verursacht haben. Neben dem Angebot an N sind die Zusammensetzung der Mikroflora sowie deren Wachstum weiterhin von Art und Konzentration der Kohlenstoffquelle abhängig, die als Energielieferant dient. Da hinsichtlich der bevorzugten C-Quelle große Unterschiede zwischen den einzelnen Bakterienspezies existieren, begünstigen oder hemmen die einzelnen KH-Substrate das Wachstum spezifischer Bakterienstämme. Dabei konkurrieren pektinolytische Bakterien mit faserabbauenden Bakterien (VAREL, 1987).

Aus den Paralleluntersuchungen dieses Projekts zur Bestimmung der mikrobiellen Gemeinschaften in Kot und Ileumchymus wird dies deutlich. So fanden METZLER ET AL. (2009b) im Ileumchymus der Schweine signifikant höhere Zellzahlen der Familie *Lactobacillus* spp. bei Zulage von Stärke, während Cellulose einen signifikanten Anstieg der Bifidobakterien verursachte. Eine deutlich gesteigerte bakterielle Diversität (gemessen an der Anzahl der PCR-DGGE-Banden) im Ileumchymus beobachteten die Autoren überdies sowohl bei Stärke- als auch Cellulosezulage.

6.2.2 Einfluss der KH-Substrate auf die Umsetzungen der T und OS

T-Gehalt in Chymus und Kot

Der T-Gehalt des Ileumchymus war durch keine der zugelegten Kohlenhydratquellen beeinflusst. Eine signifikante Reduzierung des T-Gehaltes im Ileumchymus von 10,6 auf 7,2% beobachteten hingegen JØRGENSEN ET AL. (1996) bei einem Anstieg des Fasergehaltes von 60 auf 269 g/kg T in der Basaldiät für wachsende Schweine. JENSEN UND JØRGENSEN (1994) fanden ebenfalls eine Verminderung des T-Gehaltes im Ileumchymus bei Vorlage von 35% Erbsenstroh. Eine Zulage von 5% Pektin bzw. Holzfaserstoff führte in einem Versuch von DROCHNER (1984) zu einer Abnahme des T-Gehaltes im Ileumchymus.

Keinen Effekt beobachteten DEN HARTOG ET AL. (1988) bei Zulage von 5% Cellulose bzw. Pektin.

Eine signifikante Abnahme des T-Gehaltes in den Faeces zeigte sich in den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung bei Zulage von Pektin. Cellulose führte nur bei einer Zulagehöhe von 25% (Versuch Ia) zu verminderten T-Gehalten im Kot.

Der senkende Effekt von NSP auf den T-Gehalt des Kotes wurde bereits vielfach beschrieben (JØRGENSEN ET AL., 1996; POTKINS ET AL., 1991; DEN HARTOG ET AL., 1988; KERLER, 2002; DROCHNER, 1984; VAREL, 1987; ALBERS UND HENKEL, 1979) und wird der hydrophilen Struktur der NSP sowie des damit verbundenen teils enormen Wasserbindungsvermögens zugeschrieben. Dadurch wird eine Erhöhung der endogenen Sekretion von Verdauungssäften verursacht. In einer Übersichtsarbeit von LOW (1989) sind mögliche Mechanismen zusammengefasst, die ursächlich sind für eine Stimulierung der endogenen Sekretion. Dabei spielt offensichtlich unter anderem die durch NSP verursachte mechanische Stimulation der Mukosa und die damit verbundene gesteigerte Sekretion von Muzinen eine bedeutende Rolle (DROCHNER, 1984; TAVERNER ET AL., 1981).

Da Cellulose aufgrund der geringen Fermentierbarkeit fast vollständig den Dickdarm passiert, wird bzw. bleibt auch dort Wasser an Cellulose gebunden und wird auf diese Weise entsprechend zu einem geringeren Anteil resorbiert.

Im Falle des Pektins kommt das Wasserbindungsvermögen als Erklärung für die Abnahme des faecalen T-Gehaltes nicht bzw. nur teilweise in Betracht, da Pektin im Dickdarm nahezu vollständig abgebaut wird. Allerdings entsteht bei der mikrobiellen Fermentation eine gewisse Menge an Wasser, welches intracellulär in Bakterienmasse gebunden ist und unter Umständen nicht vollständig resorbiert und ausgeschieden wird (EASTWOOD UND MORRIS, 1992).

Verdaulichkeit der T und OS im pc Darmbereich

Der signifikant gesteigerte T-Fluss am terminalen Ileum bei Zulage von Cellulose bzw. Pektin im Gegensatz zur Stärkegabe ist als Folge der geringen praecaecalen Verdaulichkeit dieser beiden NSP zu sehen und bestätigt zahlreiche Untersuchungen beim Schwein (DROCHNER, 1984; PARTRIDGE, 1978b). Aufgrund der mittels Differenzverfahren berechneten mittleren pcVQ für die T aus den Zulagen (Cellulose: -10%; Stärke: 95%; Pektin: -14%) kann in den Behandlungen BDc und BDp davon ausgegangen werden, dass Cellulose und Pektin im pc Darmabschnitt kaum abgebaut wurden. Somit trugen die beiden Substrate gegenüber der BD zu einem zusätzlichen T-Fluss am terminalen Ileum von im Mittel etwa 216 g/d (BDc) bzw. 231 g/d (BDp) bei.

SCHULZE ET AL. (1995) fütterten jungen Schweinen aufbereitete NDF aus Weizenkleie in einer Höhe von 196 g/kg T und beobachteten eine signifikante Zunahme des täglichen ilealen T-Flusses von 46 auf 174 g. JØRGENSEN ET AL. (1996) schätzten bei Zulage von 35% Erbsenfaser einen signifikant höheren täglichen T-Fluss am terminalen Ileum ausgewachsener Schweine von 1.073 g im Vergleich zu 270 g bei Vorlage der Basaldiät.

Da Stärke bereits im Dünndarm nahezu vollständig verdaut wurde, war in dieser Behandlung kein Effekt festzustellen. Die Höhe des mittleren täglichen T-Flusses am terminalen Ileum war bei den Tieren der BDs sogar numerisch vermindert (218 vs. 280 g/d in BD). Dies zeigt, dass durch den schnellen Abbau und dem damit verbundenen zügigen

Verschwinden der Stärke auch die T der Komponenten der Basaldiät besser verdaut wurde, da die enzymatische Verdauung und Absorption aufgrund der geringeren T-Menge im Dünndarm offensichtlich effizienter war.

In der vorliegenden Untersuchung war bei Zulage von 25% Cellulose bzw. Pektin im Bereich des Dünndarms gleichermaßen eine Depression der T- als auch OS-Verdaulichkeit in Höhe von etwa 21%-Punkten zu beobachten. Zwischen den beiden unterschiedlichen NSP-Quellen traten keinerlei Differenzen hinsichtlich der pcVQ der T und OS zu Tage. Es darf diesbezüglich vermutet werden, dass das Ausmaß der Verdaulichkeitsdepression im pc Darmabschnitt kaum von der Art der NSP (fermentierbar bzw. unlöslich) abhängig ist.

Die Depression der pc OS- bzw. T-Verdaulichkeit durch die Zulage von Cellulose bzw. Pektin wurde bereits in der Literatur vielfach beschrieben und findet sich in der vorliegenden Untersuchung bestätigt.

So führten beispielsweise bei wachsenden Schweinen ein Ersatz von 10% Maisstärke durch Cellulosepulver zu einer Abnahme der pcVQ-T um 13%-Punkte (SAUER ET AL., 1991), eine Zulage von 5% Cellulose zu einer um 5%-Punkte verminderten pcVQ der OS (DEN HARTOG ET AL., 1988) sowie eine Zulage von 7% Cellulose (DE LANGE ET AL., 1989) zu einer Reduzierung der pcVQ-T um 8%-Punkte.

Bei Betrachtung der Höhe der Depression sowohl in der eigenen als auch in den hier genannten Untersuchungen wird deutlich, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Höhe der Cellulosezulage und dem Ausmaß der Verdaulichkeitsdepression (T, OS) zu vermuten ist.

Für Pektin scheint dieser Zusammenhang nur in begrenztem Maße denkbar zu sein. Zwar ist die negative Wirkung von Pektin auf die pc Verdaulichkeit der OS im Detail in der Arbeit von DROCHNER (1993) beschrieben und wird auch in einer Untersuchung von DE LANGE ET AL. (1989) postuliert, in der eine 4%ige Pektinzulage eine signifikante Abnahme der pcVQ-T bewirkte, allerdings wurde in anderen Studien kein Einfluss geringerer Mengen Pektin nachgewiesen (DEN HARTOG ET AL., 1988).

Verdaulichkeit der T und OS im pi Darmbereich und im Gesamttrakt

Aufgrund des beschriebenen positiven Effekts der Stärkezulage auf die Verdaulichkeit der T bereits im Dünndarm, wurde in dieser Behandlung entsprechend signifikant weniger T faecal ausgeschieden.

Die Zulage von Pektin hatte nur in Versuch Ib einen Anstieg der faecalen T-Ausscheidung aufgrund einer um 4%-Punkte geringeren ttVQ-T zur Folge. In Versuch Ia bewegte sich die Verdaulichkeit der T als auch der OS im Gesamttrakt für die BDP hingegen auf etwa gleichem Niveau wie für die Kontrolle. Der negative Effekt, den Pektin auf die VQ der T und OS im Dünndarm ausübte, schien sich im Gesamttrakt aufgrund des vollständigen Abbaus gänzlich aufgehoben zu haben.

Dieses Ergebnis ist konform mit den allgemein bekannten Literaturdaten und bestätigt, dass auch in einem extremen Zulagebereich von 25% im Dickdarm eine nahezu vollständige Kompensation der VQ-Depression eintritt, indem in der eigenen Untersuchung postileal über 70% der einfließenden T bzw. OS verdaut wurden. Es entfällt somit in dieser Behandlung auf den Dickdarm ein Anteil von 41 bzw. 38% an der gesamten VQ der T bzw. der OS $\{100 \times [(ttVQ - pcVQ) / ttVQ]\}$.

Im Vergleich dazu liegt der Anteil des Dickdarmes in den BD-Behandlungen bei lediglich 17 bzw. 16%, was etwa dem bei DROCHNER (1993) ausgewiesenen Wert von 15% bei wachsenden Schweinen entspricht. Dies macht die enorme Bedeutung des Dickdarms für den Abbau fermentierbarer NSP deutlich. Während geringere Pektingaben (5%) in Untersuchungen von DEN HARTOG ET AL. (1988), DE LANGE ET AL. (1989) und DE WILDE (1980) keinen Einfluss auf die VQ der OS bzw. T im Gesamttrakt von Schweinen zeigten, stellten ROTH-MAIER ET AL. (1993) hingegen bei oraler Verabreichung von 400 g Pektin/d bei Sauen eine Reduzierung der scheinbaren Verdaulichkeit der OS im Gesamttrakt fest, welche vermutlich auf eine erhöhte Exkretion von mikrobiell gebundener OS zurückzuführen war. Demnach kann, ähnlich wie für unlösliche NSP beschrieben, auch für fermentierbare NSP ein Zusammenhang zwischen der Zulagehöhe und dem Ausmaß der Depression angenommen werden.

Bestätigt wird diese Vermutung in der Arbeit von HOVENJÜRGEN (2000), der bei Zulage von 15 bzw. 25% Apfelpektin zu einer semisynthetischen Basaldiät nur in der hohen Zulagestufe einen negativen Effekt (2,3%-Punkte) auf die Verdaulichkeit der OS im Gesamttrakt wachsender Schweine feststellen konnte. Legte er 23% schwach melassierte Trockenschnitzel zu, beobachtete er eine Abnahme der VQ-OS um 3. Bei Verdopplung der Zulagehöhe auf einen Anteil von 46%, verdoppelte sich auch die Höhe der Depression (6%-Punkte), wobei die Differenz zwischen beiden Zulagestufen signifikant war.

Cellulose bewirkte in beiden Versuchen der eigenen Untersuchung eine Erhöhung der faecalen T-Ausscheidung in Abhängigkeit von der Höhe der Zulage im Vergleich zur Kontrolle (Versuch Ia um 32 und Versuch Ib um 18%-Punkte). Bei der Betrachtung dieser Differenzen kann davon ausgegangen werden, dass in Versuch Ia von diesen 32%-Punkten etwa 25%-Pkte auf die unverdaute Cellulose selbst entfielen und die weiteren 7%-Punkte sich aus der Depression der VQ-T der GM-Komponenten ergaben. Ein analoges Szenario kann für Versuch Ib angenommen werden (15 + 3%-Punkte), da die Verdaulichkeitsdepression hier aufgrund der geringeren Zulagehöhe ein verringertes Ausmaß erreicht hat. Diese Ergebnisse bestärken die Vermutung, wonach mit steigenden Gehalten unlöslicher NSP in der Ration auch eine Zunahme der Depression der T-Verdaulichkeit anderer Rationskomponenten im Gesamttrakt einhergeht.

Die für den pi Darmbereich berechneten VQ für die T (5,6%) und OS (1%) machen deutlich, dass bei Cellulosezulage im Dickdarm nahezu keine Verdauung der OS des einfließenden Chymus erfolgte und auch die einfließende T verglichen mit der BD nur zu

einem Zehntel verdaut wurde. Eine „Dickdarmkompensation“ der Verdaulichkeitsdepression, wie sie für das Pektin beschrieben ist, scheint im Falle der Cellulose aufgrund der äußerst begrenzten mikrobiellen Fermentierbarkeit nicht möglich zu sein. Somit beträgt der Anteil des Dickdarms an der gesamten Verdaulichkeit der T bzw. OS in der Behandlung BDc lediglich 7 bzw. 3,5%.

Der negative Effekt von Cellulose auf die T-Verdaulichkeit im Gesamtrakt wurde vielfach nachgewiesen (DE LANGE ET AL., 1989; FARRELL UND JOHNSON, 1970). So fanden beispielsweise SAUER ET AL. (1991) bei Ersatz von 10% Maisstärke durch Cellulosepulver eine Abnahme der der ttVQ-T um 8,5%-Punkte. Bei einer Zulage von 5% Cellulose konnten DEN HARTOG ET AL. (1988) eine Abnahme der tt Verdaulichkeit der OS um 6%-Punkte feststellen. In einer Untersuchung von DE LANGE ET AL. (1989) wurde wachsenden Schweinen zu einer Protein-freien auf Maisstärke basierenden Diät 7% Cellulose zugelegt, wodurch die Verdaulichkeit der T im Gesamtrakt signifikant um 5%-Punkte vermindert war.

Die Ergebnisse der Untersuchung machen deutlich, dass hinsichtlich des Ausmaßes der Depression der VQ-T bzw. VQ-OS zwischen fermentierbaren und unlöslichen NSP im pc Darmbereich kaum Unterschiede bestehen, dass aber im Dickdarm die pc Depression durch fermentierbare NSP aufgrund der weitaus höheren Fermentierbarkeit weitgehend kompensiert wird. Daraus ergeben sich deutliche Differenzen hinsichtlich des Effektes von NSP auf Ebene des Gesamtrakts.

6.2.3 Einfluss der KH-Substrate auf den Phytatabbau und die Umsetzungen von P und Ca

In der Basaldiät (Versuch Ia) konnten nur die höherphosphorylierten Inositolphosphate Phytat (IP₆) und IP₅ nachgewiesen werden. Während IP₅ einen geringen Anteil ausmachte, war Phytat das vorherrschende IP im Futter. Diese Verteilung der IP ist charakteristisch für auf Mais und SES basierende Diäten und wurde in mehreren Untersuchungen bereits beschrieben (KEMME ET AL., 1999c, 2006; SCHLEMMER ET AL., 2001; RAPP, 1998). Der Anteil von Phytat-P an Gesamt-P lag in der BD bei 55% (Versuch Ia) bzw 49% (Versuch Ib) und war somit etwas geringer als aufgrund der hohen Anteile Mais und SES hätte vermutet werden können.

Phytatabbau und Verdaulichkeit von P und Ca im pc Darmabschnitt

Trotz der geringen Phytaseaktivität in den Diäten (<90 U/kg) war der Phytatabbau am terminalen Ileum, mit Ausnahme der Behandlung BDs, vergleichsweise hoch. Im Mittel wurden 60% des mit der BD aufgenommenen Phytats praecaecal abgebaut. Da beim Schwein bisher keine nennenswerte Aktivität intestinaler Phytasen festgestellt wurde (KEMME ET AL., 2006; YI UND KORNEGAY, 1996; HU ET AL., 1996; JONGBLOED ET AL., 1992; POINTILLART ET AL., 1984, 1985), liegt die Vermutung nahe, dass bereits in diesem

Darmabschnitt mikrobielle Phytasen der Darmflora den Abbau von Phytat verursacht haben. In anderen Untersuchungen mit marginalen Gehalten an vP war der Abbau des Phytats am terminalen Ileum deutlich geringer. So wurden in fistulierten Schweinen beispielsweise Werte von 8, 10, 16 und 19% (KEMME ET AL., 1999b; JONGBLOED ET AL., 1992; SEYNAEVE ET AL., 2000b und RAPP, 1998) ermittelt. Eine größere Übereinstimmung zeigte sich mit den Werten von LANTZSCH ET AL. (1988a), die für eine semisynthetische Maisdiät einen pc Phytatabbau von 52% feststellten. Bei einem Vergleich des Phytatabbaus am terminalen Ileum sollte allerdings die genaue Position der Kanülen und somit des Ortes der Probenahme in Betracht gezogen werden. Je geringer die Entfernung zum *Ostium ileocaecocolicum*, desto höher ist möglicherweise der Einfluss der Mikroflora des Dickdarmes und damit verbunden der potenziellen Aktivität von Phytase. In der vorliegenden Untersuchung waren die T-Kanülen etwa 5 cm vor der Einmündung in das Caecum positioniert, während die Entfernung in anderen Untersuchungen zwischen 5 und 20 cm variierte (RAPP, 1998 [ileocaecale Umleitungskanüle, 5 cm]; JONGBLOED ET AL., 1992 [T-Kanüle, 12-15 cm]; SEYNAEVE, 2000a [T-Kanüle, 10 cm]; KEMME ET AL., 1999b [gesteuerte ileo-caecale Ventilkannüle, 0 cm]). Weiterhin ermittelten KEMME ET AL. (2006) für Phytat eine Verschwindensrate im Ileum von Schweinen von 27% für eine Phytase-inaktivierte Mais-SES-Diät; allerdings befanden sich die Kanülen im Caecum, wo höchstwahrscheinlich bereits eine gewisse Phytaseaktivität aufgrund der dort anwesenden Mikroflora anzutreffen war.

Ein verhältnismäßig hoher Phytatabbau in der proximalen (37%) und distalen (53%) Dünndarmhälfte bei wachsenden Schweinen wurde von LANTZSCH ET AL. (1988a) für eine Maisdiät im Schlachtversuch (2-3 h postprandial) nachgewiesen. Vergleiche mit Daten aus Schlachtversuchen (z. B. SCHLEMMER ET AL., 2001; SCHULZ UND OSLAGE, 1972 und LANTZSCH ET AL., 1988a), in denen der gesamte Inhalt eines Darmsegmentes gewonnen und analysiert wird, sind allerdings unter gewissem Vorbehalt vorzunehmen, da bei der Messung nur ein Zeitpunkt berücksichtigt wird, der Phytatabbau aber hohen tageszeitabhängigen Schwankungen unterliegt (KEMME ET AL., 1998).

Der Abbau von Phytat ist in erster Linie abhängig von der Futterzusammensetzung (siehe auch 2.2 und 2.3.3). Dabei spielt der Gehalt an Phytat in Verbindung mit der nativen Phytaseaktivität in den einzelnen Futterkomponenten eine bedeutende Rolle.

KEMME ET AL. (1998) stellten bei Vorlage einer Weizen-Gersten-Diät gegenüber einer Maisdiät einen weitaus höheren Phytatabbau bereits im Duodenum fest (47 vs. 3,4%), während die P-Verdaulichkeit in diesem Darmbereich für beide Diäten unverändert bei etwa 17% lag. Dies ist möglicherweise auf die geringere Löslichkeit des Phytats im Weizen gegenüber Mais zurückzuführen, die bereits vielfach nachgewiesen wurde (DE BOLAND ET AL., 1975; RAPP, 1998; SCHEUERMANN ET AL., 1988a).

So untersuchten auch SCHEUERMANN ET AL. (1988b) die Hydrolyse der Phytate aus Weizen und Gerste im Gastrointestinaltrakt von Ratten und stellten in der 2. Dünndarmhälfte für

Maisphytat einen höheren Abbau (73%) als für Weizenphytat (55%) fest. Ausgehend von diesen Beobachtungen könnte in der vorliegenden Untersuchung, in der ein hoher Anteil Mais in der BD zum Einsatz kam, evtl. die höhere Löslichkeit ein Erklärungsansatz für den relativ hohen Phytatabbau sein.

Die Löslichkeit des Phytats, welche eine Voraussetzung für dessen Abbau darstellt, hängt im Wesentlichen vom pH-Wert sowie der Ca-Konzentration im Gastrointestinaltrakt ab (LANTZSCH, 1990).

Die Intensität des Phytatabbaus im Magen ist abhängig von der Aufenthaltszeit des Chymus. Eine längere Verweildauer erhöht dabei die Löslichkeit des Phytats und führt dadurch zu einer besseren Wirkung pflanzeigener Phytasen, die im weiteren Verlauf des Verdauungstraktes keine Bedeutung mehr haben.

Bekanntermaßen verzögert Pektin die Magenentleerung (SCHWARTZ ET AL., 1982). Daraus könnte sich evtl. auch der um 4%-Punkte höhere pc Phytatabbau in dieser Behandlung ableiten lassen.

Denkbar ist darüber hinaus auch ein Einfluss der rationierten Futtermischung. Aufgrund der geringeren Menge an im Magen anflutendem Futterbrei könnten pflanzeigene Phytasen im Magen besser gewirkt haben.

Einen weiteren Erklärungsansatz für den hohen pc Phytatabbau könnte eine in Verbindung mit der marginalen P-Versorgung erhöhte Phytaseaktivität (intestinal oder mikrobiell) darstellen. Diese Art der Adaptation wurde beispielsweise bei Hühnern beobachtet (DAVIES ET AL., 1970). Von einer Anpassung der intestinalen Phytaseaktivität an den Bedarf wurde auch bei Legehennen berichtet, bei denen eine höhere absolute intestinale Bürstensaum-Phytaseaktivität entlang des Dünndarms festgestellt wurde als bei Broilern (MAENZ UND CLASSEN, 1998).

Auch im Gesamtrakt von Ratten stellten MOORE UND VEUM (1983) einen erhöhten Abbau von Phytat bei Verabreichung einer Diät mit marginalem P-Gehalt fest. Offenbar kommt dabei dem Gehalt an Phytat im Futter eine hohe Bedeutung zu. So konnte in einer Studie von LOPEZ ET AL. (2000) bei Ratten mit Steigerung des Phytatgehaltes in der Ration eine steigende Aktivität intestinaler Phytase sowie ein erhöhter Phytatabbau festgestellt werden. Eine Zunahme der Aktivität der alkalischen Phosphatase und Phytase im Dünndarm von Schweinen bei marginaler P-Versorgung, induziert durch die Substitution von Weizen durch Mais, fanden auch POINTILLART ET AL. (1984). In einer späteren Untersuchung, in der ein Mangel an vP durch den Ersatz von Triticale durch Mais hervorgerufen wurde, konnte dies jedoch nicht bestätigt werden (POINTILLART ET AL., 1987).

Vorstellbar ist, dass der pc Phytatabbau in der vorliegenden Untersuchung möglicherweise durch eine erhöhte mikrobielle Aktivität und die damit verbundene Wirkung mikrobieller Phytasen am terminalen Ileum verursacht wurde.

Während Cellulose und Pektin keinen signifikanten Effekt auf den Phytatabbau im pc Darmbereich verursachten, führte die Zulage von Maisstärke zu einer signifikanten Depression des pc Phytatabbaus und in dessen Folge zur Senkung der P-Verdaulichkeit. Was ursächlich für diesen Effekt gewesen sein könnte, ist unklar und kann nur vermutet werden.

Im Hinblick auf die Magenentleerung führte Stärke hingegen offenbar eher zu einer Verkürzung der Verweildauer des Futterbreis im Magen, wodurch eine Phytathydrolyse durch pflanzeigene Phytasen im Magen vermutlich kaum eingetreten ist.

Vorstellbar wäre weiterhin, dass der hohe Gehalt an Stärke in der Behandlung BDs von insgesamt 35% (25% Zulage + 10% GM) zur Etablierung von vorrangig Milchsäurebakterien und somit evtl., wie unter 6.2.1 beschrieben, zur Unterdrückung anderer Bakterienpezies mit höherer Phytaseaktivität geführt haben könnte.

In ihrer Übersichtsarbeit schrieben STEER UND GIBSON (2002) basierend auf eigenen Untersuchungen den Bakterienstämmen *Bifidobacterium* spp. sowie *Lactobacillus* spp. die Unfähigkeit zum Abbau von Phytat zu, wohingegen Spezies der Stämme *Bacteroides* spp. und *Clostridium* spp. Phytat in Isolaten menschlichen Darminhaltes weitaus besser metabolisieren konnten.

Aussagen zur Befähigung von Milchsäurebakterien zur Phytaseproduktion *in vitro* sind kontrovers. Die Mehrheit der Autoren konnte keine oder nur eine geringe Phytat-spaltende Aktivität sowie eine niedrige Spezifität für Phytat im Vergleich zu anderen Phosphatverbindungen nachweisen (ZAMUDIO ET AL., 2001, PALACIOS ET AL., 2005; GREINER ET AL., 2003). In ihrer Studie untersuchten REALE ET AL. (2007) die Phytaseproduktion von 50 aus Sauerteig isolierten Milchsäurebakterienstämmen und konnten bei keinem der Stämme eine nennenswerte intra- bzw. keine extrazelluläre Phytaseaktivität feststellen, unabhängig von der Ausgangskonzentration an Phytat, der Höhe der P-Versorgung sowie von der Art der Kohlenstoff-Quelle im Medium. In einer Untersuchung von YANKE ET AL. (1998) konnte für isolierte Bakterien der Spezies *Lactobacillus* sp. aus dem Pansen von Rindern keine Phytaseaktivität nachgewiesen werden.

Befunde über gewisse Phytat-spaltende Aktivitäten in bestimmten *Lactobacillus*-Stämmen liegen hingegen von DE ANGELIS ET AL. (2003), LOPEZ ET AL. (1983) und SREERAMULU ET AL. (1996) vor.

Eine höhere Unabhängigkeit amylolytischer Bakterien von der P-Versorgung könnte somit als weitere Ursache für den geringen pc Phytatabbau bei Zulage von Stärke gesehen werden. So stellte WIDER (2005) einen höheren P-Bedarf von Pansenbakterien für den Abbau von Cellulose und Pektin im Vergleich zu Stärke fest. Eine extreme Sensibilität von cellulolytischen im Gegensatz zu amylolytischen Bakterien gegenüber eines P-Mangels beobachteten KOMISARCZUK ET AL. (1987). Möglicherweise war also in der vorliegenden Untersuchung der P-Bedarf der am Stärkeabbau beteiligten Bakterien gedeckt.

Denkbar ist auch, dass durch die vermutlich geringere Aufenthaltsdauer des Chymus im Ileum in Verbindung mit der Stärkesupplementation Phytasen der dort ansässigen Mikroflora evtl. nur wenig Wirkung entfalten konnten.

Ein negativer Einfluss des Ca auf die Löslichkeit des Phytats, wie bei SCHULZ UND OSLAGE (1972) bzw. LANTZSCH (1990) beschrieben, scheint im Zusammenhang mit der Stärkezulage als Ursache für den verminderten Phytatabbau nicht in Betracht zu kommen, da bei dieser Behandlung im Vergleich zur BD keine Veränderung des ilealen pH sowie der pc Ca-Verdaulichkeit zu beobachten war.

Wie aus Abb. 5 (5.1) ersichtlich wird, führte der Abbau von Phytat zur Entstehung niederphosphorylierter Inositolphosphate. Dies wird besonders für die Behandlungen BD und BDc deutlich und ist trotz eines leicht höheren Phytatabbaus weniger ausgeprägt, wenn den Tieren Pektin verabreicht wurde. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass sich besonders in dieser Behandlung, vermutlich unter Beteiligung alkalischer Phosphatasen des Dünndarms, ein schneller Abbau der niederphosphorylierten IP vollzogen hat. Alkalische Phosphatase ist maßgeblich am Abbau von $IP_{<6}$ beteiligt und wurde in teils beachtlicher Aktivität v.a. im Dünndarm von Schweinen nachgewiesen (POINTILLART ET AL., 1984; LANTZSCH ET AL., 1988b; SCHLEMMER ET AL., 2001).

Da bei Zulage von Stärke Phytat nur in geringem Maße abgebaut wurde, unterscheidet sich das IP-Muster des Ileumchymus in dieser Behandlung kaum von dem des Futters.

Trotz des verhältnismäßig hohen pc Phytatabbaus in den Behandlungen BD, BDc und BDp blieb die pc Verdaulichkeit des P gering. Ein positiver Zusammenhang zwischen der Höhe des Phytatabbaus und der Absorption von P scheint daher nicht zwangsläufig zu bestehen. Offenbar findet die Hydrolysierung von Phytat verstärkt im Bereich des terminalen Ileums statt, wobei in diesem Darmbereich kaum noch P absorbiert wird.

In einer Studie von VEMMER UND OSLAGE (1973) wurde einer phytasefreien semisynthetischen Diät Ca-Phytat zugelegt und bei Unterstellung einer 100%igen Absorption von NPP keine Absorption von Phytat-P beobachtet, obwohl Phytat-P im Kot der Schweine nur noch in Spuren nachgewiesen werden konnte.

Trotz der postulierten hohen Löslichkeit des Maisphytats (DE BOLAND ET AL., 1975; RAPP, 1998; SCHEUERMANN ET AL., 1988a) war der Phytat-P aus Mais offenbar kaum verwertbar. Auch DÜNGELHOEF ET AL. (1994) und LANTZSCH ET AL. (1988b) fanden in jungen Schweinen bei marginaler P-Versorgung eine deutlich geringere scheinbare VQ-P für eine Maisdiät im Vergleich zu einer Weizendiät.

Obwohl bei Zulage von Pektin pc scheinbar mehr Phytat abgebaut wurde, lag die VQ-P in dieser Behandlung mit lediglich 17% deutlich unter den Werten der BD. Eine ähnliche

Beobachtung machten SEYNAEVE ET AL. (2000a, b), die trotz eines durch supplementierte Phytase verdreifachten pc Phytatabbaus keine Auswirkung auf die pcVQ-P feststellen konnten. Die Autoren vermuteten in diesem Zusammenhang eine erhöhte P-Inkorporation in Bakterienmasse.

Die mittlere pc P-Verdaulichkeit für die Basaldiät lag mit 26% in einem für Mais-SES-Diäten ohne mineralische P-Ergänzung typischen Bereich. JONGBLOED ET AL. (1992) ermittelten für Diäten mit 86% Mais und 12% SES Verdaulichkeitsquotienten für P von 26%.

Ein Einfluss der Cellulose auf die pcVQ-P war in der eigenen Untersuchung nicht zu beobachten. P wurde in etwa derselben Höhe verdaut wie in der Kontrolle.

Über den Einfluss einer Cellulosezulage auf die pc P-Verdaulichkeit liegen kontroverse Ergebnisse vor. PARTRIDGE (1978a) fand ebenfalls keinen Effekt von 3 bzw. 9% Holzcellulose auf die pc Verdaulichkeit von P, während DROCHNER (1984) bei Zulage von 5% Cellulose eine signifikante Abnahme der pcVQ-P bei Miniaturschweinen feststellte.

Die tendenzielle Abnahme der pc P-Verdaulichkeit trotz einer leichten Erhöhung des Phytatabbaus in Verbindung mit der Pektingabe legen die Vermutung nahe, dass es in dieser Behandlung bereits am terminalen Ileum aufgrund der dort einsetzenden Fermentation zu einer erhöhten Inkorporation von P in Bakterienmasse und somit zu einer verminderten P-Absorption gekommen ist.

DEN HARTOG ET AL. (1988) stellten bei einer Zulage von 5% Pektin ebenfalls eine tendenzielle Verringerung der pc P-Verdaulichkeit fest.

SANDBERG ET AL. (1983) fanden bei Ileostomie-Patienten hingegen keinen Einfluss einer Zulage von 15 g Zitruspektin auf die pcVQ von P und Ca, was allerdings evtl. u. a. auf die sehr kurze Versuchsdauer von insgesamt zehn Tagen zurückgeführt werden kann, wobei die Pektinvorlage auf die Tage 5, 6 und 7 beschränkt war.

Während sich für Stärke als auch Cellulose kein Effekt auf die pcVQ-Ca zeigte, war diese bei Zulage von Pektin um nahezu die Hälfte (28%-Punkte) reduziert. Der daraus resultierende gesteigerte Ca-Fluss führte zu einer Erweiterung des Ca:tP-Verhältnisses im Ileumchymus von 1,8:1 auf 2,4:1 (Anhang, Tab. A-29). Der Einfluss des Pektins auf die VQ-Ca soll an späterer Stelle diskutiert werden.

Phytatabbau und Verdaulichkeit von P und Ca im pi Darmabschnitt und im Gesamttrakt

Der vollständige Abbau des noch vorhandenen Phytats im Dickdarm findet sich in anderen Untersuchungen bestätigt (SCHLEMMER ET AL., 2001; LANTZSCH ET AL., 1988a, SCHULZ UND OSLAGE, 1972; SEYNAEVE ET AL., 2000b, SANDBERG ET AL., 1993; JONGBLOED ET AL., 1992) und wird hauptsächlich von mikrobiellen Phytasen der Darmflora bewirkt.

Das Vermögen der Mikroorganismen der Dickdarmflora zur Spaltung von Phytat ist hoch, während die Intensität des Abbaus u. a. vom pH-Wert und den Konzentrationen an Phosphat, Phytat und Ca abhängt (GREINER, 2007). Die hohe Phytathydrolyse im Dickdarm führt entsprechend zu Werten für den Phytatabbau im Gesamttrakt von nahezu 100%. So berichten SCHLEMMER ET AL. (2001) von Unterschieden im pc Phytatabbau bei Einsatz einer phytaseinaktivierten Diät im Vergleich zu einer Kontrolldiät, während der Abbau im Gesamttrakt in beiden Behandlungen nahezu 97% betrug.

Auch SCHEUERMANN ET AL. (1988b) fanden für Phytat aus Weizen bzw. Mais trotz großer pc Unterschiede eine einheitliche Hydrolyse im Caecum von Ratten von 83%.

In der vorliegenden Untersuchung kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass eine evtl. eingetretene Nachfermentation zu einem vollständigen Abbau von Inositolphosphaten erst im Kot geführt haben könnte, da die Kotproben über Nacht teilweise längere Zeit in den Kotbeuteln verblieben und auch keine Ansäuerung vorgenommen wurde. So berichteten beispielsweise SCHEUERMANN ET AL. (1988b), dass in gefrorenen Chymusproben von Ratten nach 14-tägiger Lagerung noch 50% des unmittelbar nach der Sammlung vorhandenen Phytats abgebaut wurden. Auch PALLAUF ET AL. (1992) stellten in Vorversuchen einen vollständigen Abbau des verbliebenen Phytats in abgesetztem Kot von Ferkeln fest. Eine Phytaseaktivität in Höhe von 340 U/kg T konnten KEMME ET AL. (1997) noch in frischem Faeces von Schweinen nachweisen.

Eine Absorption von Phytat in die Zellen der Mukosa aufgrund der hohen negativen Ladung des Moleküls ist nach Angaben von KEMME ET AL. (2006) unwahrscheinlich. Zu dieser Aussage kamen die Autoren als sie bei Zulage eines IP-Gemisches zu einer Phytaseinaktivierten Mais-SES-Diät feststellten, dass Phytat weder im Duodenum noch im Ileum von Schweinen verschwand.

Im Gegensatz zu Menschen und Ratten, bei denen GRASES ET AL. (2000, 2001) eine gewisse Phytat-Ausscheidung mit dem Harn feststellten, wurde in Schweinen bisher weder eine Absorption noch die renale Ausscheidung von Phytat nachgewiesen.

Trotz des vollständigen Abbaus von Phytat in allen Behandlungen liegen in dieser Untersuchung, in Abhängigkeit der zugelegten KH-Quelle, sowohl negative als auch positive Werte für die VQ-P im pi Darmbereich vor. Entsprechend sind diese Werte als Nettoabsorption bzw. –sekretion von P aus dem bzw. in den Dickdarm zu werten. Für die Nettobewegungen von Ca im Dickdarm konnte dagegen einheitlich eine scheinbare Nettosekretion festgestellt werden. Die mittleren piVQ für P und Ca sind allerdings mit hohen Standardfehlern behaftet (siehe 6.1.2) und daher unter Vorbehalt zu interpretieren. Es können somit nur spekulative Aussagen über die Bedeutung des Dickdarms an den Umsetzungen von P getroffen werden. Dies entspricht auch der kontroversen Meinung, wie

sie in der Literatur anzutreffen ist und an späterer Stelle ausführlicher diskutiert werden soll.

Wie eingangs erwähnt, wird P vorwiegend im Dünndarm verdaut, (PARTRIDGE, 1978a; MOORE UND TYLER, 1955a; SMITH ET AL., 1955). Dies bestätigen auch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, in der ein Großteil des P bereits im praecaecal verdaut wurde. Bei Zulage von Cellulose bzw. Pektin wurden postileal negative Verdaulichkeitsquotienten ermittelt, was auf eine Nettoekretion von P ins Lumen des Dickdarms hindeutet, während bei den Tieren der Kontrolle sowie der stärkesupplementierten Behandlung eine P-Absorption beobachtet wurde, da P aus dem Lumen des Dickdarms verschwand.

Als mögliche Ursachen für eine Sekretion kommen im Wesentlichen zwei Erläuterungsansätze in Betracht. Zum einen ein durch die intensive Fermentation erhöhter mikrobieller P-Bedarf und zum anderen die gesteigerte endogene Sekretion von P, ausgelöst durch mechanische Stimulation der Mukosa und der damit verbundenen Vergrößerung des Darmvolumens. Die Applikation von Pektin führte wahrscheinlich in Folge der bakteriellen Fermentation und des damit verbundenen mikrobiellen Wachstums zu einer drastischen Erhöhung des mikrobiellen P-Bedarfes der Mikroben.

Vergleichbar mit einem Mangel an N, bewirkt ein P-Mangel im Pansen von Wiederkäuern eine reduzierte Faserverdauung, verursacht durch eine limitierte mikrobielle Aktivität, woraus auch eine Abnahme der mikrobiellen Proteinsynthese resultiert (MCDOWELL, 2003; PETRI ET AL., 1988).

Bei exzessiver P-Versorgung sind Bakterien im Stande, P über ihren Bedarf hinaus zu inkorporieren und in Form von anorganischen Polyphosphaten zu speichern (WOOD UND CLARK, 1988). Demgegenüber führt ein P-Mangel zu einer Reduzierung der mikrobiellen Proteinsynthese und wirkt sich begrenzend auf die Intensität der mikrobiellen Fermentation und den damit verbundenen Abbau von Faser aus. Dies wurde vielfach für Wiederkäuer beschrieben (DURAND UND KOMISARCZUK, 1988; BREVES UND HÖLLER, 1986).

Wie bereits angesprochen, hängt die Höhe des mikrobiellen P-Bedarfs stark von der Art des verfügbaren KH-Substrats ab (WIDER, 2005; KOMISARCZUK ET AL., 1987; DURAND UND KOMISARCZUK, 1988), wobei vor allem der Abbau von Cellulose und, in geringerem Maße, auch von Pektin mehr P erfordert als beispielsweise für den Abbau von Stärke notwendig ist.

Offenbar war in der Behandlung BDP die Menge an P, die beim Abbau der Inositolphosphate im Dickdarm freigesetzt wurde, nicht ausreichend, um den mikrobiellen P-Bedarf zu decken, was eine erhöhte Sekretion endogenen P induziert haben könnte.

Einen weiteren Hinweis auf die Bedeutung der P-Versorgung für die intestinale Bakterienmasse erbrachte HOVENJÜRGEN (2000). Bei Einsatz von 46% Melassetrockenschnitzeln in einer P-armen semisynthetischen Grundmischung stellte er eine signifikante Reduzierung der P-Nettoabsorption im Gesamtrakt von 74 auf 14% fest.

Im Gegensatz dazu hatte eine Zulage von 25% Pektin zu einer vergleichbaren aber mit Mononatriumphosphat (5 g/kg) supplementierten Grundmischung keinen Effekt auf die Nettoabsorption von P, welche sich mit 81% auf nahezu gleichem Niveau bewegte wie in der Kontrolle.

Als mögliche Ursache dessen kann in diesem Zusammenhang die Versorgung mit vP eine Rolle gespielt haben. In beiden genannten Versuchen wurde eine marginale P-Versorgung realisiert, allerdings wurden mit der Pektin-supplementierten Diät 2,95 g/d (vorwiegend aus MNaP) aufgenommen, während die P-Versorgung bei Zulage von Melassetrockenschnitzeln mit 1,27 g/d deutlich geringer war. Es ist somit denkbar, dass es bei Vorlage der letztgenannten Ration möglicherweise zu einer stärkeren Begrenzung der mikrobiellen P-Versorgung und einem damit verbundenen mikrobiellen P-Mangel im Darmtrakt der Schweine gekommen sein kann. Dies könnte, wie in der vorliegenden Untersuchung, evtl. zu einer erhöhten endogenen Sekretion (besonders im Bereich des Dickdarmes) und, in Folge dessen, zu einer Verringerung der P-Nettoabsorption geführt haben. Eine weitere Ursache könnte auch in dem, im Vergleich zu isoliertem Pektin, höheren Rohfasergehalt der Melassetrockenschnitzel gesehen werden. Aufgrund der unter 2.5.6 beschriebenen Eigenschaften kann die enthaltene Rohfaser *per se* bereits eine Depression der VQ-P verursacht haben.

Ein weiteres Indiz für einen Einfluss der Mikroflora auf die Verdaulichkeit von Phosphor fanden auch RAVINDRAN ET AL. (1984), indem sie bei Supplementation des Antibiotikums Virginiamycin zu einer faserreichen Mais-SES-Hafer-Diät einen Anstieg der P-Verdaulichkeit von 58 auf 63% feststellten. Wurde Virginiamycin der faserarmen Mais-SES-Ration zugelegt, konnte keine Veränderung der P-Verdaulichkeit (55 vs. 55%) beobachtet werden. Die deutliche Ausprägung der Wirkung des Antibiotikums in Kombination mit der faserreichen Ration lässt sich einerseits auf eine Förderung des mikrobiellen Wachstums durch die Haferfaser und andererseits auf eine massive Unterdrückung der mikrobiellen Aktivität durch die Verabreichung des Virginiamycins zurückführen.

AGUDELO ET AL. (2007) prüften den Einfluss von Virginiamycin auf die Verdaulichkeit und Verwertung von P bei wachsenden Schweinen erstmals in Verbindung mit einer P-defizitären Mais-SES-Ration. Dabei stellten sie eine signifikante Erhöhung der P-Verdaulichkeit im Gesamtrakt von 30 auf 39% fest, wenn Virginiamycin in einer Menge von 11 mg/kg Futter verabreicht wurde. Auch die P-Verwertung war signifikant gesteigert. Die Autoren führten dies auf die Hemmung der Mikroben und eine somit geringere mikrobielle P-Bindung im Dickdarm zurück. Aufgrund dieser Beobachtungen ist daher festzuhalten, dass die VQ-P bei Unterdrückung der mikrobiellen Aktivität erhöht ist.

Besonders im Falle der Cellulosezulage ist eine stimulierte endogene Sekretion von Darmsaft durch fasertypische mechanische Reize, verbunden mit der erhöhten Abschilferung von Darmzellen (DROCHNER, 1993; LOW, 1989) und damit der Eintrag von P

ins Darmlumen wahrscheinlicher. Vermutlich führte die erhöhte Darmfüllung verbunden mit der beschleunigten Chymuspassage zu einer aufgrund der Hypertrophierung vermehrten Zellteilungsrate und einer verstärkten Abschilferung von Darmzellen.

Die geringfügige Absorption bei Verabreichung der Kontrolle sowie der Stärke-supplementierten Diät könnte evtl. damit zu erklären sein, dass die postilealen Fermentationsprozesse in diesen beiden Behandlungen ein weitaus geringeres Ausmaß annahmen als dies bei Zulage von Pektin bzw. Cellulose der Fall war, und daher der mikrobielle P-Bedarf aus dem Abbau des noch vorhandenen IP gedeckt werden konnte. Auch eine mechanische Stimulation der endogenen Sekretion scheint in diesem Zusammenhang keine Rolle gespielt zu haben, da OS bereits im pc Darmbereich weitestgehend abgebaut war. Ob es sich bei dem Anteil an absorbiertem P um unverdauten NPP aus dem Futter, P endogenen Ursprungs oder freigesetzten P aus dem IP-Abbau handelte, konnte in dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Da in der BDs anflutendes Phytat postileal noch vollständig abgebaut wurde, ist anzunehmen, dass zumindest ein Teil der freigesetzten P-Menge von insgesamt 1,03 g/d im Dickdarm absorbiert wurde, gewissermaßen als eine Art Ausgleich der verminderten pc P-Verdaulichkeit.

Im Bereich des Dickdarms wurden in allen Behandlungen negative Werte für die VQ-Ca des ileocaecal einfließenden Chymus ermittelt, was auf eine Nettosekretion von Ca in das Lumen hindeutet. Aufgrund der hohen Standardfehler konnten für die KH keine Effekte ausgemacht werden. Die höchsten Nettosekretionen ließen sich jedoch bei Zulage von Stärke bzw. Pektin nachweisen. Dabei scheint auch die Umsetzung von Ca im Dickdarm von der Mikroflora beeinflusst zu sein. So stellten RAVINDRAN ET AL. (1984) in der oben beschriebenen Untersuchung auch einen Anstieg der Ca-Verdaulichkeit (56,5 auf 66,1%) im Gesamtrakt von Schweinen fest wenn einer faserreichen Diät ein Antibiotikum zugesetzt wurde, während sich in Verbindung mit einer faserarmen Diät kein Effekt auf die VQ-Ca (63,5 bzw. 62%) zeigte. Auch von AGUDELO ET AL. (2007) konnte durch den Zusatz von Virginiamycin eine Steigerung der scheinbaren Ca-Verdaulichkeit im Gesamtrakt von Schweinen nachgewiesen werden.

Die Angaben zu Umsetzungen von P und Ca im postilealen Darmabschnitt in der Literatur gestalten sich äußerst kontrovers. Es liegen Befunde sowohl über eine teils beachtliche Absorption als auch über eine Sekretion von P und Ca im Dickdarm vor. Andere Autoren konnten weder eine Absorption noch eine Sekretion feststellen.

Postileale Verschwindensraten von 26 bzw. 39% bezogen auf die am terminalen Ileum anflutenden Mengen an P bzw. Ca ermittelten beispielsweise SEYNAEVE ET AL (2000a) für Schweine bei Vorlage einer Mais-SES-Tapiokadiät mit geringem P-Gehalt.

BAGHERI UND GUEGUEN (1983) stellten bei Schweinen, denen ^{32}P und ^{45}Ca ins Caecum infundiert wurde eine pi Absorption von 28% für P bzw. 8,5% für Ca fest.

BRUCE UND SUNDSTØL (1995) fanden bei wachsenden Schweinen mit Caecum-T-Kanülen, denen sie eine auf Hafer und SES basierende Diät mit hohen Gehalten an Phytat und Rohfaser vorlegten, im Gesamtrakt eine mit 51% um 9%-Punkte höhere P-Verdaulichkeit gegenüber den im Caecum ermittelten Werten von 42%. Offenbar bewirkte der hohe Gehalt an fermentierbarer Substanz im Dickdarm eine Stimulation des Mikrobewachstums und durch mikrobiellen Phytatabbau freigewordenes Phosphat konnte zu einem gewissen Anteil postileal absorbiert werden. Auch für Ca wurden im Gesamtrakt um 8%-Punkte höhere VQ ermittelt.

Einen Anstieg sowohl der P- (um 13,8 %-Punkte) als auch der Ca-Verdaulichkeit (um 9,9%-Punkte) vom terminalen Ileum auf Ebene des Gesamtraktes verzeichneten auch DEN HARTOG ET AL. (1988) bei P-übersorgten Schweinen, denen sie eine Mais-Gersten-Diät vorlegten. Wurde dieser Diät 5% Cellulose zugelegt, zeigte sich keine Veränderung der für den Dickdarm ermittelten Differenz. Bei Zulage von Pektin beobachteten die Autoren hingegen einen deutlichen Anstieg dieser Differenz auf 21 bzw. 13%-Punkte für P bzw. Ca. In dieser Behandlung wurde offensichtlich der tendenziell negative Einfluss des Pektins auf die VQ von P und Ca auf pc Ebene kompensiert.

Höhere Verdaulichkeitsquotienten für den Gesamtrakt als auf pc Ebene bei Verfütterung einer Hirsediät (marginale P- und Ca-Versorgung) an wachsende Schweine konnten O'QUINN ET AL. (1997) ausmachen.

In einer *in vitro*-Untersuchung zeigten LEE ET AL. (1980), dass P-Transportmechanismen im Colon der Ratte bei bedarfsdeckender Versorgung mit verdaulichem Phosphor und einem Ca:vP-Verhältnis von 2,5-3:1 einen passiven Vitamin D unabhängigen P-Transport ermöglichen. Über derartige Transportmechanismen im Colon des Schweins lagen der Autorin bislang keine Belege vor.

Im Gegensatz zu einer Absorption, sind in der Literatur auch zahlreiche Untersuchungen zu finden, in denen eine Abnahme der VQ für P bzw. Ca von pc auf Ebene des Gesamtraktes, und damit eine Nettosekretion in den Dickdarm beschrieben wurde. Beispielhaft dafür sei eine Studie von LARSEN UND SANDSTRÖM (1993) genannt, die geringere Werte für die P-Verdaulichkeit im Gesamtrakt (32%) im Vergleich zum pc Darmabschnitt (45%) zeigt, wenn wachsenden Schweinen eine Diät vorgelegt wurde, deren Hauptkomponenten entfettetes Rapsextraktionsschrot und Maisstärke darstellten.

Auch PARTRIDGE (1978a) konnte im Bereich des Dickdarms von Schweinen bei adäquater P-Versorgung eine signifikante P-Sekretion feststellen, allerdings war dies nur bei Verabreichung einer Diät bestehend aus Maisstärke, Saccharose und Erdnussmehl der Fall. Erhielten die Schweine hingegen eine auf Getreide basierende oder eine semisynthetische Diät, deren Hauptkomponenten Maisstärke, Saccharose und Casein darstellten, waren bei den Tieren keine signifikante Bewegungen von P im Dickdarm zu beobachten. Ausgehend von diesen Ergebnissen unterstellte PARTRIDGE (1978a) eine enge Beziehung zwischen der

Futterzusammensetzung und den P-Umsetzungen im Gastrointestinaltrakt, wobei er dem Dickdarm keinerlei Bedeutung für die Absorption von P beimaß.

Einen weiteren Nachweis für den Einfluss der Ration auf die P-Umsetzungen, speziell im Dickdarm, erbrachten JONGBLOED ET AL. (1992). Legten sie Schweinen eine Mais-SES-Diät mit marginalem P-Gehalt vor, so ermittelten sie geringere Verdaulichkeitsquotienten für den Gesamttrakt von lediglich 13% im Vergleich zum pc Darmabschnitt (26%). Dies deutet auf eine P-Sekretion in den Dickdarm hin. Fütterten sie hingegen eine auf Tapioka und Maisfuttermehl basierende Diät, konnten die Autoren einen Anstieg der P-Verdaulichkeit im Gesamttrakt auf 28% gegenüber pc Werten von 16% beobachten, was wiederum auf eine beachtliche Absorption im Dickdarm hindeutet. Als Ursachen können unter anderem Unterschiede in der scheinbaren P-Verdaulichkeit angegeben werden, die für Tapiokaschrot mit 10% deutlich geringer ist als für SES mit 38% (JONGBLOED UND KEMME, 1990). Es ist anzunehmen, dass diese Differenz besonders auf pc Ebene anzutreffen ist und auf pi Ebene somit evtl. eine Kompensation der geringen pc Absorption stattfindet.

In einem Bilanzversuch mit fistulierten Schweinen fanden VANHOOF UND DE SCHRIJVER (1996) bei Vorlage einer semisynthetischen Diät mit 37% Gerste und 17% Weizen und adäquater P-Versorgung deutlich höhere VQ für P und Ca im Bereich des Dünndarms als im Gesamttrakt. Die Autoren postulierten daher eine beachtliche Sekretion dieser beiden Mineralstoffe in den Dickdarm, wobei die Höhe der Sekretion von einer Zulage von 6% Inulin weitestgehend unberührt blieb.

Die in den Dickdarm sekretierte Menge an P und Ca lässt sich nicht abschließend und allein durch den Zellverlust der Darmschleimhaut erklären, vielmehr könnten diesbezüglich nicht klar identifizierbare Einflüsse des Futters in Betracht gezogen werden, wobei offenbar die Struktur und die Fermentierbarkeit der Komponenten von Bedeutung ist.

In Untersuchungen, in denen die wahre P-Verdaulichkeit aus SES in wachsenden Schweinen (DILGER UND ADEOLA, 2006; AJAKAIYE ET AL., 2003) und Ferkeln (FAN ET AL., 2001) mittels regressionsanalytischem Ansatz ermittelt wurde, konnten keine Unterschiede in der P-Verdaulichkeit zwischen pc Abschnitt und Ebene des Gesamttraktes festgestellt werden. Ausgehend von diesen Ergebnissen unterstellten AJAKAIYE ET AL. (2003) eine vernachlässigbare Rolle des Dickdarms an der Verdauung und Verwertung des P aus SES. Nach Meinung der Autoren fehlen dem Dickdarm entsprechende Mechanismen, die für den transzellulären Transport von anorganischem Phosphat in die Mukosa notwendig sind. AJAKAIYE ET AL. (2003) wiesen in den Faeces einen Anteil zwischen 12 und 16% wasserlöslichen anorganischen Phosphats am Gesamt-P nach (am terminalen Ileum 3-4%), wobei dieser, der Absorption entgangene Anteil den Autoren zufolge vornehmlich dem Abbau von Phytat entstammt.

Einen ähnlich hohen Anteil wasserlöslichen anorganischen Phosphats von 16-19% am Gesamt-P konnten SHEN ET AL. (2002) bei der regressionsanalytischen Bestimmung der wahren P-Verdaulichkeit von Mais im Kot von wachsenden Schweinen feststellen,

während im Ileumchymus nur etwa 5% wasserlösliches anorganisches Phosphat enthalten war. Hinsichtlich der Höhe des endogenen P-Outputs konnten die Autoren keinen Unterschied zwischen den Werten des terminalen Ileums und des Kotes ausmachen. Für die wahre VQ-P aus Mais ermittelten sie Werte zwischen 54% (Ileum) und 60% (Kot).

Ein weiteres Indiz dafür, dass ein vollständiger Phytatabbau im Dickdarm, selbst bei defizitärer P-Versorgung, nicht zwangsläufig zu einer Absorption des freigesetzten Phosphats führt, liefert eine Untersuchung von KEMME ET AL. (1999c). Während die Autoren in Faeces von P-unterversorgten Schweinen, denen eine Diät mit geringer pflanzeigener Phytaseaktivität und hohem Gehalt an Phytat vorgelegt wurde, nahezu keine höher phosphorylierten Inositolphosphate mehr finden konnten, bestimmten sie eine hohe Konzentration an anorganischem Phosphat.

In der bereits oben angeführten Untersuchung von SCHLEMMER ET AL. (2001) traten keine Unterschiede zwischen einer phytaseinaktivierten Diät und deren Kontrolle hinsichtlich des Phytatabbaus im Gesamttrakt auf (97%), wohl aber in der scheinbaren Verdaulichkeit des P, die für die phytaseinaktivierte Diät lediglich bei 30% lag, während 46% des P aus der Kontrolldiät scheinbar verdaut wurden. Dementsprechend bezeichneten SCHLEMMER ET AL. (2001) den aus dem Abbau von Phytat stammenden P im Dickdarm als „kaum absorbierbar“ und „ohne physiologische Relevanz“.

BIEHL UND BAKER (1997) konnten bei marginaler P-Versorgung von caeectomierten im Vergleich zu intakten Broilern keinen Unterschied im Aschegehalt der Tibia finden. Die Autoren maßen daher der mikrobiellen P-Freisetzung im Caecum keine Bedeutung für den P-Stoffwechsel bei. Offenbar findet im Caecum von Broilern ebenfalls keine Absorption des aus der Phytathydrolyse freigesetzten P statt.

Eine Abhängigkeit der postilealen P-Umsetzungen von der Häufigkeit der Futtervorlage konnten MROZ ET AL. (1994) feststellen. Obwohl die Nettobewegungen von P im Dickdarm äußerst gering waren, beobachteten sie bei einmaliger Futtervorlage die höchste postileale Sekretion von P bzw. Ca (7,3 bzw. 4,1%-Punkte höhere pc als ttVQ-P) im Vergleich zu zweimaliger Futtervorlage. Wurde den Schweinen siebenmal täglich Futter vorgelegt, beobachteten sie sogar eine geringfügige Absorption von P und Ca im Dickdarm.

Als mögliche Ursachen zogen die Autoren die bei einmaliger Futtervorlage höhere Darmfüllung in Betracht. Dadurch wurde Futterbrei vermutlich schneller „nachgeschoben“ und hatte somit eine geringere Aufenthaltszeit im Dickdarm. Mit der hohen Darmfüllung und der beschleunigten Darmpassage könnte eine Verminderung der Absorptionskapazität einhergegangen sein. Zudem kann auch die höhere mechanische Belastung der Mukosa durch den Druck des Darminhaltes zu einer Stimulierung der endogenen Sekretion von P und Ca geführt haben.

Im Gesamtrakt lag die mittlere P-Verdaulichkeit für die BD bei 28%. In einer Untersuchung von JONGBLOED UND KEMME (1990) wurden für die scheinbare Verdaulichkeit des P in Mais bzw. SES im Gesamtrakt von Schweinen Werte von 17 bzw. 38% ermittelt. Für eine Diät basierend auf 86% Mais und 11% SES fanden KEMME ET AL. (1999b) im Gesamtrakt eine Verdaulichkeit für P zwischen 22 und 25%.

Eine Depression der Ca-Verdaulichkeit war im Gesamtrakt nur bei Zulage von Pektin zu beobachten. Vergleichbar mit dem Effekt des Pektins im pc Darmbereich wurde in der BDp mit 30% nur halb soviel Ca verdaut wie in der Kontrolle. Dadurch kam es zu einer Erweiterung des Ca:tP-Verhältnisses im Kot von 1,7:1 auf 2,5:1.

BAGHERI UND GUEGUEN (1983) beschrieben senkende Effekte auf die Verdaulichkeit von Ca durch eine Bildung von Pektin-Ca-Chelaten, allerdings war dies hauptsächlich bei niederveresterten Pektinen zu beobachten. Während die Atoren für niederverestertes Apfelpektin *in vitro* eine Bindungskapazität für ⁴⁵Ca von 93% ermittelten, lag der Wert hingegen für Pektin mit einem Veresterungsgrad von >72% nur bei 59%. Das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Apfelpektin wies einen Veresterungsgrad von 72% auf. Die Carboxyl-Gruppen waren demnach zum Großteil mit Methanol verestert und stellten somit keine Bindungsstellen für Ca dar.

Die Verminderung der VQ-Ca in Verbindung mit der Zulage von Pektin kann nicht hinreichend erklärt werden.

Die Ergebnisse zur renalen P-Ausscheidung zeigen, dass eine suboptimale P-Versorgung nach den von KIRCHGESSNER (1994) angegebenen Kriterien tatsächlich vorgelegen hat. Erwartungsgemäß war die renale P-Ausscheidung für alle Behandlungen mit weniger als 1% der P-Aufnahme (Ausnahme: BDc) sehr gering. In beiden Versuchen wurden zwischen 18 und 29 mg P/d renal ausgeschieden. Lediglich bei Zulage von Cellulose wurde 2,3% des aufgenommenen P mit dem Harn ausgeschieden, was infolgedessen zu einer leichten Abnahme der P-Bilanz führte. Diese Beobachtung konnte allerdings bei Zulage von 15% Cellulose (Versuch Ib) nicht bestätigt werden.

Die renale Exkretion von Ca lag um etwa ein Hundertfaches über der renalen P-Ausscheidung und war durch die Zulage von Pektin signifikant vermindert. Dies könnte unter Umständen auf eine Art Kompensation der erhöhten faecalen durch eine reduzierte renale Ca-Exkretion zurückzuführen sein. In Versuch Ib konnte der Effekt des Pektins allerdings nicht nachgewiesen werden.

Die Einschränkung der renalen P-Exkretion bei marginaler P-Versorgung findet in zahlreichen Untersuchungen Bestätigung (ZIMMERMANN ET AL., 2002; BERK UND SCHULZ, 1996; LANTZSCH ET AL., 1988b; POINTILLART ET AL., 1987)

In Situationen defizitärer P-Versorgung führen homöostatische Prozesse zu einer Erhöhung der intestinalen Absorption bei gleichzeitiger Reduzierung der renalen Ausscheidung von P

durch erhöhte Reabsorption aus den Tubuli der Nieren (POINTILLART ET AL., 1984; SCHRÖDER ET AL., 1996). Generell führt eine marginale Versorgung mit vP zu einer nahezu vollständigen Retention des absorbierten P. Parallel dazu verursacht eine P-Mangelsituation (Hypophosphatämie) Störungen im Ca-Stoffwechsel. Ein Einbau von Ca und P in Knochensubstanz erfolgt im Verhältnis von 2:1 (JEROCH ET AL., 1999). Da durch die verminderte absolute Absorption Phosphat in nur geringem Umfang mineralisiert werden kann, ist die Ca-Einlagerung ebenfalls vermindert, auch wenn ausreichend Ca absorbiert wurde, was einen erheblichen Anstieg der renalen Ca-Exkretion zur Folge hat (Hypercalciurie) (LANTZSCH ET AL., 1888b).

So fanden beispielsweise LANTZSCH ET AL. (1988b) bei marginaler P- und Ca-Versorgung eine starke Einschränkung der renalen P-Exkretion auf von 7,1 auf 0,5% der P-Aufnahme, wenn jungen Schweinen bei gleichem Gesamt-P-Gehalt Mais statt Weizen als Hauptkomponente vorgelegt wurde (Hypophosphaturie). Die renale Ca-Exkretion war hingegen signifikant von durchschnittlich 5,3 auf 25% erhöht, da durch die reduzierte P-Absorption auch deutlich weniger Ca retiniert wurde (Hypercalcurie). Hypophosphatämie, Hypophosphaturie (5,5 vs. 0,5% der P-Aufnahme) und Hypercalciurie (2,5 vs. 8,7% der Ca-Aufnahme) zeigten auch Untersuchungen von POINTILLART ET AL. (1987) in wachsenden Schweinen mit marginaler P-Versorgung bei Ersatz von Triticale durch Mais. In einer Studie von BERK UND SCHULZ (1996) schieden wachsende Schweine bei Inaktivierung der Phytaseaktivität einer Getreidediät lediglich 0,9% des aufgenommenen P, allerdings 10,7% des aufgenommenen Ca mit dem Harn aus. Im Vergleich zur unbehandelten Basaldiät mit 4,8 bzw. 1,7% renaler P- bzw. Ca-Ausscheidung stellte dies eine ausgeprägte Hypophosphaturie bzw. Hypercalciurie dar.

Hypercalciurie wurde auch beobachtet bei Ratten in Verbindung mit einer marginalen P-Versorgung (MOORE UND VEUM, 1983)

6.2.4 Einfluss der KH-Substrate auf die Umsetzungen von N

Entsprechend der Erwartungen zeigten die drei eingesetzten KH-Substrate eine sehr differenzierte Wirkung auf die Umsetzungen von N im Verdauungstrakt.

Die Supplementation mit Stärke hatte keinen Einfluss auf die Verdaulichkeit des N im pc Darmbereich. Da Stärke am terminalen Ileum bereits nahezu vollständig verdaut war, lag auch die VQ-N im pi Darmabschnitt auf etwa dem gleichen Niveau wie für die BD. Demnach war kein Effekt auf die faecale N-Ausscheidung zu beobachten. Einzig im Hinblick auf die renale N-Ausscheidung zeigte sich bei Stärkezulage eine Reduzierung, die in Versuch Ia numerisch und in Versuch Ib signifikant war. Dadurch ergaben sich demzufolge für die BDs höhere N-Bilanzen und ein entsprechend gesteigerter N-Ansatz. Folglich kann in der Stärke-supplementierten Behandlung von einer höheren N-Verwertung ausgegangen werden, da N kaum mikrobiell fixiert oder anderweitig gebunden wurde.

Ferner kann die erhöhte N-Retention möglicherweise auch auf eine höhere ME-Versorgung in der Behandlung BDs zurückgeführt werden.

Während Cellulose nur zu einer numerischen Abnahme (8%-Punkte) der pcVQ-N führte, bewirkte Pektin eine deutlich höhere Depression der N-Verdaulichkeit im pc Darmabschnitt (25%-Punkte). Vermutlich wurde in der Behandlung BDp weitaus mehr N in Bakterienmasse eingebaut. Nach Meinung zahlreicher Autoren wird bei Vorlage fermentierbarer NSP das mikrobielle Wachstum durch eine intensive Fermentation gesteigert (OWUSU-ASIEDU ET AL., 2006; HÖGBERG, 2003; DONGOWSKI ET AL., 2002). Obgleich die bakterielle Fermentation von NSP vorwiegend im Dickdarm stattfindet, wird ein bestimmter Anteil bereits bis zum terminalen Ileum fermentiert (ROWAN ET AL., 1992).

Als N-Quelle dienen den Mikroben vor allem Ammoniak und Harnstoff (MOSENTHIN ET AL., 1992b). Wie eine Untersuchung von MOSENTHIN ET AL. (1992a) mit Hilfe der Radioisotopen-Verdünnungstechnik ($[^{14}\text{C}]$ Harnstoff) verdeutlicht, wird Harnstoff nicht in den Dickdarm sekretiert, wohl aber in den vorderen Teil des Verdauungstraktes.

Eine signifikante Reduzierung der Harnstoffkonzentration im Harn von Schweinen in Verbindung mit der Zulage von fermentierbaren NSP als mögliches Indiz für eine stärkere Verwertung von endogenem Harnstoff durch die Mikroflora stellten CANH ET AL. (1997) und HOVENJÜRGEN (2000) fest.

Es ist davon auszugehen, dass mit einem erhöhten mikrobiellen Einbau von N vermutlich auch mehr P inkorporiert wurde, da beide Elemente für das Wachstum von Bakterien essenziell sind (VAN NEVEL UND DEMEYER, 1977; WIDER, 2005).

Neben dem Effekt der Mikroflora ist auch eine negative Wirkung der erhöhten Darmfüllung bzw. des hohen Wasserbindungsvermögens auf die VQ-N denkbar (siehe 2.5.6), wodurch die Wirksamkeit der Proteasen vermutlich stark eingeschränkt war.

Bei Zulage von Pektin wurde im Dickdarm noch etwa 49% des einfließenden N verdaut. Somit machte der pi Darmabschnitt einen Anteil von 37% an der gesamten VQ-N aus.

Die hohe piVQ-N führte dementsprechend zu einer teilweisen Kompensation des negativen Effekts des Pektins auf pc Ebene (wie für OS oben angeführt), welche in zahlreichen Studien beschrieben wird (DROCHNER, 1993; POTKINS ET AL., 1991). Allerdings kann die negative Wirkung des Pektins auf die pc N-Verdaulichkeit nicht vollständig ausgeglichen werden, da zwar durch die pc Depression der VQ mehr N in den Dickdarm gelangt, ein nicht unerheblicher Anteil davon im Laufe der Fermentation allerdings in Bakterienmasse fixiert wird (ROTH-MAIER ET AL., 1993; MOSENTHIN ET AL., 1994). Nach Auffassung von JUST ET AL. (1981) hat der pi absorbierte N zudem keinen Anteil an der N-Versorgung des Schweins, da er nicht retiniert, sondern vollständig über den Harn ausgeschieden wird. Grund dafür ist der Umbau von Proteinen und Aminosäuren im Dickdarm zu Ammoniak bzw. Aminen, die nicht zur Proteinsynthese genutzt werden können (WENK, 2001). Diese

Aussage kann allerdings anhand der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden, da eine erhöhte N-Ausscheidung mit dem Harn in dieser Behandlung nicht erfolgt ist, sondern bei Zulage von Pektin sogar tendenziell weniger N renal ausgeschieden wurde.

Während die Depression der N-Verdaulichkeit durch Pektin besonders im pc Darmbereich anzutreffen war, führte Cellulose vornehmlich im postilealen Abschnitt zu einer signifikanten Reduzierung der Verdaulichkeitsquotienten, da diese, im Gegensatz zum Pektin, postileal nicht bzw. nur äußerst begrenzt fermentativ abgebaut wird.

Demnach können einerseits ein Einschluss von N in Faser in Cellulose bzw. andererseits eine erhöhte Abschilferung von Darmzellen aufgrund der faserigen Struktur der Cellulose die Verdaulichkeit von N stark herabgesetzt haben.

Die Depression der VQ von Rohprotein bzw. N am terminalen Ileum bzw. im Dickdarm von Schweinen durch die Zulage von NSP findet sich in zahlreichen Untersuchungen bestätigt (OWUSU-ASIEDU ET AL., 2006; WANG ET AL., 2002; LE GOFF ET AL., 2002; JØRGENSEN ET AL., 1996; SAUER ET AL., 1991; GRAHAM ET AL., 1986).

In der Arbeit von HOVENJÜRGEN (2000) kam es zu einer signifikanten Depression der Rohprotein-Verdaulichkeit im Gesamtrakt wachsender Schweine in vergleichbarer Höhe wie in der eigenen Untersuchung (Versuch Ia), wenn einer semisynthetischen Basaldiät 25% Pektin zugelegt wurde. Eine Pektinzulage von 15% hatte jedoch keinen Effekt. Diese Untersuchung macht deutlich, dass, wie oben für die OS vermutet, auch das Ausmaß der Depression der N-Verdaulichkeit in hohem Maße von der Zulagehöhe des Pektins abhängt, wobei in geringeren Zulagestufen (in dem Fall 15%) nur eine geringe Abnahme der VQ-N (3,2%-Punkte im Vergl. zur Kontrolle) zu verzeichnen ist, diese aber bei höheren Zulagen überproportional ansteigt. Diese Beobachtung findet sich bei HOVENJÜRGEN (2000) auch bei Zulage von schwach melassierten Trockenschnitzeln in Stufen von 23 und 46% bestätigt, wobei es dabei zu einer Abnahme der ttVQ-N in Höhe von 8,4 bzw. 13%-Punkten kam.

Bei Ersatz von Maisstärke durch 10% Cellulosepulver konnten SAUER ET AL. (1991) eine signifikante Abnahme der Rohprotein-Verdaulichkeit um 2,9%-Punkte im pc Darmabschnitt und um 4,6%-Punkte im Gesamtrakt feststellen. Die Autoren führten dies unter anderem auf eine mögliche Adsorption von Aminosäuren und Peptiden durch die Faserstoffe, verbunden mit einer erhöhten Abschilferung von Darmzellen und einer gesteigerten Produktion von Schleim aus den Mukosazellen zurück.

Den geringeren N-Verdaulichkeiten für den Gesamtrakt entsprechend führten sowohl Pektin als auch Cellulose (25%) zu einer signifikanten Zunahme der faecalen N-Ausscheidung. Bei Zulage von Cellulose als typischer Vertreter der unlöslichen NSP war die N-Konzentration im Kot zwar geringer, allerdings wurde durch die deutlich gesteigerten abgesetzten Kotmengen letztlich auch mehr N mit unverdauter OS ausgeschieden. Pektin

als typischer Vertreter der fermentierbaren NSP bewirkte eine signifikante Zunahme der N-Konzentration im Kot ohne einen Effekt auf die Kotmenge auszuüben, was wiederum als Hinweis auf eine erhöhte Ausscheidung von Mikrobenprotein gesehen werden kann.

Die Ausscheidung von N über den Harn war durch die Pektinzulage in beiden Versuchen tendenziell reduziert. Es scheint in dieser Behandlung durch eine Verlagerung der Wege der N-Ausscheidung zu einer Art Kompensation der gesteigerten faecalen N-Ausscheidung durch eine drastische Einschränkung der renalen N-Ausscheidung eingetreten zu sein. In Versuch Ia stand einer Erhöhung der faecalen N-Exkretion von 11%-Punkten (im Vergleich zur BD) eine Verminderung der renalen N-Exkretion von 13%-Punkten gegenüber. Daher wird auch kaum ein Unterschied in der N-Bilanz gegenüber der BD sichtbar. In Versuch Ib war die faecale N-Exkretion bei Zulage von Pektin um 19%-Punkte erhöht und die renale N-Exkretion um 16%-Punkte vermindert, wodurch sich eine geringfügige Reduzierung der N-Bilanz ergab.

Bei Zulage von Cellulose zeigte sich diesbezüglich eine deutliche Abhängigkeit von der Zulagehöhe. Während 15% Cellulose in Versuch Ib zu einer signifikanten Reduzierung der renalen N-Exkretion führte, bewirkten 25% eine numerische Erhöhung der N-Ausscheidung mit dem Harn. Auch bei Betrachtung der N-Bilanzen, die nur in Versuch Ia negativ von Cellulose beeinflusst waren, wird dies deutlich. Offensichtlich war bei höheren Cellulosegaben (>15%) kein Ausgleich der gesteigerten faecalen N-Exkretion mehr möglich, da aufgrund der stärkeren Depression der Faser auf die VQ-N der Rationskomponenten noch mehr N faecal ausgeschieden wurde.

Die Zunahme der faecalen bei gleichzeitiger Einschränkung der renalen N-Ausscheidung in Verbindung mit der oralen Verabreichung von fermentierbarer Substanz (HOVENJÜRGEN, 2000; ZERVAS UND ZIJLSTRA, 2002; CANH ET AL., 1997; ALBERS UND HENKEL, 1979) bzw. unlöslicher NSP (PARTRIDGE ET AL., 1982) wurde bei Schweinen vielfach nachgewiesen. AHRENS UND KAUFMANN (1985) und KIRCHGESSNER ET AL. (1987) beobachteten auch bei intracaecaler Applikation von Cellulose und Pektin in Miniaturschweine bzw. Sauen eine deutliche Zunahme der faecalen bei gleichzeitiger Abnahme der renalen N-Ausscheidung, wobei zusätzlich ausgeschiedener N dabei vorrangig in Bakterienmasse gebunden war.

Im Gegensatz dazu konnten ROTH-MAIER ET AL. (1993) trotz einer erhöhten faecalen N-Exkretion keinen Effekt einer Pektinzulage in Höhe von 25% zu einer semisynthetischen Diät auf die Harn-N-Ausscheidung von Sauen feststellen, die in beiden Behandlungen bei 14 g/d lag. Die Erhöhung der faecalen N-Ausscheidung um 4,5 g/d führte demnach zu einer signifikanten Reduzierung der N-Retention um 3,4 g/d, ohne dass eine Kompensation über eine Reduzierung der renalen N-Exkretion eintrat. Dies führte zu einer Verminderung der scheinbaren nicht aber der wahren VQ-N. Allerdings lag bei dieser Untersuchung eine knappe Proteinversorgung vor (23 g/d). Bemerkenswert ist, dass in der Pektin-Behandlung ein Großteil der ohnehin schon geringen N-Aufnahme für die mikrobielle N-Assimilation

genutzt wurde. Dies wird bei der Betrachtung der Mehrausscheidung an N mit dem Kot augenscheinlich, welche sich zu 82% aus Bakterien-N zusammensetzte (ROTH-MAIER ET AL., 1993). Die genannte Untersuchung verdeutlicht das Ausmaß der Bedeutung der Mikroflora im Dickdarm von Sauen. Diese Beobachtung könnte auf eine Art „Vormachtstellung“ der Mikroben beim „Konkurrenzkampf“ um Nährstoffe mit dem „Wirtstier“ hindeuten.

PARTRIDGE ET AL. (1986) beobachteten ebenfalls eine Erhöhung der faecalen bei gleich bleibender renaler N-Exkretion mit zunehmenden Rohfasergehalten von 40 – 132 g/kg in der Ration für wachsende Schweine, wobei die Autoren in diesem Zusammenhang eine Abnahme der N-Retention um 5%-Punkte unterstellten.

Dementsprechend erfolgt ein Ausgleich einer erhöhten faecalen N-Ausscheidung durch eine abnehmende Harn-N-Ausscheidung nur bei adäquater N-Versorgung, während diese Kompensation bei defizitärer N-Versorgung nicht oder nur begrenzt möglich ist und zu einer reduzierten N-Retention führt.

Der Tagesbedarf an Rohprotein für wachsende Schweine im LM-Bereich zwischen 30 und 50 kg und einer mittleren Tageszunahme von 500 g liegt nach Angaben der GfE (1987) zwischen 226 und 252 g. In der vorliegenden Untersuchung nahmen die Tiere mit der BD täglich nur 213 und mit den Testdiäten zwischen 156 und 169 g Rohprotein auf (Versuch Ia). Die Zulage der KH-Substrate erfolgte in Form einer Substitution gegen einen Teil der Basaldiät, was mit einer Abnahme des N-Gehaltes der Ration verbunden war und vermutlich eine Verknappung von N herbeiführte. Während bei Zulage von Pektin eine Kompensation über eine Reduzierung der renalen N-Exkretion erfolgte, da Futterprotein im Dickdarm in höherem Maße abgebaut und absorbiert wurde, war dies bei Zulage von Cellulose offenbar nicht möglich, da Futterprotein postileal kaum abgebaut und absorbiert wurde.

6.3 Einfluss einer intracaecalen Pektingabe in Abhängigkeit von der P-Versorgung

Die Ergebnisse der Versuche II und III werden aufgrund der nahezu identischen Versuchseinstellung zusammenhängend diskutiert.

6.3.1 Verdaulichkeit der OS

Vergleich der BD

Da Pektin via Ileum-T-Kanüle in das terminale Ileum infundiert wurde und in den postilealen Darmbereich abfloß, zeigte sich in beiden Versuchen erwartungsgemäß im pc Darmbereich kein Effekt auf die VQ der OS. Ferner wurde während den jeweils 12-stündigen Chymussammlungen kein Pektin appliziert. Evtl. in Verbindung mit Pektin auftretende pc Effekte können somit nur mit Nachwirkungen der letzten Pektininfusion vor der Sammlung erklärt werden (z. B. etablierte Mikroflora).

In beiden Versuchen bewirkte appliziertes Pektin einen tendenziellen (Versuch II) bzw. numerischen (Versuch III) Anstieg der pi OS-Verdaulichkeit. Diese Wirkung lässt sich unter anderem durch die hohe Fermentierbarkeit des Pektins erklären. Bei einer täglich applizierten Pektinmenge von 60 g/Tier strömten zusätzlich etwa 53 g OS in den Dickdarm. Die OS des Pektins wurde in den Behandlungen BD+ rechnerisch (nach Differenzverfahren, Gleichung 6 und 7) im Dickdarm zu 93% (Versuch II) bzw. 79% (Versuch III) fermentiert, wobei der geringere Wert in Versuch III ebenfalls den unter 6.1.1 beschriebenen Ursachen geschuldet sein könnte (Unterschiede in TiO₂-Konzentration im Chymus).

Die positive Beeinflussung der piVQ-OS durch intracaecal appliziertes Pektin wurde zudem vermutlich durch eine mit Pektin verbundene längere Verweildauer des Chymus im Dickdarm verursacht, wie sie in der Literatur vielfach beschrieben ist (MARTINEZ-PUIG ET AL., 2003; AHRENS UND KAUFMANN, 1985; SPILLER ET AL., 1980). Überdies bewirkte Pektin eine Erhöhung der mikrobiellen Aktivität, was unter anderem an der tendenziellen Erhöhung der SCFA-Konzentration im Kot der Tiere erkennbar ist (METZLER ET AL., 2008). Durch eine erhöhte Mikrobenaktivität könnten auch bisher unverdaute fermentierbare Futterbestandteile der Basaldiät mikrobiell fermentiert und verdaut worden sein.

Einfluss der MCP-Zulage

Die Zulage von MCP blieb ohne Wirkung auf die VQ-OS im pc Darmabschnitt. Die signifikante (MCP- vs. BD-) bzw. tendenzielle (MCP+ vs. BD+) Abnahme der pi OS-Verdaulichkeit bei Zulage von MCP kann unter Umständen auf eine Hemmung der mikrobiellen Fermentation durch hohe Mengen an mineralischem P zurückgeführt werden. Nähere Ausführungen dazu folgen an späterer Stelle.

Die negative Wirkung der MCP-Zulage auf die piVQ-OS wird auch bei Betrachtung der VQ im Gesamttrakt sichtbar.

Auch in Verbindung mit der Zulage von MCP bewirkte die Pektinapplikation einen signifikanten Anstieg der piVQ-OS. Die mittels Differenzverfahren berechnete pi Verdaulichkeit der OS aus Pektin lag in der Behandlung MCP+ bei 97%. Vermutlich war der mikrobielle P-Bedarf in dieser Behandlung durch die Pektininfusion und das damit verbundene mikrobielle Wachstum deutlich erhöht, was evtl. zu einer verminderten Hemmung durch Phosphat geführt haben könnte. Detaillierte Betrachtungen dazu werden im Zusammenhang mit dem Einfluss auf die Umsetzungen von N und P vorgenommen.

Die Zahl an Untersuchungen zum Einfluss von mineralischem P auf die Dickdarmfermentation ist äußerst begrenzt. BRUCE UND SUNDSTØL (1995) fanden bei einer MCP-Zulage von 11,1 g/kg im Gesamttrakt von Schweinen keinen Effekt auf die VQ der T, welche konstant bei etwa 76% lag, während sie im Dünndarm eine Steigerung der VQ-T um 7%-Punkte beobachteten. Im Vergleich zu den eigenen Daten für die pcVQ-OS steht die Beobachtung der Autoren allerdings im Widerspruch. Die könnte mit einem positiven

Effekt des MCP auf die VQ der Rohasche erklärt werden, der sich in der VQ-T, nicht aber der VQ-OS niederschlägt.

Einfluss der Phytase-Supplementatation

Supplementierte Phytase führte in beiden PHY-Behandlungen zu einer Depression der Verdaulichkeit der OS im pc Darmabschnitt. Eine klare Ursache dieser Wirkung ist nicht bekannt.

Vermutlich war der Effekt der Phytase auf die pcVQ-OS in der vorliegenden Untersuchung nicht tatsächlich vorhanden, sondern ist vielmehr der vermeintlichen Überschätzung der pc VQ aufgrund der erhöhten TiO₂-Konzentration im Chymus in den BD-Behandlungen geschuldet (6.1.1). Aufgrund dieser Unsicherheit soll dieser „Effekt“ nicht näher beleuchtet werden.

Im Gegensatz zur MCP-Zulage bewirkte Phytase im Dickdarm eine tendenzielle Erhöhung der VQ-OS (unter Vorbehalt nach 6.1.1).

Die Pektininfusion bewirkte auch in Verbindung mit Phytase im Dickdarm eine numerische Steigerung der VQ-OS. Mittels Differenzverfahren wurde für die Verdaulichkeit der OS aus Pektin im Dickdarm für die PHY+ ein Wert von 94% ermittelt.

Phytase übte keinen Einfluss auf die ttVQ der OS aus. Scheinbar konnte der negative Effekt im Dünndarm vollständig durch eine gesteigerte Fermentation von OS im Dickdarm kompensiert werden.

In der Literatur finden sich kontroverse Ergebnisse zum Einfluss von Phytase auf die VQ der T bzw. OS.

Während SEYNAEVE ET AL. (2000a) bei Supplementatation einer Mais-Tapioka-SES-Diät mit 500 U Phytase eine Depression der pc VQ-OS bei Schweinen von 62 auf 56% feststellten, hatte eine Phytase-Supplementatation in Höhe von 1.500 U/kg in einer Untersuchung von JONGBLOED ET AL. (1992) bei Schweinen keinen Einfluss auf die duodenale, ileale und faecale VQ der T. MROZ ET AL (1994) konnten ebenfalls keinen Effekt von 800 U/kg Phytase auf die pcVQ der T und OS nachweisen, wohl aber eine signifikante Zunahme der VQ im Gesamttrakt. Im Gegensatz dazu beobachteten BRUCE UND SUNDSTØL (1995) bei Supplementatation mit 487 U/kg Phytase eine signifikante Zunahme der pcVQ-T von 69 auf 76%, wobei die VQ-T im Gesamttrakt unverändert blieb.

Die Wirkung von Phytase auf die VQ der T ist jedoch nur begrenzt vergleichbar mit dem Einfluss auf die VQ der OS, da sich der positive Effekt der Phytase vor allem auf die VQ der Rohasche-Fraktion und somit auf die VQ der T nicht aber der OS niederschlägt. Dementsprechend fanden JONGBLOED ET AL. (2000) bei wachsenden Schweinen eine erhöhte ttVQ der T, nicht aber der OS bei Supplementatation mit 410 U/kg Phytase (*Asp. niger*) zu einer P-Mangeldiät.

6.3.2 Phytatabbau und Umsetzungen von P und Ca

Vergleich der BD

Mit Ausnahme eines um 0,25 g/kg T höheren P-Gehaltes und eines um 1,09 g/kg T geringeren Ca-Gehaltes in Versuch II war die Zusammensetzung der Basaldiäten in beiden Versuchen nahezu identisch. Bei gleichem Phytatgehalt lagen die Anteile an Phytat-P der BD in Versuch II bei 49% und in Versuch III bei 53%.

Der Abbau von Phytat im pc Darmbereich war in den BD-Behandlungen in Versuch III deutlich höher als in Versuch II. Während in Versuch III nahezu die Hälfte des Phytats (2,75 bzw. 2,58 g Phytat in BD- bzw. BD+) bereits praecaecal abgebaut war, wurde in Versuch II in den Behandlungen BD- und BD+ nur 13 bzw. 17% und somit weniger als 1 g des aufgenommenen Phytats im Dünndarm hydrolysiert. Eine mögliche Ursache für diese hohe Diskrepanz wurde bereits oben genannt und ist vermutlich in einer gewissen Überschätzung des pc Phytatabbaus in Versuch III aufgrund der höheren TiO₂-Konzentrationen im Chymus zu sehen. Allerdings würden die Abbauraten selbst bei Unterstellung eines den BD-Behandlungen in Versuch II vergleichbaren mittleren TiO₂-Gehaltes noch deutlich über den in Versuch II ermittelten Abbauraten liegen.

Der pc Phytatabbau war nicht von der Pektininfusion beeinflusst. Die beobachteten Differenzen (Versuch II: +5%-Punkte und Versuch III: -3%-Punkte) konnten nicht statistisch gesichert werden.

Die hohe Differenz im Phytatabbau zwischen beiden Versuchen spiegelte sich nicht in den pcVQ-P wider, welche mit durchschnittlich 30% in beiden Versuchen gering waren. Obwohl in Versuch III scheinbar weitaus mehr Phytat bereits praecaecal abgebaut wurde, lag die pcVQ-P in Versuch III somit kaum höher als in Versuch II. Würde allerdings auch bezüglich der pcVQ-P in Versuch III konsequenterweise eine Überschätzung unterstellt, lägen die Werte sogar unter den in Versuch II ermittelten VQ. Die trotz eines höheren Phytatabbaus gleich bleibenden (bzw. sogar verminderten) Verdaulichkeitsquotienten für P verdeutlichen einmal mehr, dass ein gesteigerter Abbau von Phytat nicht zwangsläufig zu einem Anstieg der P-Verdaulichkeit führt.

Die ohnehin geringe pc Verdaulichkeit des P in den Basaldiäten wurde in beiden Versuchen überdies durch die Applikation von Pektin numerisch gesenkt. Ursache dessen könnte ein gesteigerter P-Bedarf der Mikroben im Dickdarm bzw. evtl. bereits am terminalen Ileum gewesen sein, wodurch evtl. mehr P in den Dickdarm geflossen sein könnte.

Die pc Verdaulichkeit des Ca lag für die Basaldiäten mit 51 – 70% in beiden Versuchen deutlich über der des P. Während Pektin die VQ-Ca der BD in Versuch III tendenziell erhöhte, bewirkte die Applikation in Versuch II eher eine Verminderung der pcVQ-Ca. Für diese offenbar gegensätzliche Wirkung des Pektins gibt es keine plausible Erklärung.

Im postilealen Darmabschnitt war der Phytatabbau für die BD-Behandlungen in beiden Versuchen mit 97-100% nahezu vollständig. Anflutendes Phytat wurde somit komplett durch mikrobielle Phytasen der Dickdarmflora hydrolysiert. Eine nennenswerte Absorption von freigesetztem P hat im Dickdarm allerdings nicht stattgefunden. Für die piVQ-P der BD wurden in beiden Versuchen Werte ermittelt, die um 0 schwankten, wobei diese in den BD+ jeweils geringsfügig höher lagen. Pektin bewirkte in beiden Versuchen scheinbar in gewisser Weise eine Stimulierung der pi P-Absorption. Vorstellbar wäre dies im Zusammenhang mit einer erhöhten Verweildauer des Chymus im Dickdarm aufgrund der durch Pektin gesteigerten Fermentation. Demnach schien der durch die Fermentation von Pektin erhöhte mikrobielle P-Bedarf offenbar durch die Freisetzung von Phytat-P vollständig gedeckt worden zu sein. Während in Versuch II scheinbar 16 (BD-) bzw. 103 mg P/d (BD+) postileal absorbiert wurde, konnte in Versuch III für die BD- eine scheinbare Sekretion von 91 mg P festgestellt werden. Die Infusion von Pektin führte hingegen in diesem Versuch zu einer scheinbaren täglichen P-Absorption in Höhe von 66 mg.

Da es bei allen BD-Behandlungen im Dickdarm kaum zu einer nennenswerten Nettobewegung von P kam, lag die P-Verdaulichkeit im Gesamttrakt für diese Behandlungen etwa auf gleichem Niveau wie im pc Darmabschnitt. Pektin zeigte keinen Effekt auf die tt P-Verdaulichkeit. Ferner war auch die P-Konzentration im Kot nicht von Pektin beeinflusst. Der Untersuchung von METZLER ET AL. (2008), die sich mit den mikrobiellen Parametern dieses Projekts beschäftigt, sind entsprechend keine Hinweise auf eine erhöhte Fixierung von P in gemischte Bakterienmasse zu entnehmen.

Die renale Exkretion war, wie bei suboptimaler P-Versorgung nicht anders zu erwarten, mit 0,8% der P-Aufnahme in allen BD äußerst gering und vergleichbar mit den BD der Versuche Ia und Ib. Auf eine wiederholte Bewertung dieser Ergebnisse soll daher an dieser Stelle verzichtet werden.

Einfluss der MCP-Zulage

Durch die Zulage von MCP sank der Anteil an Phytat-P am Gesamt-P in der Diät auf lediglich 22%. Im Vergleich zur Basaldiät wurden in den MCP-Behandlungen täglich 4 g mineralischer P und 3,5 g Ca zusätzlich aufgenommen.

Wie erwartet führte die Zulage von MCP zu einer signifikanten Steigerung der VQ-P im pc Darmbereich um im Mittel 24%-Punkte, ohne einen nennenswerten Einfluss auf den pc Phytatabbau zu haben. Dementsprechend zeigte das IP-Muster im Chymus (5.3, Abb. 6) für alle Behandlungen ein einheitliches Bild. Neben einem dominierenden Anteil Phytat wurden geringe Anteile IP₅ und IP₄ gefunden. Da keine IP_{<4} nachgewiesen werden konnten, ist davon auszugehen, dass diese, wie unter 6.2.3 beschrieben, rasch abgebaut wurden.

Nach Angaben von RODEHUTSCORD ET AL. (1994) liegt die Verdaulichkeit des P aus MCP bei etwa 91%. Unter der Annahme, dass im Mittel von 7,1 g aufgenommenen P etwa 4 g aus der MCP-Zulage stammten und davon ca. 3,6 g P pc verdaut wurden, gelangten noch 3,5 g P ans terminale Ileum. Bei Unterstellung eines mittleren pc Phytatabbaus von 15% betrug der tägliche Fluss an NPP am terminalen Ileum in den MCP-Behandlungen etwa 2,2 g. Diese P-Menge stand potenziell zur Deckung des mikrobiellen P-Bedarfs zur Verfügung, woraus sich für die Mikroben möglicherweise keine Notwendigkeit eines Phytatabbaus ergab. Sollte es daher in der MCP+ bereits am terminalen Ileum zu einem Abbau von Pektin und dem damit verbundenen Mikrobewachstum gekommen sein, so kann angenommen werden, dass der mikrobielle P-Bedarf vollständig aus dem anflutendem noch nicht absorbierten bzw. endogenen anorganischem P gedeckt werden konnte. Pektin führte in Verbindung mit MCP sogar eher zu einer numerischen Reduzierung des Phytatabbaus im Vergleich zur MCP-. Im Hinblick auf die P-Verdaulichkeit im pc Darmbereich war die Pektininfusion völlig bedeutungslos.

Auch eine Hemmung des pc Phytatabbaus durch die gesteigerten P- bzw. Ca-Konzentrationen im Chymus scheint am terminalen Ileum nicht eingetreten zu sein.

KEMME ET AL. (1999b) fanden ebenfalls keinen Einfluss der Versorgung mit vP auf den scheinbaren pc Abbau von Phytat, wenn sie wachsenden Schweinen eine mit MCP supplementierte Diät (4,6 g/kg) im Vergleich zu einer P-Mangeldiät vorlegten.

SANDBERG ET AL. (1993), die einer Rapseeextraktionsschrot-Diät für Schweine in verschiedenen Stufen CaCO₃ zulegten, konnten keinen Einfluss der Ca-Versorgung auf den pc Phytatabbau feststellen, der zwischen 35-45% für die RES-Diäten lag. Für die pc P-Verdaulichkeit ermittelten die Autoren relativ hohe Werte von 44, 40 bzw. 47%.

In der vorliegenden Untersuchung bewirkte MCP eine Abnahme der pcVQ-Ca. In Verbindung mit der Pektininfusion kam es allerdings zu einer vollständigen Aufhebung dieses Effekts. Entsprechend der um 3,5 g höheren Ca-Aufnahme waren in beiden MCP-Behandlungen deutlich erhöhte Ca-Konzentrationen im Ileumchymus zu finden. Eine Ursache für diese Beobachtung könnte in der Ca-Übersorgung in Verbindung mit der MCP-Zulage liegen, wodurch, relativ zur Aufnahme, weniger Ca verdaut wurde. Bei Betrachtung der täglich scheinbar praecaecal verdauten Mengen an Ca wird hingegen deutlich, dass in den MCP-Behandlungen absolut gesehen im pc Darmbereich sogar 0,7 (BD- vs. MCP-) bzw. 2,1 g Ca (BD+ vs. MCP+) mehr verdaut wurden.

Der Phytatabbau im Dickdarm war signifikant durch MCP vermindert, wodurch sich im Gesamttrakt deutlich geringere Werte für den Phytatabbau gegenüber den BD-Behandlungen ergaben, in denen Phytat nahezu vollständig abgebaut wurde. 47 bzw. 38% des Phytats wurden in den Behandlungen MCP- bzw. MCP+ mit dem Kot ausgeschieden. Somit waren 0,72 bzw. 0,59 g des ausgeschiedenen P in Phytat gebunden. Das IP-Muster

im Kot (5.3, Abb. 6) gestaltete sich etwas differenzierter als im Chymus. Bei Zulage von MCP konnten unabhängig von der Pektingabe in geringen Mengen IP₄ und IP₃ nachgewiesen werden. Dies deutet darauf hin, dass selbst diese leicht abbaubaren Phosphorylierungsstufen mikrobiell kaum hydrolysiert wurden.

Wurde Pektin appliziert, kam es zu einem tendenziellen Anstieg des pi Phytatabbaus. Pektin schien demnach eine Abschwächung des hemmenden Effektes von MCP auf den pi Phytatabbau bewirkt zu haben.

Als mögliche Ursache des verminderten Phytatabbaus kommen mehrere Aspekte in Betracht.

Zum einen könnte unverdautes Phosphat aus MCP, welches in den Dickdarm einfließen ist, eine Einschränkung der mikrobiellen Phytaseaktivität der Darmflora im Dickdarm verursacht haben. Diese Aussage kann anhand der Versuchseinstellung allerdings nicht abschließend geklärt werden. *In vitro* wurde für Phosphat ab gewissen Konzentrationen ein hemmender Effekt auf die mikrobielle Phytaseproduktion bzw. -aktivität nachgewiesen (KONIEZNY UND GREINER, 2002; GREINER ET AL., 1993; SHIEH ET AL., 1969).

Ferner ist denkbar, dass Phosphat eine direkte Hemmung des mikrobiellen Wachstums und damit auch eine Eindämmung der Phytasebildner herbeigeführt haben könnte. Hinweise für eine Hemmung des Mikrobewachstums könnten zum einen in der oben beschriebenen Depression der piVQ-OS sowie zum anderen in der von METZLER ET AL. (2008) beobachteten numerischen Reduzierung der Diaminopimelinsäure(DAP)-Konzentration in der gemischten Bakterienmasse des Kotes von 2,0 (BD⁻) auf 1,6 g/kg T (MCP⁻) zu sehen sein. DAP kann dabei als Indikator für den Aufbau von Mikrobenprotein gesehen werden. Bei Infusion von Pektin (MCP⁺) wurde dagegen kaum eine Veränderung der DAP-Konzentration festgestellt (MCP⁺ 2,2; BD⁺ 2,3), da dort aufgrund der gesteigerten Fermentation weitaus mehr P mikrobiell gebunden wurde. Offenbar ist das Ausmaß der hemmenden Wirkung von Phosphat in hohem Maße abhängig vom Gehalt an fermentierbarer Substanz und der damit verbundenen Fermentationsintensität.

Neben *in vitro* Untersuchungen konnte eine Hemmung der Phytaseaktivität verbunden mit einem reduzierten Phytatabbau durch Phosphat auch im Darmtrakt verschiedener Tierarten nachgewiesen werden.

So fanden beispielsweise PALLAUF ET AL. (1992) einen Anstieg der Phytatkonzentration im Kot von Ferkeln auf 2,5 g/kg T bei Zulage von 10,9 g MCP/kg zu einer P-armen Basaldiät, während bei marginaler P-Versorgung lediglich 1,1 g Phytat/kg T im Kot enthalten waren. Die Autoren vermuteten aufgrund dessen eine Hemmung des Phytatabbaus durch Phosphat. In einer Untersuchung von PAGANO ET AL. (2007) wurde bei Zulage von Dicalciumphosphat eine numerische Abnahme der Phytaseaktivität im Colon junger Schweine beobachtet.

Einen weiteren Beleg für die Hemmung der mikrobiellen Phytaseaktivität im Dickdarm durch Phosphat lieferten MOORE UND VEUM (1983), die bei Zulage von 1 g P/kg Futter in

Form von Dicalciumphosphat eine Abnahme der Phytathydrolyse von 65 auf 25% im Gesamttrakt von Ratten beobachteten.

Auch RAVINDRAN ET AL. (2000) stellten einen hemmenden Effekt hoher Gaben mineralischen P im Futter auf die Phytaseaktivität in Broilern fest.

Neben dem Effekt des Phosphats ist weiterhin ein negativer Effekt des Ca auf den Abbau von einfließendem Phytat, einerseits durch die Bildung unlöslicher Ca-Phytat-Komplexe bzw. andererseits, durch die Konkurrenz von Ca mit dem aktiven Zentrum der Phytasen und der resultierenden Unterdrückung deren Aktivität, zu vermuten (QUIAN ET AL., 1997). Durch die MCP-Zulage und bedingt durch die geringere pcVQ-Ca flossen in der Behandlung MCP- täglich mit 6,1 g Ca im Mittel etwa 2,8 g Ca mehr in den Dickdarm als dies in der BD- der Fall war. Die höhere Anflutung von Ca war verbunden mit einer deutlichen Zunahme der Ca-Konzentration im Ileumchmus und einer Erweiterung des Ca:tP-Verhältnis auf von 1,5:1 auf 1,8:1 (Anhang, Tab. A-29).

In der Behandlung MCP+ flossen hingegen „nur“ 5,3 g Ca in den Dickdarm, was zu einer Verengung des Ca:tP-Verhältnisses im Ileumchymus auf 1,6:1 führte.

Der hemmende Einfluss hoher Ca-Konzentrationen sowie eines weiten Ca:tP-Verhältnisses auf die Aktivität mikrobieller Phytasen und den Abbau von Phytat wurde in einer Vielzahl von Untersuchungen nachgewiesen.

Ein hemmender Effekt von Ca auf den Phytatabbau wurde beispielsweise von SCHULZ UND OSLAGE (1972) beschrieben, die bei zunehmenden Ca-Gehalten in der Diät von 1 auf 6-10 g/kg eine Abnahme des Phytatabbaus von 100 auf 75-40% im Gesamttrakt von Schweinen beobachteten. Dabei spielte offenbar vor allem die Art der Calciumverbindung eine Rolle, wobei die Autoren zeigten, dass die Intensität der Phytathydrolyse durch Ca-Phosphat weniger stark eingeschränkt war als durch Ca-Carbonat. Ähnliche Beobachtungen machten auch MOORE UND TYLER (1955a), die eine Abnahme des Phytatabbaus im Dickdarm von Schweinen bei Verabreichung von Ca-Carbonat, nicht aber Ca-Phosphat feststellen konnten.

Ein negativer Effekt von Ca auf den postilealen Phytatabbau bei wachsenden Schweinen wird auch bei SANDBERG ET AL. (1993) und SEYNAEVE ET AL. (2000b) beschrieben. Eine Steigerung der Ca-Aufnahme von 4,5 auf 9,9 bzw. 15 g/d war demnach bei SANDBERG ET AL. (1993) verbunden mit einer Abnahme des Phytatabbaus im Gesamttrakt von 97 auf 77 bzw. 42%, ohne allerdings einen Effekt auf die P-Verdaulichkeit zu verursachen.

Nach Angaben von SCHULZ UND OSLAGE (1972) fördert Ca die Bildung schwerlöslicher Salze besonders am Ende des pc Darmbereichs und im Dickdarm, was zu einer reduzierten Phytathydrolyse und der damit verbundenen verminderten Verfügbarkeit von Phytat-P führt. Die Bildung von Ca-Phytat-Komplexen im Dickdarm wird dabei offensichtlich durch eine Erhöhung des pH-Wertes begünstigt, wodurch die Löslichkeit dieser Komplexe *in vitro* vermindert ist (SCHEUERMANN ET AL., 1988a). Eine Erhöhung des pH-Wertes wird

unter anderem durch erhöhte Ca-Konzentrationen verursacht. So ermittelten SANDBERG ET AL. (1993) bei steigenden Ca-Gehalten im Futter einen signifikanten Anstieg des pH-Wertes im Kot von Schweinen.

Gegenüber den BD-Behandlungen führte MCP zu einem leichten Anstieg des pH-Wertes um 0,3 (METZLER ET AL., 2008). Dies könnte im Fall der MCP- zu einer geringeren Phytatlöslichkeit und, damit verbunden, einem verminderten Phytatabbau geführt haben. Die Infusion von Pektin könnte in diesem Zusammenhang aufgrund der tendenziell vermehrten Produktion flüchtiger Fettsäuren durch die gesteigerte mikrobielle Fermentation zu einem geringeren pH-Anstieg geführt haben. Wie die Ergebnisse von METZLER ET AL. (2008) zeigen, bewirkte Pektin einen tendenziellen Anstieg der SCFA-Konzentration im Kot der Tiere, wodurch es zu einem signifikanten Rückgang der faecalen pH-Werte von 7,3 (MCP-) auf 6,8 (MCP+) kam.

Möglicherweise war Ca-Phytat unter diesen pH-Bedingungen besser löslich. Dies wäre unter Umständen eine Erklärung für den tendenziell gesteigerten Phytatabbau (+18%-Punkte) in Verbindung mit der Pektininfusion. Eventuell hat zudem die Fermentation des Pektins im Dickdarm zu einem gesteigerten P-Bedarf der Mikroben geführt, wodurch Phytat in höherem Maße durch mikrobielle Phytasen abgebaut wurde.

Die Zulage von MCP bewirkte im Dickdarm offenbar eine Nettosekretion von P in Höhe von 206 mg/d, die durch Pektin noch numerisch verstärkt wurde (673 mg/d). Warum allerdings trotz der hohen postileal anflutenden Menge P sekretiert wurde, ist unklar. Ein mikrobieller P-Mangel im Dickdarm scheidet im Falle der Behandlung MCP- als Erklärung aus. Gemäß den oben gemachten Ausführungen lag im Dickdarm aufgrund der angenommenen Unterdrückung der Mikroflora ein geringer mikrobieller P-Bedarf vor.

Die Zulage von MCP führte *per se* zunächst zu einer signifikanten Steigerung der renalen P-Exkretion um 305 mg/d. In dieser Behandlung wurde demgemäß vermutlich P in weitaus höherem Maße absorbiert als retiniert. Die hohe Differenz in der relativen renalen P-Ausscheidung in Verbindung mit der MCP-Zulage bestätigt Aussagen verschiedener Autoren hinsichtlich der homöostatischen Regulation der intestinalen P-Absorption, die in hohem Maße von der Versorgungslage mit vP abhängig ist (VEMMER, 1982, SCHRÖDER ET AL., 1996).

Bemerkenswert ist allerdings, dass die renale Mehrausscheidung von P in der vorliegenden Untersuchung bei Zulage von MCP durch die Applikation von Pektin vollständig aufgehoben wurde. In dieser Behandlung wurden lediglich 50 mg P täglich renal ausgeschieden. Vermutlich wurde endogener P, der überschüssig absorbiert wurde, im Dickdarm vermehrt zur Fermentation benötigt und dort sekretiert. Insgesamt wurden in der Behandlung MCP+ täglich 470 mg P mehr ins Lumen des Dickdarms sekretiert, dafür aber 280 mg P weniger renal ausgeschieden als in der MCP-. Die verminderte renale Exkretion stellt demnach vermutlich eine Art Kompensation dar. Eine ähnliche Beobachtung machte

auch HOVENJÜRGEN (2000) bei Schweinen. Bei Zulage von 23% Trockenschnitzeln wurden trotz einer P-Aufnahme von 5,5 g/d (v. a. aus Mononatriumphosphat) lediglich 54 mg P täglich mit dem Harn ausgeschieden.

Die tendenziell erhöhte faecale Ca-Exkretion bei Zulage von MCP war verbunden mit einer reduzierten Ca-Ausscheidung mit dem Harn. Der Rückgang der renalen Ca-Exkretion war dabei unbeeinflusst von Pektin. Zum einen ist als Ursache dafür die höhere Ca-Fixierung in Bakterienmasse zu sehen (nachfolgend erläutert). Zum anderen könnten aber auch homöostatische Vorgänge aufgrund der höheren Menge absorbierten und retinierten P in den MCP-Behandlungen zu einer erhöhten Retention absorbierten Ca und somit zu einer Aufhebung der der Hypophosphatämie geschuldeten Hypercalciurie geführt haben.

Besonders in der Behandlung MCP- wurde von METZLER ET AL. (2008) ein drastischer Anstieg der P- und Ca-Konzentrationen in der gemischten Bakterienmasse des Kotes festgestellt, während die N-Konzentration tendenziell vermindert war. Diese Beobachtung deutet auf eine gesteigerte Inkorporation von P und Ca und eine geringere mikrobielle N-Fixierung im Dickdarm hin, die vermutlich der MCP-Zulage geschuldet war. Dieser gegenläufige Effekt für P bzw. N führte entsprechend zu einer Verengung des N:P-Verhältnisses in der gemischter Bakterienmasse des Kotes von 2,7:1 (BD-) auf 1,5:1 (MCP-). Demnach scheint die Höhe der mikrobiellen P- und Ca-Inkorporation von der P-Versorgung abhängig zu sein. Möglicherweise kommt es dabei in den Bakterien der Darmflora zu einer Speicherung von P (WOOD UND CLARK, 1988). Es ist aber auch denkbar, dass in der Behandlung MCP- insgesamt weniger Bakterienmasse mit dem Kot ausgeschieden wurde und es somit zu einer Aufkonzentrierung von P und Ca gekommen sein kann. Dies ist nicht abschließend aufklärbar, da von METZLER ET AL. (2008) keine quantitative Aussagen zur gemischten Bakterienmasse getroffen werden können.

In der vorliegenden Untersuchung war parallel zum Anstieg der VQ-P im Gesamttrakt eine tendenzielle Abnahme in Bezug auf die tt Ca-Verdaulichkeit zu verzeichnen wenn eine Ergänzungs mit MCP erfolgte. Der vermeintlich negative Einfluss des MCP auf die Verdaulichkeit des Ca ist allerdings eher als Folge der durch MCP verursachten Steigerung der Ca-Übersorgung zu sehen, da auch im Gesamttrakt absolut mehr Ca verdaut wurde.

Einfluss der Phytase

Die Supplementation von Phytase bewirkte *per se* in der Behandlung PHY- eine signifikante Steigerung des pc Phytatabbaus um 38%-Punkte.

In Verbindung mit der Infusion von Pektin war allerdings dieser Effekt der Phytase auf die pc Hydrolyse von Phytat nicht zu beobachten. In der Behandlung PHY+ wurde Phytat somit in etwa gleichem Maße (52%) abgebaut, wie in den beiden BD. Der negative Effekt des Pektins auf die Wirkung der Phytase (um 36%-Punkte), die deutlich abgeschächt bzw. inhibiert war, kann nicht eindeutig geklärt werden.

Die erhöhten Anteile von IP₄ und IP₃ im IP-Muster des Ileumchymus in der Behandlung PHY- (5.4; Abb. 7) deuten ebenfalls auf einen gesteigerten Abbau von Phytat durch Phytase in geringer-phosphorylierte IP hin, welche am terminalen Ileum noch nicht vollständig hydrolysiert wurden.

Die Wirkung supplementierter mikrobieller Phytasen auf den Phytatabbau entfaltet sich bei Schweinen hauptsächlich im Bereich des Magens und des proximalen Duodenums, während im Ileumchymus in den meisten Untersuchungen keine Phytaseaktivität mehr festgestellt werden konnte (PAGANO ET AL., 2007; JONGBLOED ET AL., 1992; YI UND KORNEGAY, 1996). Daher kann davon ausgegangen werden, dass die intracaecale Pektingabe keinen direkten Einfluss auf die Phytaseaktivität im proximalen Darmbereich ausübte.

KEMME ET AL. (2006) legten zu einer Phytase-inaktivierten Basaldiät mikrobielle Phytase in Stufen von 0, 150 bzw. 900 U/kg zu und fanden, entgegen der oben genannten Studien, einen Phytatabbau in Höhe von 7, 22 bzw. 52% im Duodenum und von 27, 43 bzw. 65% im Ileum von Schweinen. Bemerkenswert war allerdings, dass im Duodenum trotz eines teils beachtlichen Phytatabbaus kein P verdaut wurde. Im Ileum hingegen wurden mit steigender Phytase-Supplementation zunehmend mehr P verdaut.

Die Wirkung supplementierter Phytase auf den Abbau von Phytat und die Verdaulichkeit von P ist in der Literatur hinreichend beschrieben worden.

In Übereinstimmung mit den eigenen Daten beobachteten KEMME ET AL. (1999b) eine Erhöhung des pc Phytatabbaus um 40%-Punkte von 10 auf 50% bei Supplementierung von einer Mais-SES-Diät mit 900 U mikrobieller Phytase.

In einer Untersuchung von MROZ ET AL. (1994) führte die Supplementierung einer P-Mangeldiät mit 800 U/kg *Asp. niger*-Phytase bei Schweinen zu einer Steigerung des pc Phytatabbaus von 31 auf 79%.

Auch RAPP (1998) fand bei Zusatz von 1.000 U Phytase/kg zu einer Mais-SES-Diät in Miniaturschweinen einen Anstieg des pc Phytatabbaus von 19 auf 63%.

Die Ergänzung einer Mais-SES-Diät hatte in der Arbeit von JONGBLOED ET AL. (1992) ebenfalls eine Erhöhung des Phytatabbaus von 22 auf 69% im Duodenum und von 10 auf 60% im Ileum zur Folge.

Die Supplementation von Phytase bewirkte in der eigenen Untersuchung eine signifikante Steigerung der P-Verdaulichkeit im pc Darmbereich um durchschnittlich 29 bzw. 32%-Punkte, was nahezu eine Verdopplung darstellt. Ein Vergleich der Effekte auf die pcVQ-P zeigte, dass die Supplementation mit 1.000 U Phytase/kg einen etwas höheren Anstieg (+96%) verursachte als die Zulage von 15 g MCP/kg (+83%) und demnach effizienter wirkte.

In beiden PHY-Behandlungen wurde, trotz des Unterschiedes im Phytatabbau, P in etwa gleichem Maße pc verdaut. Eine Beeinflussung der Effizienz supplementierter Phytase

kann daher allenfalls im Hinblick auf den Phytatabbau nicht aber auf die pcVQ-P vermutet werden.

Die positive Wirkung supplementierter mikrobieller Phytase auf die pc Verdaulichkeit sowohl von P als auch Ca ist vielfach belegt.

So verzeichneten beispielsweise BRUCE UND SUNDSTØL (1995) bei Phytasesupplementation (487 U/kg) zu einer phytatreichen Hafer-SES-Diät einen Anstieg der P-Verdaulichkeit im pc Darmabschnitt um 27%-Punkte und im Gesamttrakt um 24%-Punkte. Auch für die pcVQ-Ca stellten die Autoren einen positiven Effekt der Phytase fest.

Einen Anstieg der scheinbaren pcVQ-P von 30 auf 56% als auch der pcVQ-Ca von 45 auf 47% beobachteten auch MROZ ET AL. (1994) in der oben angeführten Untersuchung bei Zusatz von Phytase.

In den oben genannten Untersuchungen von RAPP (1998) bzw. JONGBLOED ET AL. (1992) wurde die pcVQ-P durch Phytase von 18 auf 34% bzw. von 26 auf 45% gesteigert.

Unabhängig von der Phytasesupplementation und der Pektininfusion, wurde anflutendes Phytat in der eigenen Untersuchung vollständig im Dickdarm abgebaut.

PAGANO ET AL. (2007) stellten fest, dass die Phytaseaktivität im Colon junger Schweine in negativer Beziehung zu einer Supplementation mit Phytase steht, indem sie die geringsten Aktivitäten bei Phytasezusatz fanden. Die Autoren führten dies auf eine geringere Induzierung der mikrobiellen Phytaseproduktion und -sekretion mangels einfließenden Phytats, welches das Substrat der Phytasen im Colon darstellt, zurück.

Phytase bewirkte, besonders in der Behandlung PHY-, eine Sekretion von P (11%) in den Dickdarm.

In der Literatur wird diese Beobachtung nicht bestätigt, wobei ein möglicher „Effekt“ der Phytase offenbar sehr stark von der Höhe der P-Versorgung abhängt. BRUCE UND SUNDSTØL (1995) fanden bei Zulage von Phytase zu einer Hafer-SES-Diät mit 4,4 g P/kg im Dickdarm eine positive Differenz (ttVQ – pcVQ) von 6 (mit Phytase) bzw. 9%-Punkten (Kontrolldiät). Der P-Gehalt war dabei deutlich höher als in der eigenen Untersuchung.

Eine Phytase-Supplementation einer Hirsediät (4,0 g P/kg) mit 300 bzw. 500 U/kg führte in einer Untersuchung von O'QUINN ET AL. (1997) bei wachsenden Schweinen zu einem Anstieg der P-Verdaulichkeit sowohl im pc Darmabschnitt als auch im Gesamttrakt. Die positive Differenz zwischen tt und pcVQ stellten die Autoren als Nettoabsorption im Dickdarm dar. Danach wurden postileal zwischen 5,7 und 12% des aufgenommenen P absorbiert, wobei Phytase einen Anstieg verursachte.

Nach Angaben von LIU ET AL. (2000) kam es bei marginaler vP-Versorgung und Zusatz von 500 U/kg Phytase im Caecum als auch im Colon von Schweinen noch zu einer nennenswerten Absorption von P in Höhe von 50% der P-Aufnahme, während die pcVQ für P bei 38% lag. Allerdings diente hier ein Schlachtversuch als Datengrundlage, wobei

die pc VQ in einem 80 cm langen Teil des terminalen Ileums bestimmt wurde. Gegenüber der Probenentnahme am terminalen Ileum kann die Entnahme des Chymus über die gesamte Länge des Darmsegments zu einer Unterschätzung der VQ geführt haben, da P über diese Länge noch zu einem bestimmten Anteil hätte absorbiert werden können. Ein weiterer kritischer Aspekt dieses Verfahrens ist, wie bereits oben beschrieben, dass die Ermittlung der VQ nur zu einem Zeitpunkt erfolgt ist.

Die hohe postileale Nettosekretion in der eigenen Untersuchung kann möglicherweise die Folge eines mikrobiellen P-Mangels gewesen sein. Auch wenn kein Pektin appliziert wird, kommt es im Dickdarm zu einer gewissen mikrobiellen Fermentation der einfließenden OS, zumal in den Diäten 5% Melassetrockenschnitzel enthalten waren. Die Supplementation mit Phytase und der damit verbundene Anstieg der pcVQ-P führten vermutlich zu einer starken Begrenzung der in den Dickdarm einfließenden P-Menge. Somit stand den Darmbakterien im Dickdarm vermutlich nicht genug P zur Verfügung. Dadurch könnte die mikrobielle Aktivität stark eingeschränkt gewesen sein. Im „mikrobiellen“ Teil der Untersuchung fanden METZLER ET AL. (2008) keinen Effekt des Pektins auf die SCFA-Konzentration und den pH-Wert im Kot. Ferner wurde eine Abnahme der P-Konzentration in der gemischten Bakterienmasse des Kotes beobachtet, was folglich zu einer tendenziellen Erweiterung des N:P-Verhältnisses in dieser führte. Die tendenzielle Reduzierung der cellulolytischen Aktivität in Verbindung mit Phytase (METZLER ET AL., 2008) gibt einen weiteren Hinweis auf die Begrenzung des Mikrobewachstums. Wie bereits unter 6.2.3 beschrieben, reagieren besonders cellulolytische Bakterien empfindlich auf eine defizitäre P-Versorgungslage (DURAND UND KOMISARCZUK, 1988, KOMISARCZUK ET AL., 1987). Die Aktivität der Polygalakturonase blieb hingegen von der Phytasesupplementation unberührt. Es ist daher anzunehmen, dass pektinolytische Bakterien deutlich weniger empfindlich auf einen P-Mangel reagieren. Trotz des akuten mikrobiellen P-Mangels wurde Pektin in der Behandlung PHY+ vollständig abgebaut. Als P-Quellen dienten den Mikroben vermutlich sowohl aus dem pi Phytatabbau freigesetzter P als auch P aus dem endogenem Pool.

Offenbar wird auch bei einem Mangel an P die mikrobielle Aktivität erhöht, sobald fermentierbare Substanz in den Dickdarm gelangt. Um dies zu bewerkstelligen „zapfen“ Bakterien der Darmflora zur Deckung ihres P-Bedarfs vermutlich endogene Reserven des Wirtstieres an, was sich in einer teils hohen P-Sekretion in den Dickdarm bemerkbar macht. Darin könnte ebenfalls, wie unter 6.2.4 bereits für N beschrieben, eine Art „Vormachtstellung“ der Darmflora gesehen werden.

Warum allerdings in der Behandlung PHY- im Vergleich zur PHY+ bei etwa gleicher Menge einfließenden P scheinbar 60 mg mehr P in den Dickdarm sekretiert wurden, obwohl der mikrobielle P-Bedarf nicht durch Pektin erhöht war, ist unklar.

Trotz der negativen Werte im pi Darmabschnitt, war der positive Effekt der Phytase auch im Gesamtrakt zu finden, wobei P insgesamt in nahezu doppeltem Umfang verdaut wurde. Der Anstieg der Ca-Verdaulichkeit ließ sich nicht statistisch sichern, da aufgrund der bedarfsgerechten Ca-Versorgung mit der BD ein möglicher Effekt der Phytase weniger deutlich hervortritt.

Eine Verdopplung der P-Verdaulichkeit im Gesamtrakt wachsender Schweine von 22 auf 46 bzw. 50% ermittelten auch PADITZ ET AL. (2004) bei Ergänzung einer P-armen Mais-SES-Diät mit 900 U/kg mikrobieller Phytase der Stämme *Aspergillus niger* bzw. *Hansenula polymorpha* (Consensus).

Der positive Effekt mikrobieller Phytasen auf die Verdaulichkeit des P im Gesamtrakt von Schweinen, als Folge einer verbesserten VQ-P im pc Darmbereich, wurde bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen nachgewiesen (AGUDELO ET AL., 2007; JONGBLOED ET AL., 2000; KEMME ET AL., 1999b; MROZ ET AL., 1994; PALLAUF ET AL., 1992; NÄSI, 1990) und soll daher nicht weiter diskutiert werden.

Bei Supplementation von Phytase wurde nur ein geringer Anteil an P über die Nieren ausgeschieden. Zusätzlich absorbiertes P wurde demnach vollständig retiniert.

In Verbindung mit appliziertem Pektin (PHY+) wurde mit 0,5% (15 g/d) signifikant weniger P renal ausgeschieden als in den BD-Behandlungen. Diese zusätzliche Einschränkung der renalen P-Exkretion könnte ein Hinweis auf eine vermehrte Verwertung des im Dickdarm freigesetzten P durch Mikroben sein.

In einer Untersuchung von ZIMMERMANN ET AL. (2002) an wachsenden Schweinen war ebenfalls kein Effekt pflanzlicher bzw. mikrobieller Phytase auf die renale P-Ausscheidung zu beobachten. Bei einer täglichen Aufnahme von 2,3 bis 2,5 g Gesamt-P (pflanzlicher Herkunft) wurden 0,3 bis 0,5% des aufgenommenen P mit dem Harn ausgeschieden.

Ein positiver Effekt der Phytase auf die Ca-Bilanz, aufgrund einer erhöhten P-Retention, ließ sich nur in der Tendenz nachweisen (BD vs. PHY-) und war unbeeinflusst von der Pektingabe.

6.3.3 Umsetzungen von N

Vergleich der BD

Die Tatsache, dass Pektin keinen Einfluss auf die pcVQ-N hatte, bestätigt die Vermutung, dass infundiertes Pektin unverzüglich ins Caecum abgeflossen sein muss. Andererseits wäre es bei Anreicherung oder Rückfluss von Pektin in den Dünndarm vermutlich bereits am terminalen Ileum in begrenztem Maße zu einer mikrobiellen Fermentation und einer damit verbundenen Abnahme der N-Verdaulichkeit gekommen.

Die Applikation von Pektin führte in beiden Versuchen aufgrund der gesteigerten Fermentation zu einer Depression der N-Verdaulichkeit der BD im pi Darmabschnitt, die sich allerdings nicht statistisch sichern ließ.

Hinsichtlich der ttVQ-N in den BD lieferten beide Versuche vergleichbare Werte. Pektin bewirkte eine numerische (Versuch II) bzw. signifikante (Versuch III) Depression der VQ. Geschuldet ist dieser Effekt vermutlich einer erhöhten faecalen N-Ausscheidung in diesen Behandlungen aufgrund der gesteigerten mikrobiellen N-Assimilation im Dickdarm wie sie bereits unter 6.2.4 beschrieben und von anderen Autoren vielfach beobachtet wurde (ROTHMAIER ET AL., 1993; KIRCHGESSNER ET AL., 1987; AHRENS UND KAUFMANN, 1985).

Die N-Exkretion mit dem Harn war nicht durch die Pektinapplikation beeinflusst. Zwischen 35 und 45% des aufgenommenen N wurde über diesen Weg ausgeschieden. Die im Mittel jeweils um 7%-Punkte höhere renale N-Ausscheidung in Versuch II bei nahezu identischer N-Aufnahme ist möglicherweise auf Tiereffekte zurückzuführen.

Einfluss der MCP-Zulage

Die Zulage von MCP hatte keinen Effekt auf die pcVQ-N. Dies lässt vermuten, dass kein Zusammenhang zwischen der Höhe der P-Versorgung und der Verdaulichkeit von N im Dünndarm besteht.

Dies bestätigt auch eine Untersuchung von KEMME ET AL. (1999a), in der eine Zulage von MCP (4,6 g/kg) zu einer Mais-SES-Diät ebenfalls keine Auswirkung auf die Verdaulichkeit des Rohproteins im pc Darmbereich hatte. Auch BRUCE UND SUNDSTØL (1995) konnten keinen Einfluss einer MCP-Zulage (11,1 g/kg) auf die pc und tt N-Verdaulichkeit bei wachsenden Schweinen feststellen.

Aufgrund des oben genannten vermutlich raschen Abflusses des Pektins in den Dickdarm war am terminalen Ileum kein Effekt der Infusion auf die VQ-N festzustellen.

Die pi N-Verdaulichkeit war bei Zulage von MCP hingegen signifikant vermindert. Eine erhöhte mikrobielle Inkorporation von N in Bakterienmasse scheint hier als Erklärung nicht in Betracht zu kommen, da nach den oben gemachten Ausführungen der MCP-Zulage ein hemmender Effekt auf die mikrobielle Aktivität zugeschrieben wurde. Vielmehr wird angenommen, dass aufgrund der dadurch eingeschränkten Fermentation der einfließenden OS dementsprechend auch weniger darin enthaltener N freigesetzt und absorbiert wurde.

Der negative Effekt der MCP-Zulage scheint durch die Applikation von Pektin noch verstärkt worden zu sein. Allerdings ist die Depression der piVQ-N im Falle der MCP+ vermutlich nicht auf eine verminderte Fermentation von OS zurückzuführen, da diese nachweislich deutlich erhöht war. Daher liegt hier die Vermutung nahe, dass Pektin eine gesteigerte mikrobielle Fixierung von einfließendem N bewirkte. Als weiteres Indiz für eine verstärkte N-Assimilation in mikrobielle Masse kann auch die höhere N-Konzentration im Kot der Tiere in der MCP+ gegenüber der MCP- angesehen werden.

Trotz der Depression der VQ-N im Dickdarm, hatte die Zulage von MCP *per se* keine Veränderung der N-Verdaulichkeit im Gesamttrakt zur Folge. Eine Verminderung der N-Verdaulichkeit ließ sich lediglich in Verbindung mit der Pektingabe nachweisen. Das Ausmaß der Depression durch Pektin war dabei höher als bei suboptimaler P-Versorgung.

Dies lässt die Vermutung zu, dass der in der BD+ vorliegende P-Mangel möglicherweise zu einer Begrenzung des Mikrobewachstums geführt haben kann, während bei Zulage von MCP hingegen ausreichend P für das Wachstum der Mikroflora zur Verfügung stand.

Obwohl die faecale N-Ausscheidung nur in Verbindung mit Pektin von der P-Versorgung beeinflusst war, führte die MCP-Zulage zu einer signifikanten Reduzierung der renalen N-Exkretion, was sich dementsprechend in höheren N-Bilanzen äußerte.

Es kann daher ein Zusammenhang zwischen der N-Retention und der P-Versorgung vermutet werden. Möglicherweise konnte die N-Retention bei marginaler P-Versorgung aufgrund des P-Mangels nicht ausgeschöpft werden.

Im Falle der Behandlung MCP+ könnte hierbei überdies eine gewisse Kompensation der durch Pektin gesteigerten faecalen N-Ausscheidung durch eine Einschränkung der renalen N-Ausscheidung eingetreten sein.

Diese Vermutungen werden in anderen Untersuchungen, in denen für MCP kein Einfluss auf die N-Bilanz bei Schweinen nachweisbar war (BRUCE UND SUNDSTØL, 1995; NÄSI, 1990), jedoch nicht bestätigt. In beiden Studien war die P-Versorgung allerdings deutlich höher als in der vorliegenden Untersuchung.

Einfluss der Phytase-Supplementation

Vergleichbar mit der VQ für die OS bewirkte Phytase eine Depression der N-Verdaulichkeit im pc Darmabschnitt. Mit Ausnahme der bereits oben für die OS dargestellten Annahme einer Überschätzung der VQ in den BD gibt es dafür keine plausible Erklärung. Denkbar wäre, dass in der vorliegenden Untersuchung möglicherweise aufgrund einer durch Phytase gesteigerten Freisetzung von P aus Phytat bereits am terminalen Ileum mehr P als auch N mikrobiell fixiert und somit nicht verdaut wurde. Diese Theorie ist jedoch unwahrscheinlich, da Phytase am terminalen Ileum vermutlich eher einen mikrobiellen P-Mangel verursachte.

Der beobachtete negative „Effekt“ der Phytase auf die pc N-Verdaulichkeit widerspricht der aus der Literatur bekannten Aussage, wonach Phytase die pc Verdaulichkeit einiger AS und des N bei Schweinen (KEMME ET AL., 1999a) als auch Geflügel (RAVINDRAN ET AL., 2001) positiv beeinflusst.

Es liegen demgegenüber auch in der Literatur zahlreiche Ergebnisse vor, wonach sich für supplementierte Phytase kein Einfluss auf die VQ-N im pc Darmbereich zeigte. So konnten beispielsweise LIAO ET AL. (2005) keinen Effekt einer Supplementation von 2.000 U/kg Phytase (zu Mais-SES-Diät) auf die pcVQ von Rohprotein bei Schweinen feststellen. Auch BRUCE UND SUNDSTØL (1995) fanden keinen signifikanten Einfluss von 487 U/kg mikrobieller Phytase auf die pc N-Verdaulichkeit einer Hafer-SES-Diät bei wachsenden Schweinen. Keinen Effekt einer Supplementation von 800 U/kg *Asp. niger*-Phytase auf die VQ von N im pc Darmabschnitt wachsender Schweine wurde auch von MROZ ET AL. (1994) beobachtet.

Im Gegensatz zu MCP bewirkte die Supplementation von Phytase einen Anstieg der piVQ-N. Selbst unter der Annahme, dass die Verdaulichkeitsquotienten für die BD-Behandlungen im Dickdarm vermutlich unterschätzt wurden, lagen die piVQ-N in beiden PHY-Behandlungen auch deutlich über den in Versuch II ermittelten piVQ-N, sowohl für die BD als auch für die MCP-Behandlung. Zurückzuführen ist dies möglicherweise auf einen P-Mangel der Mikroben im Dickdarm durch supplementierte Phytase (siehe 6.3.2), wodurch es aufgrund der gesunkenen mikrobiellen Aktivität besonders in der PHY- zu einer weitaus geringeren mikrobiellen N-Fixierung gekommen sein kann.

Denkbar wäre weiterhin, dass die Komplexbildung von Proteinen mit Phytat aufgrund des gesteigerten Phytatabbaus im Dünndarm weitgehend unterbunden wurde und einfließendes Protein im Dickdarm effizienter abgebaut werden konnte.

Pektin hatte auch in Verbindung mit der Phytasesupplementation eine negative Wirkung, die allerdings nicht signifikant war. Wie die Differenzrechnung zur VQ-OS aus dem Pektin zeigt, wurde infundiertes Pektin im Dickdarm nahezu vollständig (94%) abgebaut. Damit verbunden erfolgte vermutlich ein vermehrter Einbau von N in pektinolytische Bakterienmasse und somit eine erhöhte Ausscheidung von Mikroben-N. Darauf deutet auch die um 3,1 g/kg T höhere N-Konzentration im Kot der Tiere in Behandlung PHY+ hin.

Phytase *per se* hatte keinen Einfluss auf die VQ-N im Gesamttrakt. In Verbindung mit der Pektinapplikation war allerdings entsprechend der Depression der VQ-N im Dickdarm aus den genannten Gründen eine Abnahme der ttVQ-N im Vergleich zur PHY- zu beobachten.

In der Literatur findet sich der fehlende Effekt der Phytase auf die Verdaulichkeit von N bzw. Rohprotein im Gesamttrakt von Schweinen vielfach bestätigt (AGUDELO ET AL., 2007; LIAO ET AL., 2005; PADITZ ET AL., 2004; BRUCE UND SUNDSTØL, 1995; KETAREN ET AL., 1993; NÄSI, 1990).

Dementgegen konnten MROZ ET AL. (1994) bei Einsatz von Phytase im Gesamttrakt eine um 2,5%-Punkte erhöhte N-Verdaulichkeit nachweisen.

Nach Aussage von KEMME ET AL. (1999a) hängt die Wirkung von Phytase auf die N-Verdaulichkeit von vielen Faktoren ab (u.a. pH, Art und Löslichkeit des Proteins sowie Mineralstoffkonzentration und Phytatgehalt im Verdauungstrakt).

So konnten beispielsweise LIAO ET AL. (2005) bei Anhebung des Phytatgehalts (von 0,22 auf 0,48% Phytat-P) durch Zulage von 20% Reiskleie einen negativen Einfluss hoher Phytatgehalte in der Diät auf die pc und tt N-Verdaulichkeit bei Schweinen beobachten.

Auch bei Broilern konnte eine Depression der pcVQ-N bei hohen Phytatgehalten nachgewiesen werden (RAVINDRAN ET AL., 2000). Gründe für die negative Wirkung von Phytat auf die Absorption von N wurden bereits unter 2.2 genannt.

6.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

1. Eine Zulage von Maisstärke zu einer P-armen Basaldiät bewirkt im pc Darmabschnitt aufgrund einer Hemmung des Phytatabbaus eine tendenzielle Reduzierung der Nettoabsorption von pflanzlichem Phosphor. Möglicherweise ist dies der höheren Unabhängigkeit amylolytischer Bakterien geschuldet.
Eine orale Gabe von Pektin vermindert die pc P-Nettoabsorption vermutlich aufgrund der Gelierungseigenschaften und des damit verbundenen modifizierten Fließverhaltens von Chymus numerisch, ohne allerdings einen Einfluss auf den pc Phytatabbau auszuüben. Die Verabreichung von Cellulose hat keinen Einfluss auf den Phytatabbau und die P-Nettoabsorption im pc Darmabschnitt.
2. Unabhängig von der Art der Kohlenhydrate wird Phytat in allen Behandlungen im postilealen Darmabschnitt vollständig abgebaut. Maisstärke wird bereits im Dünndarm nahezu komplett verdaut. Somit wird eine Beeinflussung der P-Umsetzungen im Dickdarm ausgeschlossen. Da bei Gabe von Maisstärke mehr Phytat in den Dickdarm einfließt, welches vollständig hydrolysiert wird, kommt es dort zu einer gewissen Absorption von P, die jedoch keinen nennenswerten Umfang erreicht. Sowohl Pektin als auch Cellulose bewirken eine geringfügige Sekretion von P ins Lumen des Dickdarms. Während die Ursache dafür im Fall der Cellulose vermutlich strukturbedingt ist, kann im Fall des Pektins eine höhere Inkorporation von P in Bakterienmasse angenommen werden.
3. Die Nettoabsorption von P im pc Darmbereich wird grundsätzlich durch die Zulage mineralischen P (MCP) gesteigert. Eine Beeinflussung des pc Phytatabbaus tritt nicht ein. Der mikrobielle Phytatabbau im Dickdarm wird hingegen durch die Zulage von MCP gehemmt. Dies ist vermutlich auf die Inhibierung der mikrobiellen Phytaseaktivität bzw. des Mikrobewachstums durch Phosphat bzw. auf eine erhöhte Komplexierung von Phytat mit Ca zurückzuführen. Bei gesteigerter Fermentationsintensität wird diese Hemmung abgeschwächt. Trotz der hohen P-Versorgung wird P, unabhängig von der Fermentationsintensität, scheinbar in den Dickdarm sekretiert.
4. Supplementierte mikrobielle Phytase führt grundsätzlich bei marginaler P-Versorgung aufgrund eines erhöhten Phytatabbaus zu einer Steigerung der Nettoabsorption von pflanzlichem P im pc Darmbereich. Postileal kommt es dadurch vermutlich zu einem P-Mangel der Mikroben der Darmflora, der auch durch den vollständigen Abbau von einfließendem Phytat nicht gedeckt werden kann. Dieser mikrobielle P-Mangel induziert vermutlich die Sekretion endogenen P in das Lumen des Dickdarms.

Die Bedeutung des Dickdarms für die Umsetzungen von P ist nach wie vor weitgehend unklar (black box). Kontroverse Ergebnisse deuten darauf hin, dass die P-Umsetzungen in diesem Darmbereich sehr sensitiv sind und sowohl homöostatischen als auch mikrobiellen Vorgängen stark unterliegen. Dabei spielen die Konzentrationen an P und Ca im Futter, die P-Quelle als auch die Gehalte an unverdaulicher Faser und fermentierbarer Substanz im Futter vermutlich eine wichtige Rolle. Generell führen unlösliche NSP aufgrund der negativen Wirkung der Faser besonders im Dickdarm zu einer Depression der Nähr- und Mineralstoffverdaulichkeit, während fermentierbare NSP aufgrund des hohen Wasserbindungsvermögens und der veränderten Fließeigenschaften besonders im Dünndarm eine negative Wirkung entfalten. Im Dickdarm führen fermentierbare NSP aufgrund der Steigerung des Mikrobewachstums zu einer erhöhten Fixierung von N und P in Bakterienmasse, wodurch sich auch postileal negative Effekte nachweisen lassen.

Von RODEHUTSCORD ET AL. (1998) werden die unvermeidlichen P-Verluste bei Schweinen mit etwa 7 mg/kg LM und Tag angegeben, wovon der größte Teil auf den Kot entfällt. Bislang finden die futterbedingten Einflüsse kaum Berücksichtigung für die faktorielle Ableitung des P-Bedarfes, da die dieser Quantifizierung zugrunde liegenden Untersuchungen auf Basis semisynthetischer Diäten mit geringen Gehalten an fermentierbarer Substanz realisiert wurden.

Dementsprechend sollte einerseits dem mikrobiellen P-Einbau sowie andererseits den strukturegebenen Effekten eine Bedeutung für die Quantifizierung der unvermeidlichen P-Verluste beigemessen werden.

Die quantitative Bestimmung des mikrobiell fixierten P-Anteils an den endogenen P-Verlusten könnte beispielsweise über den Einsatz von ^{32}P vorgenommen werden.

Zur weiteren Klärung der Bedeutung des Dickdarms sollte der Einfluss der P-Versorgung auf die mikrobielle Aktivität bzw. Zusammensetzung in Abhängigkeit vom mikrobiellen P-Bedarf weiterführend untersucht werden.

Dazu sollten *in vivo*-Untersuchungen, die aufgrund einer stark begrenzten Tierzahl meist nur unsichere Aussagen liefern, durch *in vitro*-Studien (z.B. semikontinuierliche Colon-Simulationstechnik, COSITEC) ergänzt werden. Für Letztere existieren bisher wenige Daten zur Reproduzierbarkeit. Als problematisch ist in diesem Zusammenhang beispielsweise die Verwendung von Inokulum von Schlachttieren anzusehen, da dies nur eine Momentaufnahme darstellt. Bisher wurde das COSITEC-Verfahren vereinzelt auch mit Darminhalten fistulierter Tiere durchgeführt (STÜCK ET AL., 1995). Darin bestünde unter Umständen eine Möglichkeit zur Untersuchung des Einflusses von P auf die Darmflora. Solche Untersuchungen könnten mit Messungen des aktiven P-Transportes über das Dickdarmepithel mittels Ussing-Kammer-Technik kombiniert werden.

7 Zusammenfassung

Die Verdaulichkeit des Phosphors (P) aus pflanzlichen Futtermitteln beim Schwein unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren. Neben Eigenschaften des Futtermittels, wie dem Phytatgehalt und der Aktivität pflanzeeigener Phytase, werden die P-Umsetzungen im Verdauungstrakt unter anderem von der Versorgung mit P und Calcium (Ca), den pH-Bedingungen sowie der Aktivität intestinaler und mikrobieller Phytasen beeinflusst.

P wird überwiegend im praecaecalen Darmabschnitt absorbiert, wobei der Aktivität intestinaler Phytasen beim Schwein dabei keine Bedeutung beigemessen wird. Unklar ist die Rolle des postilealen Darmabschnitts und dessen mikrobieller Besiedlung für die Umsetzungen von P. Es wird vermutet, dass die Futterzusammensetzung, und dabei insbesondere der Gehalt an bakteriell fermentierbarer Substanz, die Umsetzungen von P postileal über eine Stimulierung des mikrobiellen Wachstums beeinflusst.

In der vorliegenden Arbeit sollte zunächst untersucht werden, inwieweit unterschiedliche Kohlenhydrate den Abbau von Phytat und die Umsetzungen von P im praecaecalen und postilealen Darmbereich beeinflussen. Hierzu wurde im Versuch I mit wachsenden Schweinen (36 kg Lebendmasse) eine auf Mais und Sojaextraktionsschrot basierende Basaldiät (BD) mit einem marginalen Gehalt an verdaulichem P als Kontrolle eingesetzt. In drei weiteren Behandlungen wurde die BD mit jeweils 25% Ligno-Cellulose (BDc), Maisstärke (BDs) oder Apfelpektin (BDp) versetzt. Aufgrund auftretender Probleme wurde ergänzend ein weiterer Versuch (Ib) mit intakten Tieren durchgeführt. In zwei weiteren Versuchen sollte der Effekt einer Applikation von fermentierbarem Pektin (60 g/d) direkt in das Caecum wachsender Schweine (30 kg Lebendmasse) in Abhängigkeit von der Versorgung mit verdaulichem P untersucht werden. Dabei wurde der P-armen Basaldiät in Versuch II Monocalciumphosphat (MCP; 15 g/kg) bzw. in Versuch III eine mikrobielle Phytase (1.000 U/kg) zugelegt.

Die Versuche wurden mit jeweils acht mit einer einfachen T-Kanüle am terminalen Ileum versehenen Börgen nach dem Design eines unvollständigen doppelt besetzten 4 x 4 Lateinischen Quadrates durchgeführt. Nach einer 15-tägigen Adaptationsphase wurden für fünf Tage Kot und Harn sowie an weiteren zwei Tagen Chymus gesammelt (12 Stunden/d). Unter Verwendung von TiO_2 als unverdaulichem Marker wurden der Phytatabbau und die Verdaulichkeit des P (VQ-P) im praecaecalen und postilealen Darmabschnitt sowie im Gesamttrakt ermittelt. Da die Umsetzungen von P eng mit den Umsetzungen von Stickstoff (N) bzw. Ca verbunden sind, umfassten die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit auch diese beiden Elemente.

Die drei Kohlenhydrat-Substrate verursachten in Versuch I unterschiedliche Effekte auf die VQ-P. Maisstärke wurde erwartungsgemäß bereits im praecaecalen Darmbereich nahezu vollständig verdaut, bewirkte aber eine Verminderung des praecaecalen Phytatabbaus von 60 auf 18% und in Folge dessen eine tendenzielle Reduzierung der praecaecalen VQ-P von 26 auf 15%. Vermutlich hat die Zulage von Maisstärke zu einer Beeinflussung der Phytase

produzierenden Bakterien im Dünndarm geführt. Phytat wurde im postilealen Darmabschnitt vollständig abgebaut und 8,8% des in den Dickdarm einfließenden P wurden scheinbar noch absorbiert. Die Umsetzungen von N und Ca blieben von der Stärkezulage weitgehend unbeeinflusst.

Die zugelegte Cellulose wurde nahezu vollständig mit dem Kot wieder ausgeschieden und zeigte weder einen Einfluss auf den praecaecalen Phytatabbau noch auf die Umsetzungen von P und Ca im praecaecalen und postilealen Darmbereich. Es war lediglich eine tendenzielle Depression der N-Verdaulichkeit im postilealen Darmbereich von 52 auf 28% zu beobachten, welche vermutlich auf die geringe Fermentation der in den Dickdarm einfließenden Organischen Substanz zurückzuführen war.

Pektin wurde erst im Dickdarm nahezu vollständig mikrobiell fermentiert und verminderte die Verdaulichkeit des P im praecaecalen Darmbereich bei vergleichbar hohem praecaecalen Phytatabbau (64%) numerisch von 26 auf 17%. Die VQ-P im Gesamttrakt war signifikant von 28 auf 15% vermindert. Die gleichzeitige Depression der N-Verdaulichkeit deutet auf eine erhöhte mikrobielle Inkorporation von P und N aufgrund der durch Pektin gesteigerten Fermentation hin. Es kann aber auch eine negative Beeinflussung der Verdaulichkeit aufgrund der physiko-chemischen Struktur des Pektins und des damit verbundenen hohen Wasserbindungsvermögens eingetreten sein.

Die negativen Werte für die postileale P-Verdaulichkeit von -4,6 bzw. -4,4% bei Zulage von Pektin bzw. Cellulose legen eine geringfügige Nettosekretion von P ins Lumen des Dickdarms nahe. Generell konnte für den postilealen Darmbereich aber trotz des vollständigen Phytatabbaus keine nennenswerte Bedeutung für die quantitativen Umsetzungen von P nachgewiesen werden. Die Daten für den Gesamttrakt aus Versuch Ib bestätigen die in Versuch I erhaltenen Werte. Auch in dieser Untersuchung verursachte Pektin eine signifikante Verminderung der VQ-P von 28 auf 13%, während für Cellulose und Maisstärke kein Effekt nachgewiesen wurde.

Bei Vorlage der P-armen Basaldiäten in den Versuchen II und III wurden, unabhängig von der intracaecalen Pektinapplikation, im Mittel 30% des aufgenommenen P praecaecal verdaut. Phytat wurde im Dickdarm vollständig abgebaut, eine postileale Absorption von P war aber nicht nachweisbar.

Die Zulage von MCP in Versuch II bewirkte erwartungsgemäß eine Steigerung der praecaecalen VQ-P im Mittel von 29 auf 52% und eine Reduzierung der faecalen P-Exkretion von 70 auf 51%. Die praecaecalen Umsetzungen waren von der Pektinapplikation nicht beeinflusst. Während der Phytatabbau im praecaecalen Darmbereich von der MCP-Zulage unbeeinflusst blieb, wurden bei MCP-Zulage postileal nur 41% des einfließenden Phytats hydrolysiert. In Kombination mit Pektin war eine tendenzielle Steigerung des postilealen Phytatabbaus auf 59% zu beobachten.

Die Zulage von MCP schien einen hemmenden Einfluss auf die mikrobielle Aktivität im postilealen Darmabschnitt ausgeübt zu haben. Bei einer Steigerung der Fermentation durch

die intracaecale Infusion von Pektin wurde die hemmende Wirkung des MCP allerdings offenbar durch einen Anstieg des mikrobiellen P-Bedarfs zumindest teilweise aufgehoben. Die Supplementation der P-armen Basaldiät mit Phytase verursachte einen signifikanten Anstieg der praecaecalen VQ-P im Mittel von 32 auf 63%. Dies ging mit einem von 50 auf 88% gesteigerten praecaecalen Phytatabbau einher, wobei der Effekt der Phytase auf den praecaecalen Phytatabbau statistisch nicht nachweisbar war (52%), wenn den Schweinen Pektin intracaecal verabreicht wurde. Phytase induzierte vermutlich aufgrund des gesteigerten praecaecalen Phytatabbaus und der erhöhten VQ-P einen P-Mangel der Mikroben im Dickdarm. Möglicherweise war dies die Ursache für die gemessene Erhöhung der postilealen Nettosekretion von P (11%).

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung kann abgeleitet werden, dass die Umsetzungen von P von der Höhe des mikrobiellen P-Bedarfs und somit von der Intensität der mikrobiellen Fermentation beeinflusst werden. Hohe Gehalte an anorganischem P im Futter können die mikrobielle Aktivität hemmen. Weiterhin kann geschlussfolgert werden, dass aus der Hydrolyse von Phytat freigesetzter P postileal kaum noch absorbiert wird, aber vermutlich der Deckung des mikrobiellen P-Bedarfs dient, welcher wesentlich vom Gehalt an fermentierbarer Substanz im Futter abhängt. Neben einer erhöhten Inkorporation von N in Bakterienmasse, führt eine gesteigerte Fermentation vermutlich auch zu einem vermehrten mikrobiellen Einbau von P. Unlösliche Faserstoffe scheinen die VQ-P im praecaecalen Darmabschnitt hingegen nicht negativ zu beeinflussen.

Summary

The digestibility of phosphorus (P) from plant feedstuffs in the pig is affected by numerous factors. Besides characteristics of the feedstuff such as phytate content and intrinsic phytase activity, the metabolism of P in the digestive tract is influenced, amongst others, by the supply of P and calcium (Ca), pH-conditions, and activity of intestinal and microbial phytase.

P is absorbed predominantly in the precaecal (pc) section of the digestive tract, whereas no importance is attached to intestinal phytase activity in pigs. Little is known about the contribution of the postileal (pi) section of the digestive tract and its microbial community to the intestinal metabolism of P. It is assumed that feed composition and particularly the content of bacterial fermentable substances affect the pi metabolism of P by stimulating microbial growth.

The first objective of the present study was to investigate to which extent different carbohydrates affect the degradation of phytate and the precaecal and postileal metabolism of P. In experiment I a maize-soyabean meal-based diet (BD) with a marginal content of digestible P as the control was used. In further treatments the BD was supplemented with 25% lignocellulose, maize starch or apple pectin. Pigs in this experiment had a mean body weight of 36 kg. Due to problems another experiment (Ib) was conducted with intact pigs. In two further experiments the effect of an application of pectin (60 g/d) directly into the caecum of growing pigs (30 kg body weight), depending on the supply of digestible P was to be investigated. In experiment II, monocalciumphosphate (MCP, 15 g/kg) and in experiment III, a microbial phytase (1,000 U/kg) were added to the low P basal diet.

Each experiment was conducted using eight barrows, fitted with a simple T-cannula at the terminal ileum. The treatments were arranged in an incomplete double 4 x 4 Latin Square design. Following 15 days of adaptation, faeces and urine were collected for five days followed by two days of digesta collection (each 12 h/d). By means of TiO₂ inclusion phytate degradation and digestibility of P (DC-P) in the precaecal and postileal digestive section as well as in the total tract were calculated.

Since the metabolism of P is closely linked with the metabolism of nitrogen (N) and Ca these two elements were studied as well.

The carbohydrate sources caused different effects on the DC-P in experiment I. Maize starch, although nearly completely digested precaecally, caused a decrease in pc phytate degradation from 60 to 18% and, consequently, tended to reduce pc DC-P from 26 to 15%. Possibly, the addition of maize starch affected phytase producing bacteria in the small intestine. Phytate was completely degraded postileally and 8.8% of the P reaching the large intestine was apparently absorbed.

Added cellulose was excreted almost completely and affected neither pc phytate degradation nor on the metabolism of P and Ca in the pc and pi digestive section. There was an indication for a depression in N digestibility in the pi digestive section from 52 to

28%, which was presumably due to the low fermentation of organic matter from the cellulose in the large intestine.

Pectin, which was nearly completely fermented in the large intestine, decreased the pc digestibility of P numerically from 26 to 17%, without an effect on pc phytate degradation. DC-P in the total tract was diminished significantly from 28 to 15%. The concomitant reduction of N digestibility indicates an increased microbial incorporation of P and N due to the enhanced fermentation caused by pectin. Moreover, a negative impact on the digestibility due to the physico-chemical structure of pectin associated with the high water holding capacity may have been relevant.

The negative values for the postileal P digestibility of -4.6 and -4.4% with addition of pectin and cellulose, respectively, indicate a slight net secretion of P in the lumen of the large intestine. In general, despite the complete phytate degradation, a notable importance for the postileal digestive section could not be proven. Total tract data received from experiment Ib confirmed the values of experiment I. Also in this study pectin caused a significant decrease of DC-P from 28 to 13%, whereas there was found no effect for cellulose and maize starch.

With administration of the low P basal diets in experiments II and III, on average 30% of the ingested P was pc digested, independent of the intracaecal application of pectin. In spite of the differences in pc phytate degradation between both experiments, phytate was degraded completely, whereas hardly any postileal absorption of P took place.

In experiment II, as expected, addition of MCP caused an increase in pc DC-P on average from 29 up to 52% and a reduction of faecal P excretion from 70 to 51%. Precaecally, infused pectin showed no effects. Whereas pc phytate degradation remained unaffected by MCP addition (13%), only 41% of the phytate was hydrolyzed postileally. In combination with infused pectin, on the other hand, an increase in postileal phytate degradation up to 59% was observed.

Inorganic P seemed to have a negative effect on the microbial activity in the postileal digestive section. With enhancement of fermentation by intracaecal infusion of pectin, the negative effect of MCP obviously was abolished at least in part by an increase of microbial P requirement.

Supplementing the low P basal diet with phytase caused a significant increase of pc DC-P up to on average 63%. This could be due to enhanced precaecal phytate degradation from 50 up to 88%, whereas the effect of phytase on precaecal phytate degradation was not detectable (52%) when pectin was infused intracaecally.

Phytase presumably induced P deficiency of microbes in the large intestine, due to increased pc phytate degradation and DC-P. Possibly, this was the reason for the enhanced postileal net secretion of P (11%).

From the results of the present investigations it can be concluded that the metabolism of P is affected by the extent of microbial P requirement and, thus, by the intensity of microbial

fermentation, whereas high contents of inorganic P obviously can reduce microbial activity. Furthermore, it can be concluded, that P liberated upon hydrolysis of phytate is scarcely absorbed postileally, however, it presumably serves covering the microbial P requirement that substantially depends on the content of fermentable substance in the feed. Beside the increased incorporation of N in bacterial mass, enhanced fermentation presumably also leads to an increased bacterial incorporation of P. Insoluble fibre seems not negatively affect DC-P in the pc section of the digestive tract.

Literaturverzeichnis

- Agudelo, J. H.; M. D. Lindemann; G. L. Cromwell; M. C. Newman und R. D. Nimmo (2007). Virginiamycin improves phosphorus digestibility and utilization by growing-finishing pigs fed a phosphorus-deficient, corn-soybean meal diet. *Journal of Animal Science* 85: 2173-2182.
- Ahrens, F. und W. Kaufmann (1985). Messungen zur Fermentation im Dickdarm am Modell Miniaturschwein unter besonderer Berücksichtigung der Eiweißumsetzungen. *Zeitschrift für Tierphysiologie, Tierernährung und Futtermittelkunde* 53: 150-169.
- Ajakaiye, A.; M. Z. Fan, T. Archbold, R. R. Hacker, C. W. Forsberg und J. P. Phillips (2003). Determination of true digestive utilization of phosphorus and the endogenous phosphorus outputs associated with soybean meal for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 81: 2766-2775.
- Albers, N. und H. Henkel (1979). Untersuchungen über den Futterwert von pflanzlichen Zellwandbestandteilen beim Schwein. *Z. Tierphysiol. Tierernährg Futtermittelkde* 42: 113-121.
- Alexander, L. S.; A. Qu, S. A. Cutler, A. Mahajan, S. M. Lonergan, M. F. Rothschild, T. E. Weber, B. J. Kerr und C. H. Stahl (2008). Response to dietary phosphorus deficiency is affected by genetic background in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86: 2585-2595.
- Argenzio, R. A. und M. Southworth (1975). Sites of organic acid production and absorption in the gastrointestinal tract of the pig. *American Journal of Physiology* 228: 454-460.
- Augsburger, N. R.; D. M. Webel und D. H. Baker (2007). An *Escherichia coli* phytase expressed in yeast effectively replaces inorganic phosphorus for finishing pigs and laying hens. *J. Anim. Sci.* 85: 1192-1198.
- Awati, A.; M. W. Bosch, F. Tagliapietra, B. A. Williams und M. W. A. Verstegen (2006). Difference in in vitro fermentability of four carbohydrates and two diets, using ileal and faecal inocula from unweaned piglets. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86: 573-582.
- Bach Knudsen, K. E. und N. Canibe. (2000). Breakdown of plant carbohydrates in the digestive tract of pigs fed on wheat- or oat-based rolls. *J. Sci. Food Agric.* 80: 1253-1261.
- Bach Knudsen, K. E. und I. Hansen. (1991). Gastrointestinal implications in pigs of wheat and oat fractions. *British Journal of Nutrition* 65: 217-232.
- Bagheri, S. und L. Gueguen (1983). Influence des fibres alimentaires sur le métabolisme minéral. *Cahiers de Nutrition et de Dietétique* 18: 77-83.

- Ballam, G. C.; S. N. Talmadge und L. K. Kirby (1984). Effect of fiber and phytate source and of calcium and phosphorus level on phytate hydrolysis in the chick. *Poultry Science* 63: 333-338.
- Bergner, H.; M. Lück und J. Müller (1981). Untersuchungen zur Sorption von Aminosäuren an Diätkomponenten. 1. Mitteilung. Sorption verschiedener Aminosäuren an Weizenstrohmehl, Alkalilignin und Zellulose. *Archives of Animal Nutrition* 31: 265-271.
- Berk, A. und E. Schulz (1996). Beitrag zur Bedeutung nativer und mikrobieller Phytase für die Phosphorverwertung beim Schwein. *Züchtungskunde* 68: 229-239.
- Biehl, R. R und D. H. Baker (1997). 1α -Hydroxycholecalciferol does not increase the specific activity of intestinal phytase but does improve phosphorus utilization in both cecectomized and sham-operated chicks fed cholecalciferol-adequate diets. *Journal of Nutrition* 127: 2054-2059.
- Bindelle, J.; P. Leterme und A. Buldgen (2008). Nutritional and environmental consequences of dietary fibre in pig nutrition: a review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 12: 69-80.
- Bitar, K. und J. G. Reinhold (1972). Phytase and alkaline phosphatase activities in intestinal mucosae of rat, chicken, calf and man. *Biochimica et Biophysica Acta* 268: 442-452.
- Boguhn, J.; T. Baumgärtel; A. Dieckmann und M. Rodehutschord (2009). Determination of titanium dioxide supplements in different matrices using two methods involving photometer and inductively coupled plasma optical emission spectrometer measurements. *Arch. Anim. Nutr.* 63: 337-342.
- Boisen, S. und J. A. Fernández (1995). Prediction of the apparent ileal digestibility of protein and amino-acids in feedstuffs and feed mixtures for pigs by in vitro analyses. *Journal of Animal Feed Science and Technology* 51: 29-43.
- Böntgen-Simonet, R. (1993). Untersuchungen zur P-Verdaulichkeit und -Retention beim Mastschwein in Abhängigkeit von der P-Aufnahme. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Braude, R.; R. J. Fulford und A. G. Low (1976). Studies on digestion and absorption in the intestines of growing pigs. Measurements of the flow of digesta and pH. *Br. J. Nutr.* 36: 497-511.
- Breves, G., J. Dreyer und H. J. Oslage (1991). In vitro-studies on microbial hindgut metabolism in pigs. In: Kirchgessner, M. (Hrsg.). *Verdauungsphysiologie des Dickdarms. Advances in Animal Physiology and Animal Nutrition* 22: 89-92. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Breves, G. und H. Höller (1986). NPN and reduced P supply in sheep: effects on gastrointestinal N balances and microbial protein synthesis. *Arch. Anim. Nutr.* 36: 306

- Breves, G. und B. Schröder (1991). Comparative aspects of gastrointestinal phosphorus metabolism. *Nutrition Research Reviews* 4: 125-140.
- Brinch-Pedersen, H.; A. Olesen, S. K. Rasmussen und P.B. Holm (2000). Generation of transgenic wheat (*Triticum aestivum* L.) for constitutive accumulation of an *Aspergillus* phytase. *Molecular Breeding* 6: 195-206.
- Brown, R. C. ; J. Kelleher und M. S. Losowsky (1979). The effect of pectin on the structure and function of rat small intestine. *Br. J. Nutr.* 42: 357-365.
- Bruce, J. A. M. und F. Sundstøl (1995). The effect of microbial phytase in diets for pigs on apparent ileal and faecal digestibility, pH and flow of digesta measurements in growing pigs fed a high-fibre diet. *Canadian Journal of Animal Science* 75: 121-127.
- Campell, L. A. und G. H. Palmer (1978). Pectin. In: Spiller, G. A. und R. J. Amen (Hrsg.). *Topics in dietary fiber research*. Plenum Press, New York, S. 105-115.
- Canh, T. T.; M. W. A. Verstegen, A. J. A. Aarnik und J. W. Schrama (1997). Influence of dietary factors on nitrogen partitioning and composition of urine and feces of fattening pigs. *J. Anim. Sci.* 75: 700-706.
- Chabeauti, E.; J. Noblet und B. Carré (1991). Digestion of plant cell walls from four different sources in growing pigs. *Anim. Feed Sci. Techn.* 32: 207-213.
- Cheryan, M (1980). Phytic acid interactions in food systems. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 13: 297-335.
- Choct, M. und A. Kocher (2000). Non-starch-carbohydrates: Digestion and its secondary effects in monogastrics. *Proceedings of the Nutrition Society of Australia* 24: 31-38.
- Cooper, J. R. und H. S. Gowing (1983). Mammalian small intestinal phytase (*EC* 3.1.3.8). *Br. J. Nutr.* 50: 673-678.
- Cramer, C. F. (1961). Progress and rate of absorption of radiophosphorus through the intestinal tract of rats. *Can. J. Biochem. Physiol.* 39: 915-922.
- Cree, T. C.; D. M. Wadley und J. A. Marlett (1986). Effect of preventing coprophagy in the rat on neutral detergent fiber digestibility and apparent calcium absorption. *J. Nutr.* 116: 1204-1208.
- Cummings, J. H. (1981). Dietary Fibre. *British Medical Bulletin.* 37: 65-70.
- Cummings, J. H. und H. N. Englyst (1995). Gastrointestinal effects of food carbohydrate. *American Journal of Clinical Nutrition* 61: 938S-945S.
- Cummings, J. H.; D. A. T. Southgate, W. J. Branch, H. S. Wiggins, H. Houston, D. J. A. Jenkins, T. Jivray und M. J. Hill (1979). The digestion of pectin in the human gut and its effect on calcium absorption and large bowel function. *Br. J. Nutr.* 41: 477-487.

- Davies, M. I.; G. M. Ritcey und I. Motzok (1970). Intestinal phytase and alkaline phosphatase of chicks: Influence of dietary calcium, inorganic and phytate phosphorus and vitamin D₃. *Poult. Sci.* 49: 1280-1286.
- De Angelis, M.; G. Gallo, M. R. Corbo, P. L. H. McSweeney, M. Faccia, M. Giovine und M. Gobbetti (2003). Phytase activity in sourdough lactic acid bacteria: purification and characterization of a phytase from *Lactobacillus sanfranciscensis* CB 1. *Journal of Food Microbiology* 87: 259-270.
- De Lange, C. F. M. (2000). Characterisation of the non-starch polysaccharides. In: Moughan, P. J.; M. W. A. Verstegen und M. I. Visser-Reyneveld (Hrsg.). *Feed evaluation – principles and practice*. S. 77-92. Wageningen Academic Publishers, Niederlanden.
- De Lange, C. F. M.; W. C. Sauer, R. Mosenthin und W. B. Souffrant (1989). The effect of feeding different protein-free diets on the recovery and amino acid composition of endogenous protein collected from the distal ileum. *J. Anim. Sci.* 67: 746-754.
- De Lange, C. F. M.; W. B. Souffrant und W. C. Sauer (1990). Real ileal protein and amino acid digestibilities in feedstuffs for growing pigs as determined with the ¹⁵N-Isotope dilution technique. *J. Anim. Sci.* 68: 409-418.
- Den Hartog, L. A.; J. Huisman, W. J. G. Thielen, G. H. A. van Schayk, H. Boer und E. J. van Weerden (1988). The effect of including various structural polysaccharides in pig diets on ileal and faecal digestibility of amino acids and minerals. *Livestock Production Science* 18: 157-170.
- Deshpande, S. S. und S. Damodaran (1989). Effect of phytate on solubility, activity and conformation of trypsin and chymotrypsin. *J. Food Sci.* 54: 695-699.
- De Wilde, R. (1980). Influence of supplementing citruspectins to a diet with and without antibiotics on the digestibility of the pectins and the other nutrients in pigs. *Z. Tierphysiol. Tierernährg. Futtermittelkde.* 43: 109-116.
- Dilger, R. N. und O. Adeola (2006). Estimation of true phosphorus digestibility and endogenous phosphorus loss in growing pigs fed conventional and low-phytate soybean meals. *J. Anim. Sci.* 84: 627-634.
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. [DLG] (1999). *Schweinefütterung auf der Basis des Verdaulichen Phosphors*. DLG-Information Nr. 1/1999
- Dongowski, G.; A. Lorenz und J. Proll (2002). The degree of methylation influences the degradation of pectin in the intestinal tract of rats and in vitro. *J. Nutr.* 132: 1935-1944.
- Drochner, W. (1984). Einfluß wechselnder Rohfaser- und Pektingehalte im Futter auf einige praecaecale und postileale Verdauungsvorgänge beim wachsenden Schwein. *Adv. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 14.
- Drochner, W. (1993). Digestion of carbohydrates in the pig. *Arch. Anim. Nutr.* 43: 95-116.

- Drochner, W.; A. Kerler und B. Zacharias (2004). Pectin in pig nutrition, a comparative review. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 88: 367-380.
- Dunaif, G. und B. O. Schneeman (1981). The effect of dietary fiber on human pancreatic enzyme activity in vitro. *Am. J. Clin. Nutr.* 34: 1034-1035.
- Düngelhoef, M. und M. Rodehutsord (1995). Wirkung von Phytasen auf die Verdaulichkeit des Phosphors beim Schwein. *Übersichten Tierernährung* 23: 133-157.
- Düngelhoef, M.; M. Rodehutsord, H. Spiekers und E. Pfeffer (1994). Effect of supplemental microbial phytase on availability of phosphorus contained in maize, wheat and triticale to pigs. *Anim. Feed Sci. Techn.* 49: 1-10.
- Durand, M. und S. Komisarczuk (1988). Influence of major minerals on rumen microbiota. *J. Nutr.* 118: 249-260.
- Eastwood, M. A. und E. R. Morris (1992). Physical properties of dietary fiber that influence physiological function: a model for polymers along the gastrointestinal tract. *Am. J. Clin. Nutr.* 55: 436-442.
- Eeckhout, W. und M. De Paepe (1994). Total phosphorus, phytate-phosphorus and phytase activity in plant feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Techn.* 47: 19-29.
- Ehle, F. R.; J. L. Jeraci, J. B. Robertson und P. J. Van Soest (1982). The influence of dietary fiber on digestibility, rate of passage and gastrointestinal fermentation in pigs. *J. Anim. Sci.* 55: 1071-1081.
- Engelen, A. J.; F. C. Van der Heeft, P. H. G. Randsdorp und E. L. C. Smit (1994). Simple and rapid determination of phytase activity. *Journal of AOAC International* 77/3: 760-764.
- Erdman, J. W. (1979). Oilseed phytates: nutritional implications. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 56: 736-741.
- Fan, M. Z., T. Archbold, W. C. Sauer, D. Lackeyram, T. Rideout, Y. Gao, C. F. M. de Lange und R. R. Hacker (2001). Novel methodology allows simultaneous measurement of true phosphorus digestibility and the gastrointestinal endogenous phosphorus outputs in studies with pigs. *J. Nutr.* 131: 2388-2396.
- Farrell, D. J. und K. A. Johnson (1970). Utilization of cellulose by pigs and its effect on caecal function. *Animal Production* 14: 209-217.
- Fernández, J. A. und J. N. Jørgensen (1986). Digestibility and absorption of nutrients as affected by fibre content in the diet of the pig. Quantitative aspects. *Livest. Prod. Sci.* 15: 53-71.
- Fernández, J. A.; H. Jørgensen und A. Just (1986). Comparative digestibility experiments with growing pigs and adult sows. *Anim. Prod.* 43: 127-132.

- Février, C. D.; A. Bourdon, A. Aumaitre, J. Peiniau, Y. Lebreton, Y. Jaguelin, N. Meziere und A. Blanchard (1988). Digestive capacity of the Chinese pig – Effect of dietary fibre on digestibility and intestinal and pancreatic enzymes. In: Proc. of IV. Int. Seminar of Digest. Physiol. in Pigs. S. 172-179. Jablona, Polen.
- Forman, L. P. und B. O. Schneeman (1980). Effects of dietary pectin and fat on the small intestinal contents and exocrine pancreas of rats. J. Nutr. 110: 1992-1999.
- Francis, G. L.; J. M. Gawthorne und G. B. Storer (1978). Factors affecting the activity of cellulases isolated from the rumen digesta of sheep. Appl. Environ. Microbiol. 36: 643-649.
- Freire, J. P. B., A. J. G. Guerreiro, L. F. Cunha und A. Aumaitre (2000). Effect of dietary fibre source on total tract digestibility, caecum volatile fatty acids and digestive transit time in the weaned piglet. Anim. Feed Sci. Techn. 87: 71-83.
- Furuya, S. und Y. Kaji (1992). The effects of feed intake and purified cellulose on the endogenous ileal amino acid flow in growing pigs. Br. J. Nutr. 68: 463-472.
- Gädeken, D. (1969). Untersuchungen über Pektinstoffe als Bestandteile von Futtermitteln. Archiv für Tierernährung 19: 409-420.
- Gallant, D. J.; B. Bouchet, A. Buleon und S. Perez (1992). Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzymatic degradation. European Journal of Clinical Nutrition 46: 3-16.
- Gargallo, J. und D. R. Zimmermann (1981). Effects of dietary cellulose levels on intact and cecectomized pigs. J. Anim. Sci. 53: 395-402.
- Gesellschaft für Ernährungsphysiologie [GfE], Ausschuss für Bedarfsnormen der GfE (1987). Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 4 Schweine. Frankfurt (Main).
- Gesellschaft für Ernährungsphysiologie [GfE] (1994). Die Bestimmung des verdaulichen Phosphors beim Schwein. Proc Soc Nutr Physiol 2: 113-119.
- Golovan, S. P.; M. A. Hayes, J. P. Phillips und C. W. Forsberg (2001a). Transgenic mice expressing bacterial phytase as a model for phosphorus pollution control. Nature 19: 429-433.
- Golovan, S. P.; R. G. Meidinger, A. Ajakaiye, M. Cottrill, M. Z. Wiederkehr, D. J. Barney, C. Plante, J. W. Pollard, M. Z. Fan, M. A. Hayes, J. Laursen, J. P. Hjorth, R. R. Hacker, J. P. Phillips und C. W. Forsberg (2001b). Pigs expressing salivary phytase produce low-phosphorus manure. Nature 19: 741-745.
- Goodland, J. S. und J. C. Mathers (1990). Large bowel fermentation in rats given diets containing raw peas (*Pisum sativum*). Br. J. Nutr. 64: 569-587.
- Graham, H.; K. Hesselman und P. Åman (1986). The influence of wheat bran and sugar-beet pulp on the digestibility of dietary components in a cereal-based pig diet. J. Nutr. 116: 242-251.

- Grases, F.; B. M. Simonet, J. G. March und R. M. Prieto (2000). Inositol hexakisphosphate in urine: the relationship between oral intake and urinary excretion. *BJU International* 85: 138-142.
- Grases, F.; B. M. Simonet, I. Vucenik, R. M. Prieto, A. Costa-Bauzá, J. G. March und A. M. Shamsuddin (2001). Absorption and excretion of orally administered inositol hexaphosphate (IP-6 or phytate) in humans. *BioFactors* 15: 53-61.
- Greiner, R. (2006). Advances in Phytase Research. 9. Tagung Schweine- und Geflügelernährung. 28.-30.11.2006 in Halle/Saale. Tagungsband S. 11-18.
- Greiner, R. (2007). Phytase-degrading enzymes: Regulation of synthesis in microorganisms and plants. In: Turner, B. L.; A. E. Richardson und E. Mullaney (Hrsg.). *Inositol phosphates in the soil-plant-animal system*. CABI Publishing. S. 62-97.
- Greiner, R.; N.-G. Carlsson und M. Larsson Alminger (2000). Stereospecificity of *myo*-inositol hexakisphosphate dephosphorylation by a phytate-degrading enzyme of *Escherichia coli*. *Journal of Biotechnology* 84: 53-62.
- Greiner, R.; U. Konietzny und K.-D. Jany (1993). Purification and characterization of two phytases from *Escherichia coli*. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 303: 107-113.
- Greiner, R.; U. Konietzny und A. L. C. H. Villavicencio (2003). Reduction in phytate content during lactic acid fermentation. *Proceedings of the EURO Food Chem XII Congress: Strategies for Safe Foods. 2: 670-673*.
- Haros, M.; M. Bielecka und Y. Sanz (2005). Phytase activity as a novel metabolic feature in *Bifidiobacterium*. *FEMS Microbiology Letters* 247: 231-239.
- Harper, A. F.; E. T. Kornegay, T. C. Schell (1997). Phytase supplementation of low-phosphorus growing-finishing pig diets improves performance, phosphorus digestibility, and bone mineralization and reduces phosphorus excretion. *J. Anim. Sci.* 75: 3174-3186.
- Heller, S. N.; L. R. Hackler, J. M. Rivers, P. J. Van Soest, D. A. Roe, B. A. Lewis und J. Robertson (1980). Dietary fiber: the effect of particle size of wheat bran on colonic function in young adult men. *Am. J. Clin. Nutr.* 33: 1734-1744.
- Hill, J. E.; S. M. Hemmingsen, B. G. Goldade, T. J. Dumonceaux, J. Klassen, R. T. Zijlstra, S. H. Goh und A. G. van Kessel (2005). Comparison of ileum microflora of pigs fed corn-, wheat-, or barley-based diets by chaperonin-60 sequencing and quantitative PCR. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 867-875.
- Högberg, A. (2003). Cereal non-starch polysaccharides in pig diets. Dissertation. Schwedische Universität für Agrarwissenschaften. Uppsala.
- Hovenjürgen, M. (2000). Futter- und tierbedingte Einflüsse auf die Phosphorverdaulichkeit beim Schwein. Dissertation. Universität Bonn.

- Hovenjürgen, M; E. Pfeffer und M. Rodehutsord (2002). Einfluss der Düngung auf die Verdaulichkeit des Phosphors aus heimischen pflanzlichen Futtermitteln beim Schwein. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 87, 37 Seiten.
- Hu, H. L.; A. Wise und C. Henderson (1996). Hydrolysis of phytate and inositol tri-, tetra- and penta-phosphates by the intestinal mucosa of the pig. *Nutr. Res.* 16: 781-787.
- Igbasan, F. A.; K. Männer, G. Miksch, R. Borriss, A. Farouk und O. Simon (2000). Comparative studies on the in vitro properties of phytases from various microbial origins. *Arch. Anim. Nutr.* 53: 353-373.
- Iqbal, T. H.; K. Ö. Lewis und B. T. Cooper (1994). Phytase activity in the human and rat small intestine. *Gut* 35: 1233-1236.
- Irving, G. C. J. (1980). Phytase. In: Cosgrove, D. J. (Hrsg.). Inositol phosphates, their chemistry, biochemistry and physiology. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York. S. 85-98.
- Irving, G. C. J. und D. J. Cosgrove (1971). Inositol phosphate phosphatases of microbial origin. Some properties of a partially purified bacterial (*Pseudomonas* sp.) phytase. *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science* 24: 547-557.
- IUPAC-IUB: Commission on Biochemical Nomenclature (1977). Nomenclature of phosphorus-containing compounds of biochemical importance. *Eur. J. Biochem.* 79: 1-9.
- IUPAC-IUB: Recommendations of the Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry (1984). Enzyme nomenclature. Academic Press Inc., Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo.
- Jagger, S.; J. Wiseman, D. J. A. Cole und J. Craigon (1992). Evaluation of inert markers for the determination of ileal and faecal apparent digestibility values in the pig. *Br. J. Nutr.* 68: 729-739.
- Jensen, B. B. (2001). Possible ways of modifying type and amount of products from microbial fermentation in the gut. In: Piva, A.; K. E. Bach-Knudsen und J. E. Lindberg (Hrsg.). Gut environment of pigs. Nottingham university press, Nottingham. S. 181-200.
- Jensen, N. S. und E. Canale-Parola (1986). *Bacteroides pectinophilus* sp. nov. and *Bacteroides galacturonicus* sp. nov.: Two pectinolytic bacteria from the human intestinal tract. *Appl. Environ. Microbiol.* 52: 880-887.
- Jensen, B. B. und H. Jørgensen (1994). Effect of dietary fiber on microbial activity and microbial gas production in various regions of the gastrointestinal tract of pigs. *Appl. Environ. Microbiol.* 60: 1897-1904.

- Jeroch, H.; W. Drochner und O. Simon (1999). Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Jin, L.; L. P. Reynolds, D. A. Redmer, J. S. Caton und J. D. Crenshaw (1994). Effects of dietary fiber on intestinal growth, cell proliferation and morphology in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72: 2270-2278.
- Jongbloed, A. W. und P. A. Kemme (1990). Apparent digestible phosphorus in the feeding of pigs in relation to availability, requirement and environment. 1. Digestible phosphorus in feedstuffs from plant and animal origin. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38: 567-575.
- Jongbloed, A. W.; Z. Mroz, R. van der Weij-Jongbloed und P. A. Kemme (2000). The effects of microbial phytase, organic acids and their interaction in diets for growing pigs. *Livest. Prod. Sci.* 67: 112-122.
- Jongbloed, A. W.; Z. Mroz und P. A. Kemme (1992). The effect of supplementary *Aspergillus niger* phytase in diets for pigs on concentration and apparent digestibility of dry matter, total phosphorus, and phytic acid in different sections of the alimentary tract. *J. Anim. Sci.* 70: 1159-1168.
- Jørgensen, H. und A. Just (1988). Effect of different dietary components on site of absorption/site of disappearance of nutrients. In: Buraczewska, L.; S. Buraczewski, B. Pastuszewska und T. Zebrowska (Hrsg.). Proceedings of the 4th International Seminar at the Institute of Animal Physiology and Nutrition, Jablona, Polen. S. 230-239.
- Jørgensen, H.; A. Serena, M. S. Hedemann und K. E. Bach Knudsen (2007). The fermentative capacity of growing pigs and adult sows fed diets with contrasting type and level of dietary fibre. *Livestock Science* 109: 111-114.
- Jørgensen, H.; X. Zhao und B. O. Eggum (1996). The influence of dietary fibre and environmental temperature on the development of the gastrointestinal tract, digestibility, degree of fermentation in the hind-gut and energy metabolism in pigs. *Br. J. Nutr.* 75: 365-378.
- Jung, H. G. und G. C. Fahey, Jr. (1983). Nutritional implications of phenolic monomers and lignin: A review. *J. Anim. Sci.* 57: 206-219.
- Just, A., H. Jørgensen und J. A. Fernández (1981). The digestive capacity of the caecum-colon and the value of the nitrogen absorbed from the hind gut for protein synthesis in pigs. *Br. J. Nutr.* 46: 209-219.
- Kass, M. L.; P. J. Van Soest, W. G. Pond, B. Lewis und R. E. McDowell (1980). Utilization of dietary fiber from alfalfa by growing swine. I. Apparent digestibility of diet components in specific segments of the gastrointestinal tract. *J. Anim. Sci.* 50: 175-191.
- Kavanagh, S.; P. B. Lynch, F. O'Mara und P. J. Caffrey (2001). A comparison of total collection and marker technique for the measurement of apparent digestibility of diets for growing pigs. *Anim. Feed Sci. Techn.* 89: 49-58.

- Kemme, P. A., A. Lommen, L. H. de Jonge, J. D. Van der Klis, A. W. Jongbloed, Z. Mroz und A. C. Beynen (1999c). Quantification of inositol phosphates using ^{31}P nuclear magnetic resonance spectroscopy and its application in animal nutrition research. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 47: 5116-5121.
- Kemme, P. A.; J. S. Radcliffe, A. W. Jongbloed, Z. Mroz (1997). Factors affecting phosphorus and calcium digestibility in diets for growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 75: 2139-2146.
- Kemme, P. A.; A. W. Jongbloed, Z. Mroz und A. C. Beynen (1998). Diurnal variation in degradation of phytic acid by plant phytase in the pig stomach. *Liv. Prod. Sci.* 54: 33-44.
- Kemme, P. A.; A. W. Jongbloed, Z. Mroz, J. Kogut und A. C. Beynen (1999a). Digestibility of nutrients in growing-finishing pigs is affected by *Aspergillus niger* phytase, phytate and lactic acid levels. 1. Apparent ileal digestibility of amino acids. *Livest. Prod. Sci.* 58: 107-117.
- Kemme, P. A.; A. W. Jongbloed, Z. Mroz, J. Kogut und A. C. Beynen (1999b). Digestibility of nutrients in growing-finishing pigs is affected by *Aspergillus niger* phytase, phytate and lactic acid levels. 2. Apparent total tract digestibility of phosphorus, calcium and magnesium and ileal degradation of phytic acid. *Livest. Prod. Sci.* 58: 119-127.
- Kemme, P. A.; U. Schlemmer, Z. Mroz und A. W. Jongbloed (2006). Monitoring the stepwise phytate degradation in the upper gastrointestinal tract of pigs. *J. Sci. Food Agric.* 86: 612-622.
- Kenward, M. G. und J. H. Roger (1997). Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics* 53: 983-997.
- Kerler, A. (2002). Zur Wirkung verschiedener Pektindosierungen auf Verdauungsprozesse beim Absetzferkel. Dissertation. München/Hohenheim.
- Ketaren, P. P. ; E. S. Batterham, E. B. Dettmann und D. J. Farrell (1993). Phosphorus studies in pigs. 3. Effect of phytase supplementation on the digestibility and availability of phosphorus in soya-bean meal for grower pigs. *Br. J. Nutr.* 70: 289-311.
- Keys, jr., J. E., P. J. Van Soest und E. P. Young (1970). Effect of increasing dietary cell wall content on the digestibility of hemicellulose and cellulose in swine and rats. *J. Anim. Sci.* 31: 1172-1177.
- Kim. B. G.; M. D. Lindemann, G. L. Cromwell, A. Balfagon und J. H. Agudelo (2007). The correlation between passage rate of digesta and dry matter digestibility in various stages of swine. *Livest. Sci.* 109: 81-84.
- 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.
- Kirchgessner, M.; H. L. Müller, F. X. Roth, R. Ascherl und W. Erhardt (1987). Intracaecal infundierte Kohlenhydrate sowie Casein und ihr Einfluß auf die Energie- und N-Bilanz von Sauen. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 58: 241-253.
- Knuckles, B. E. (1988). Effect of phytate and other myo-inositol phosphate esters on lipase activity. *J. Food Sci.* 53: 250-252.
- Knuckles, B. E. und A. A. Betschart (1987). Effect of phytate and other myo-inositol phosphate esters on alpha-amylase digestion of starch. *Journal of Food Science* 52: 719-721.
- Komisarczuk, S.; R. J. Merry und A. B. McAllan (1987). Effect of different levels of phosphorus on rumen microbial fermentation and synthesis determined using a continuous culture technique. *Br. J. Nutr.* 57: 279-290.
- Konietzny, U. und R. Greiner (2002). Molecular and catalytic properties of phytate-degrading enzymes (phytases). *J. Food Sci. Techn.* 37: 791-812.
- Konietzny U. und R. Greiner (2004). Bacterial phytase: Potential application, *in vivo* function and regulation of its synthesis. *Brazilian Journal of Microbiology* 35: 11-18.
- Lantzsch, H.-J. (1990). Untersuchungen über ernährungsphysiologische Effekte des Phytats bei Monogastriern (Ratte, Schwein). *Übers. Tierernährg.* 18: 197-212.
- Lantzsch, H.-J.; S. E. Scheuermann und K. H. Menke. (1988a). Untersuchungen zur gastro-intestinalen Hydrolyse von Phytat aus Weizen, Gerste und Mais bei jungen Schweinen. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 59: 273-284.
- Lantzsch, H.-J.; S. E. Scheuermann und K. H. Menke (1988b). Einfluß verschiedener Phytatherkünfte auf den P-, Ca- und Zn-Stoffwechsel junger Schweine bei unterschiedlicher Zn-Versorgung. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 60: 146-157.
- Laplace, J. P.; B. Darcy-Vrillon, J. M. Pérez, Y. Henry, S. Giger und D. Sauvant (1989). Associative effects between two fibre sources on ileal and overall digestibilities of amino acids, energy and cell-wall components in growing pigs. *Br. J. Nutr.* 61: 75-87.
- Larsen, T. und B. Sandström (1993). Effect of dietary calcium level on mineral and trace element utilization from a rapeseed (*Brassica napus* L.) diet fed to ileum-fistulated pigs. *Br. J. Nutr.* 69: 211-224.
- Lee, D. B. N.; M. W. Walling, U. Gafer, V. Silis und J. W. Coburn (1980). Calcium and inorganic phosphate transport in rat colon. *Journal of Clinical Investigation* 65: 1326-1331.

- Le Goff, G.; J. van Milgen und J. Noblet (2002). Influence of dietary fibre on digestive utilization and rate of passage in growing, finishing pigs and adult sows. *J. Anim. Sci.* 74: 503-515.
- Lei, X. G.; P. K. Ku, E. R. Miller, D. E. Ullrey und M. T. Yokoyama (1993). Supplemental microbial phytase improves bioavailability of dietary zinc to weanling pigs. *J. Nutr.* 123: 1117-1123.
- Leser, T. D.; J. Z. Amenuvor, T. K. Jensen, R. H. Lindecrona, M. Boye und K. Møller (2002). Culture-independent analysis of gut bacteria: the pig gastrointestinal tract microbiota revisited. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 673-690.
- Li, J.; C. E. Hegeman, R. W. Hanlon, G. H. Lacy, D. M. Denbow und E. A. Grabau (1997). Secretion of active recombinant phytase from soybean cell-suspension cultures. *Plant Physiology* 114: 1103-1111.
- Li, S.; W. C. Sauer und M. Z. Fan (1993). The effect of dietary crude protein level on amino acid digestibility in early-weaned pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 70: 26-37.
- Liao, S. F.; A. K. Kies, W. C. Sauer, Y. C. Zhang, M. Cervantes und J. M. He (2005). Effect of phytase supplementation to a low- and high-phytate diet for growing pigs on the digestibilities of crude protein, amino acids, and energy. *J. Anim. Sci.* 83: 2130-2136.
- Liu, J.; D. W. Bollinger, D. R. Ledoux und T. L. Veum (2000). Effects of dietary calcium:phosphorus ratios on apparent absorption of calcium and phosphorus in the small intestine, cecum, and colon of pigs. *J. Anim. Sci.* 78: 106-109.
- Livesey, G.; T. Smith, B. O. Eggum, I. H. Tetens, M. Nyman, M. Roberfroid, N. Delzenne, T. F. Schweizer und J. Decombaz (1995). Determination of digestible energy values and fermentabilities of dietary fibre supplements: a European interlaboratory study *in vivo*. *Br. J. Nutr.* 74: 289-302.
- Lolas, G. M. und P. Markakis (1977). The phytase of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *J. Food Sci.* 42: 1094-1097.
- Longland, A. C.; A. G. Low, D. B. Quelch und S. P. Bray (1993). Adaptation to the digestion of non-starch polysaccharide in growing pigs fed on cereal or semi-purified basal diets. *Br. J. Nutr.* 70: 557-566.
- Lopez, H. W.; C. Coudray, J. Bellanger, H. Younes, C. Demigné und C. Rémésy (1998). Intestinal fermentation lessens the inhibitory effects of phytic acid on mineral utilization in rats. *J. Nutr.* 128: 1192-1198.
- Lopez, H. W.; F. Vallery, M. A. Levrat-Verny, C. Coudray, C. Demigné und C. Rémésy (2000). Dietary phytic acid and wheat bran enhance mucosal phytase activity in rat small intestine. *J. Nutr.* 130: 2020-2025.
- Lopez, Y.; D. T. Gordon und M. L. Fields (1983). Release of phosphorus from phytate by natural lactic acid fermentation. *J. Food Sci.* 48: 953-985.

- Lorz, A. und E. Metzger (1999). Tierschutzgesetz: Tierschutzgesetz mit allgemeiner Verwaltungsvorschrift, Rechtsverordnungen und Europäischen Übereinkommen: Kommentar. 5. Auflage, Beck Verlag, München.
- Low, A. G. (1985). Role of dietary fibre in pig diets. In: W. Haresign und D. J. A. Cole (Hrsg.). *Recent Advances in Animal Nutrition*. London, Butterwoths. S. 87-112.
- Low, A. G. (1989). Secretory response of the pig gut to non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Techn.* 23: 55-65.
- Maenz, D. D. (2001). Enzymatic characteristics as they relate to their use in animal feeds. In: Bedford, M. R. und G. G. Partridge (Hrsg.). *Enzymes in farm animal nutrition*. S. 61-84. CAB International
- Maenz, D. D. und H. L. Classen (1998). Phytase activity in the small intestinal brush border membrane of the chicken. *Poult. Sci.* 77: 557-563.
- Martinez-Puig, D.; J. F. Pérez, M. Castillo, A. Andaluz, M. Anguita, J. Morales und J. Gasa (2003). Consumption of raw potato starch increases colon length and fecal excretion of purine bases in growing pigs. *J. Nutr.* 133: 134-139.
- McDowell, L. R. (2003). Minerals in animal and human nutrition. Second edition. Chapter 2. Calcium and Phosphorus. S. 33-100. Elsevier Health Sciences. Amsterdam.
- Mendoza, C. (2002). Effect of genetically modified low phytic acid plants on mineral absorption. *J. Food Sci. Techn.* 37: 759-767.
- Metzler, B. U.; R. Mosenthin, T. Baumgärtel und M. Rodehutschord (2009a). Effects of fermentable carbohydrates and low dietary phosphorus supply on the chemical composition of faecal bacteria and microbial metabolites in the gastrointestinal tract of pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 93: 130-139.
- Metzler, B. U.; R. Mosenthin, T. Baumgärtel und M. Rodehutschord (2008). The effect of dietary phosphorus and calcium level, phytase supplementation, and ileal infusion of pectin on the chemical composition and carbohydrase activity of fecal bacteria and the level of microbial metabolites in the gastrointestinal tract of pigs. *J. Anim. Sci.* 86: 1544-1555.
- Metzler, B. U.; W. Vahjen, T. Baumgärtel, M. Rodehutschord und R. Mosenthin (2009b). Changes in bacterial populations in the ileum of pigs fed different sources of fermentable carbohydrates. *Anim. Feed Sci. Techn.* 148: 68-89.
- Metzler-Zebeli, B. U. (2007). Effects of fermentable carbohydrates and dietary P supply on bacterial P incorporation, activity and composition in the gastrointestinal tract of pigs. Dissertation. Universität Hohenheim.
- Montgomery, L. und J. M. Macy (1982). Characterization of rat cecum cellulolytic bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 44: 1435-1443.

- Moore, J. H. und C. Tyler (1955a). Studies on the intestinal absorption and excretion of calcium and phosphorus in the pig. 1. A critical study of the Bergeim Technique for investigating the intestinal absorption and excretion of calcium and phosphorus. *Br. J. Nutr.* 9: 63-80.
- Moore, J. H. und C. Tyler (1955b). Studies on the intestinal absorption and excretion of calcium and phosphorus in the pig. 2. The intestinal absorption and excretion of radioactive calcium and phosphorus. *Br. J. Nutr.* 9: 81-93.
- Moore, R. J. und T. L. Veum (1983). Adaptive increase in phytate digestibility by phosphorus-deprived rats and the relationship of intestinal phytase (EC 3.1.3.8) and alkaline phosphatase (EC 3.1.3.1) to phytate utilization. *Br. J. Nutr.* 49: 145-152.
- Mosenthin, R.; E. Hambrecht und W. C. Sauer (1999). Utilization of different fibres in piglet feeds. In: Garnsworthy, P. C. und J. Wiseman (Hrsg.). *Rec. Adv. Anim. Nutr.* Nottingham university press, Nottingham. S. 227-256.
- Mosenthin, R.; W. C. Sauer und F. Ahrens (1994). Dietary pectin's effect on ileal and fecal amino acid digestibility and exocrine pancreatic secretions in growing pigs. *J. Nutr.* 124: 1222-1229.
- Mosenthin, R. W. C. Sauer und C. F. M. de Lange (1992a). Tracer studies of urea kinetics in growing pigs: I. The effect of intravenous infusion of urea on urea recycling and the site of urea secretion into the gastrointestinal tract. *J. Anim. Sci.* 70: 3458-3466.
- Mosenthin, R.; W. C. Sauer, H. Henkel, F. Ahrens und C. F. M. de Lange (1992b). Tracer studies of urea kinetics in growing pigs: II. The effect of starch infusion at the distal ileum on urea recycling and bacterial nitrogen excretion. *J. Anim. Sci.* 70: 3467-3472.
- Mroz, Z.; A. W. Jongbloed und P. A. Kemme (1994). Apparent digestibility and retention of nutrients bound to phytate complexes as influenced by microbial phytase and feeding regimen in pigs. *J. Anim. Sci.* 72: 126-132.
- Müller, H. L. und M. Kirchgessner (1985). Energetische Verwertung von Pektin bei Sauen. *Z. Tierphysiol. Tierernähr. Futtermittelkde.* 54: 14-20.
- Näsi, M (1990). Microbial phytase supplementation for improving availability of plant phosphorus in the diet of the growing pigs. *Journal of Agricultural Science in Finland.* 62: 435-443.
- Naumann, C. und R. Bassler (1997). Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. In: *Methodenbuch, Band III, 3. Ausgabe, 4. Ergänzungslieferung, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.*
- Nelson, T. S.; T. R. Shieh, R. J. Wodzinski und J. H. Ware (1968). The availability of phytate phosphorus in soya bean meal before and after treatment with mold phytase. *Poult. Sci.* 47: 1842-1848.

- Nelson, T. S.; T. R. Shieh, R. J. Wodzinski und J. H. Ware (1971). Effect of supplemental phytase on the utilization of phytate phosphorus by chicks. *J. Nutr.* 101: 1289-1294.
- Noblet, J. und G. Le Goff (2001). Effect of dietary fibre on the energy value of feeds for pigs. *Anim. Feed Sci. Techn.* 90: 35-52.
- Nyman, M.; N.-G. Asp, J. Cummings und H. Wiggins (1986). Fermentation of dietary fibre in the intestinal tract: comparison between man and rat. *Br. J. Nutr.* 55: 487-496.
- Olano-Martin, E.; G. R. Gibson und R. A. Rastall (2002). Comparison of the in vitro bifidogenic properties of pectins and pectic-oligosaccharides. *J. Appl. Microbiol.* 93: 505-511.
- O'Quinn, P. R.; D. A. Knabe und E. J. Gregg (1997). Efficacy of Natuphos[®] in sorghum-based diets of finishing swine. *J. Anim. Sci.* 75: 1299-1307.
- Owusu-Asiedu, A.; J. F. Patience, B. Laarveld, A. G. Van Kessel, P. H. Simmins und R. T. Zijlstra (2006). Effects of guar gum and cellulose on digesta passage rate, ileal microbial populations, energy and protein digestibility, and performance of grower pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 843-852.
- Paditz, K. (2003). Vergleichende Untersuchungen zur Effizienz von mikrobiellen Phytasen auf Basis des verdaulichen Phosphors beim Schwein. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Paditz, K.; H. Kluth und M. Rodehutschord (2004). Relationship between graded doses of three microbial phytases and digestible phosphorus in pigs. *J. Anim. Sci.* 78: 429-438.
- Pagano, A. R.; K. R. Roneker und X. G. Lei (2007). Distribution of supplemental *Escherichia coli* AppA2 phytase activity in digesta of various gastrointestinal segments of young pigs. *J. Anim. Sci.* 85: 1444-1452.
- Palacios, M. C.; M. Haros, C. M. Rosell und Y. Sanz (2005). Characterization of an acid phosphatase from *Lactobacillus pentosus*: regulation and biochemical properties. *J. Appl. Microbiol.* 98: 229-237.
- Pallauf, J.; D. Höhler, G. Rimbach und H. Neusser (1992). Einfluß einer Zulage an mikrobieller Phytase zu einer Mais-Soja-Diät auf die scheinbare Absorption von Phosphor und Calcium beim Ferkel. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 67: 30-40.
- Partridge, I. G. (1978a). Studies on digestion and absorption in the intestines of growing pigs. 3. Net movements of mineral nutrients in the digestive tract. *Br. J. Nutr.* 39: 527-537.
- Partridge, I. G. (1978b). Studies on digestion and absorption in the intestines of growing pigs. 4. Effects of dietary cellulose and sodium levels on mineral absorption. *Br. J. Nutr.* 39: 539-545.

- Partridge, I. G., H. D. Keal und K. G. Mitchell (1982). The utilization of dietary cellulose by growing pigs. *Anim. Prod.* 35: 209-214.
- Partridge, I. G.; O. Simon und H. Bergner (1986). The effects of treated straw meal on ileal and faecal digestibility of nutrients in pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 36: 351-359.
- Peter, C. M. und D. H. Baker (2002). Bioavailability of phosphorus in corn gluten feed derived from conventional and low-phytate maize. *Anim. Feed Sci. Techn.* 95: 63-71.
- Petri, A.; H. Müschen, G. Breves, O. Richter und E. Pfeffer (1988). Response of lactating goats to low phosphorus intake. 2. Nitrogen transfer from rumen ammonia to rumen microbes and proportion of milk protein derived from microbial amino acids. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)* 111: 265-271.
- Pointillart, A.; N. Fontaine und M. Thomasset (1984). Phytate phosphorus utilization and intestinal phosphatases in pigs fed low phosphorus: wheat or corn diets. *Nutrition Reports International* 29: 473-483.
- Pointillart, A.; N. Fontaine, M. Thomasset und M. E. Jay (1985). Phosphorus utilization, intestinal phosphatases and hormonal control of calcium metabolism in pigs fed phytic phosphorus: soyabean or rapeseed diets. *Nutr. Rep. Int.* 32: 155-167.
- Pointillart, A.; A. Fourdin und N. Fontaine (1987). Importance of cereal phytase activity for phytate phosphorus utilization by growing pigs fed diets containing triticale or corn. *J. Nutr.* 117: 907-913.
- Potkins, Z. V.; T. L. J. Lawrence und J. R. Thomlinson (1991). Effects of structural and non-structural polysaccharides in the diet of the growing pig on gastric emptying rate and rate of passage of digesta to the terminal ileum and through the total intestinal tract. *Br. J. Nutr.* 65: 391-413.
- Powar, V. K. und V. Jagannathan (1982). Purification and properties of phytate-specific phosphatase from *Bacillus subtilis*. *Journal of Bacteriology* 151: 1102-1108.
- Prins, R. A. (1977). In: Clarke, R. T. J. und T. Bauchop (Hrsg.). *Microbial Ecology of the Gut*. S. 73-183. Academic Press, London.
- Quian, H.; E. T. Kornegay und D. M. Denbow (1997). Utilization of phytate phosphorus and calcium as influenced by microbial phytase, cholecalciferol, and the calcium:total phosphorus ratio in broiler diets. *Poult. Sci.* 76: 37-46.
- Rainbird, A. L. und A. G. Low (1986). Effect of various types of dietary fibre on gastric emptying in growing pigs. *Br. J. Nutr.* 55: 111-121
- Rapp, C. (1998). Untersuchungen an fistulierten Schweinen zum Phytatabbau im Chymus verschiedener Bereiche des Magen-Darmtraktes durch native und supplementierte mikrobielle Phytasen. Dissertation. Universität Hohenheim.
- Rauen, H. M. (1964). *Biochemisches Taschenbuch*. 2. Teil. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg/New York.

- Ravindran, V.; S. Cabahug, G. Ravindran, P. H. Selle und W. L. Bryden (2000). Response of broiler chickens to microbial phytase supplementation as influenced by dietary phytic acid and non-phytate phosphorus levels. II. Effects on apparent metabolisable energy, nutrient digestibility and nutrient retention. *Br. Poult. Sci.* 41: 193-200.
- Ravindran, V.; E. T. Kornegay und K. E. Webb Jr. (1984). Effects of fiber and virginiamycin on nutrient absorption, nutrient retention and rate of passage in growing swine. *J. Anim. Sci.* 59: 400-408.
- Ravindran, V.; P. H. Selle, G. Ravindran, P. C. H. Morel, A. K. Kies und W. L. Bryden (2001). Microbial phytase improves performance, apparent metabolizable energy, and ileal amino acid digestibility of broilers fed a lysine-deficient diet. *Poult. Sci.* 80: 338-344.
- Reale, A.; U. Konietzny, R. Coppola, E. Sorrentino und R. Greiner (2007). The importance of lactic acid bacteria for phytate degradation during cereal dough fermentation. *J. Agric. Food Chem.* 55: 2993-2997.
- Reddy, N. R.; S. K. Sathe und D. K. Salunkhe (1982). Phytate in legumes and cereals. *Adv. Food Res.* 28: 1-92.
- Reid, R. L.; M. C. Franklin und E. G. Hallsworth (1947). The utilization of phytate phosphorus by sheep. *Australian Veterinary Journal* 23: 136-140.
- Rérat, A. (1978). Digestion and absorption of carbohydrates and nitrogenous matters in the hindgut of the omnivorous nonruminant animal. *J. Anim. Sci.* 46: 1808-1837.
- Rickard, S. E. und L. U. Thompson (1997). Interactions and biological effects of phytic acid. In: Shahidi, F. (Hrsg.). *Antinutrients and phytochemicals in food*. American Chemical Society Symposium Series 662: 294-312. ACS Washington DC.
- Rodehutschord, M.; H.-J. Abel, W. Friedt, C. Wenk, G. Flachowsky, H.-J. Ahlgrimm, B. Johnke, R. Kuhl und G. Breves (2002). Consequences of the ban of by-products from terrestrial animals in livestock feeding in Germany and the European Union: Alternatives, nutrient and energy cycles, plant production, and economic aspects. *Arch. Anim. Nutr.* 56: 67-91.
- Rodehutschord, M. und A. Dieckmann (2005). Comparative studies with three-week-old chickens, turkeys, ducks and quails on the response in phosphorus utilization to a supplementation of monobasic calcium phosphate. *Poult. Sci.* 84: 1252-1260.
- Rodehutschord, M.; M. Faust, M. Dünghoef, H. Spiekers und E. Pfeffer (1994). Zur Messung der Verdaulichkeit des Phosphors aus mineralischen Phosphor-Trägern sowie aus Mineralfuttern, Eiweißkonzentraten und Alleinfuttern für Schweine. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 71: 169-178.
- Rodehutschord, M.; R. Haverkamp und E. Pfeffer (1998). Inevitable losses of phosphorus in pigs, estimated from balance data using diets deficient in phosphorus. *Arch. Anim. Nutr.* 51: 27-38.

- Roth, F. X. und M. Kirchgessner (1984). Verdaulichkeit der Energie und Rohnährstoffe beim Schwein in Abhängigkeit von Fütterungsniveau und Lebendgewicht. *Z. Tierphysiol. Tierernähr. Futtermittelkd.* 51: 79-87.
- Roth, F. X. und M. Kirchgessner (1985). Verdaulichkeit und intestinale Passage beim Schwein in Abhängigkeit vom Fütterungsniveau und Rohfasergehalt des Futters. *Z. Tierphysiol., Tierernähr. Futtermittelkd.* 53: 254-264.
- Roth-Maier, D. A.; A. Machmüller, M. Kreuzer und M. Kirchgessner (1993). Effects of pectin supplementation on the digestion of different structural carbohydrate fractions and on bacterial nitrogen turnover in the hindgut of adult sows. *Anim. Feed Sci. Techn.* 42: 177-191.
- Rowan, A. M.; P. J. Moughan und M. N. Wilson (1992). The flows of deoxyribonucleic acid and diaminopimelic acid and the digestibility of dietary fibre components at the terminal ileum, as indicators of microbial activity in the upper digestive tract of ileostomised pigs. *Anim. Feed Sci Techn.* 36: 129-141.
- Sandberg, A.-S. und R. Ahderinne (1986). HPLC method for determination of inositol tri-, tetra-, penta-, and hexaphosphates in foods and intestinal contents. *J. Food Sci.* 51: 547-550.
- Sandberg, A.-S.; R. Ahderinne, H. Andersson, B. Hallgren und L. Hultén (1983). The effect of citrus pectin on the absorption of nutrients in the small intestine. *Human Nutrition: Clinical Nutrition* 37C: 171-183.
- Sandberg, A.-S. und H. Andersson (1988). Effect of dietary phytase on the digestion of phytate in the stomach and small intestine of humans. *J. Nutr.* 118: 469-473.
- Sandberg, A.-S.; T. Larsen und B Sandström (1993). High dietary calcium level decreases colonic phytate degradation in pigs fed a rapeseed diet. *J. Nutr.* 123: 559-566.
- Sands, J. S.; D. Ragland, C. Baxter, B. C. Joern, T. E. Sauber und O. Adeola (2001). Phosphorus bioavailability, growth performance, and nutrient balance in pigs fed high available phosphorus corn and phytase. *J. Anim. Sci.* 79: 2134-2142.
- Sauer, W. C.; R. Mosenthin, F. Ahrens und L. A. den Hartog (1991). The effect of source of fiber on ileal and fecal amino acid digestibility and bacterial nitrogen excretion in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 69: 4070-4077.
- Savage, D. C. (1977). Microbial ecology of the gastrointestinal tract. *Ann. Rev. Microbiol.* 43: 1451-1463.
- Scheuermann, S. E.; H.-J. Lantzsich und K. H. Menke (1988a). In vitro und in vivo Untersuchungen zur Hydrolyse von Phytat. I. Löslichkeit von Phytat. *J. Anim. Feed Sci. Anim. Nutr.* 60: 55-63.
- Scheuermann, S. E.; H.-J. Lantzsich und K. H. Menke (1988c). In vitro und in vivo Untersuchungen zur Hydrolyse von Phytat. II. Aktivität pflanzlicher Phytase. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 60: 64-75.

- Scheuermann, S. E.; H.-J. Lantzsch und K. H. Menke (1988b). In vitro und in vivo Untersuchungen zur Hydrolyse von Phytat. III. Gastrointestinale Hydrolyse von Phytat aus Weizen und Mais bei wachsenden Ratten. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 60: 76-85.
- Schlemmer, U.; K.-D. Jany, A. Berk, E. Schulz und G. Rechkemmer (2001). Degradation of phytate in the gut of pigs – pathway of gastro-intestinal inositol phosphate hydrolysis and enzymes involved. *Arch. Anim. Nutr.* 55: 255-280.
- Schröder, B.; G. Breves und M. Rodehutschord (1996). Mechanisms of intestinal phosphorus absorption and availability of dietary phosphorus in pigs. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift* 103: 197-236.
- Schwartz, S. E.; R. A. Levine, A. Singh, J. R. Scheidecker und N. S. Track (1982). Sustained pectin ingestion delays gastric emptying. *Gastroenterology* 83: 812-817.
- Schulz, E. und H. J. Oslage (1972). Untersuchungen zur intestinalen Hydrolyse von Inositolphosphorsäureester und zur Absorption von Phytinphosphor beim Schwein. 2. Mitteilung: Untersuchungen zur Hydrolyse der Inositolphosphorsäureester im Verdauungstrakt des Schweines. *Z. Tierphysiol. Tierernährg. Futtermittelkde.* 39: 76-91.
- Schulze, H.; P. van Leeuwen, M. W. A. Versteegen und J. W. O. van den Berg (1995). Dietary level and source of neutral detergent fiber and ileal endogenous nitrogen flow in pigs. *J. Anim. Sci.* 73: 441-448.
- Selle, P. H.; V. Ravindran, R. A. Caldwell und W. L. Bryden (2000). Phytate and phytase: consequences for protein utilisation. *Nutr. Res. Rev.* 13:255-278.
- Seynaeve, M.; G. Janssens, M. Hesta, C. van Nevel und R. O. de Wilde (2000a). Effects of dietary Ca/P ratio, P level and microbial phytase supplementation on nutrient digestibilities in growing pigs: precaecal, post-ileal and total tract disappearances of OM, P and Ca. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 83: 36-48.
- Seynaeve, M.; G. Janssens, M. Hesta, C. van Nevel und R. O. de Wilde (2000b). Effects of dietary Ca/P ratio, P level and microbial phytase supplementation on nutrient digestibilities in growing pigs: breakdown of phytic acid, partition of P and phytase activity along the intestinal tract. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 83: 193-204.
- Shen, Y.; M. Z. Fan, A. Ajakaiye und T. Archbold (2002). Use of the regression analysis technique to determine the true phosphorus digestibility and the endogenous phosphorus output associated with corn in growing pigs. *J. Nutr.* 132: 1199-1206.
- Shieh, T. R.; R. J. Wodzinski und J. H. Ware (1969). Regulation of the formation of acid phosphatases by inorganic phosphate in *Aspergillus ficuum*. *J. Bacteriol.* 100: 1161-1165.

- Short, F. J.; P. Gorton, J. Wiseman und K. N. Boorman (1996). Determination of titanium dioxide added as an inert marker in chicken digestibility studies. *Anim. Feed Sci. Techn.* 59: 215-221.
- Smith, A. H.; M. Kleiber, A. L. Black und J. R. Luick (1955). Transfer of phosphate in the digestive tract. I. Swine. *J. Nutr.* 57: 497-506.
- Spiller, G. A.; M. C. Chernoff, R. A. Hill, J. E. Gates, J. J. Nassar und E. A. Shipley (1980). Effect of purified cellulose, pectin, and a low-residue diet on fecal volatile fatty acids, transit time, and fecal weights in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 33: 754-759.
- Sreeramulu, G.; D. S. Srinivasa, K. Nand und R. Joseph (1996). *Lactobacillus amylovorus* as a phytate producer in submerged culture. *Letters in Applied Microbiology* 23: 385-388.
- Steer, T. E. und G. R. Gibson (2002). The microbiology of phytic acid metabolism by gut bacteria and relevance for bowel cancer. *J. Food Sci. Techn.* 37: 783-790.
- Stephen, A. M. und J. H. Cummings (1979). Water-holding by dietary fibre in vitro and its relationship to faecal output in man. *Gut* 20: 722-729.
- Stück, K.; K. Faul, S. Hylla, J. Stein und G. Breves (1995). The application of a semi-continuous solon simulation technique (Cositec) for studying the effects of clindamycin on microbial hindgut metabolism. *Zeitschrift für Gastroenterologie* 33: 241-246.
- Sunvold, G. D.; H. S. Hussein, G. C. Fahey, Jr.; N. R. Merchen und G. A. Reinhart (1995). In vitro fermentation of cellulose, beet pulp, citrus pulp, and citrus pectin using fecal inoculum from cats, dogs, horses, humans, and pigs and ruminal fluid from cattle. *J. Anim. Sci.* 73: 3639-3648.
- Tao, S. H.; M. R. S. Fox, B. Q. Phillippy, B. E. Fry, M. L. Johnson und M. R. Johnson (1986). Effects of inositol phosphates on mineral utilization. *Federation of American Societies for Experimental Biology. Federation Proceedings* 45: 819-826.
- Taverner, M. R.; I. D. Hume und D. J. Farrell (1981). Availability to pigs of amino acids in cereal grains. (1) Endogenous levels of amino acids in ileal digesta and faeces of pigs given cereal diets. *B. J. Nutr.* 46: 149-158.
- Tetens, I.; G. Livesey und B. O. Eggum (1996). Effects of the type and level of dietary fibre supplements on nitrogen retention and excretion patterns. *Br. J. Nutr.* 75: 461-469.
- Titgemeyer, E. C. (1997). Design and interpretation of nutrient digestion studies. *J. Anim. Sci.* 75: 2235-2247.
- Van der Meulen, J.; J. G. M. Bakker, B. Smits und H. de Visser (1997). Effect of source of starch on net portal flux of glucose, lactate, volatile fatty acids and amino acids in the pig. *Br. J. Nutr.* 78: 533-544.

- Van der Meulen, J. und A. J. M. Jansman (1997). Nitrogen metabolism in gastrointestinal tissue of the pig. *Proc. Nutr. Soc.* 56: 535-545.
- Vanhoof, K. und R. De Schrijver (1996). Availability of minerals in rats and pigs fed non-purified diets containing inulin. *Nutr. Res.* 16: 1017-1022.
- Van Nevel, C. J. und D. I. Demeyer (1977). Determination of rumen microbial growth in vitro from ³²P-labelled phosphate incorporation. *Br. J. Nutr.* 38: 101-114.
- Varel, V. H. (1987). Activity of fiber-degrading microorganisms in the pig large intestine. *J. Anim. Sci.* 65: 488-496.
- Varel, V. H., S. J. Fryda und I. M. Robinson (1984). Cellulolytic bacteria from pig large intestine. *Appl. Environ. Microbiol.* 47: 219-221.
- Varel, V. H. und W. G. Pond (1985). Enumeration and activity of cellulolytic bacteria from gestating swine fed various levels of dietary fiber. *Appl. Environ. Microbiol.* 58: 858-862.
- Varel, V. H. und J. T. Yen (1997). Microbial perspective on fiber utilization by swine. *J. Anim. Sci.* 75: 2715-2722.
- Vats, P.; M. S. Bhattacharyya und U. C. Banerjee (2005). Use of phytases (*myo*-inositolhexakisphosphate phosphohydrolases) for combatting environmental pollution: A biological approach. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 35: 3-14.
- Vemmer, H. (1982). Der Einfluß der Phosphorversorgung auf die intestinale Absorption von Phosphor beim Schwein. *Z. Tierphysiol. Tierernährg. Futtermittelkde.* 47: 220-230.
- Vemmer, H. und H. J. Oslage (1973). Untersuchungen zur intestinalen Hydrolyse von Inosit-Phosphorsäureester und zur Absorption von Phytinphosphor beim Schwein. 3.Mitteilung: Untersuchungen zur intestinalen Absorption von Gesamtphosphor und Phytinphosphor beim wachsenden Schwein bei geringer Phosphor- und Calciumversorgung. *Z. Tierphysiol., Tierernährg. u. Futtermittelkde.* 31:129-136.
- Vissia, G. H. P. und A. C. Beynen (1999). Influence of dietary carboxymethylcellulose on the apparent absorption of calcium, magnesium and phosphorus in rats. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 82: 137-141.
- Viveros, A.; C. Centeno, A. Brenes, R. Canales und A. Lozano (2000). Phytase and acid phosphatase activities in plant feedstuffs. *J. Agric. Food Chem.* 48: 4009-4013.
- von Engelhardt, W.; K. Rönna, G. Rechkemmer und T. Sakata (1989). Absorption of short-chain fatty acids and their role in the hindgut of monogastric animals. *Anim. Feed Sci. Techn.* 23: 43-53.
- Wang, J. F.; B. B. Jensen, H. Jørgensen, D. F. Li und J. E. Lindberg (2002). Ileal and total tract digestibility, and protein and fat balance in pigs fed rice with addition of

- potato starch, sugar beet pulp or wheat bran. *Anim. Feed Sci. Techn.* 102: 125-136.
- Wenk, C. (2001). The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig. *Anim. Feed Sci. Techn.* 90: 21-33.
- Wider, J. (2005). Untersuchungen *in vitro* zum Phosphor-Bedarf von Mikroorganismen im Pansen. Dissertation. Universität Bonn.
- Wilfart, A.; L. Montagne, P. H. Simmins, J. van Milgen und J. Noblet (2007a). Sites of nutrient digestion in growing pigs: Effect of dietary fiber. *J. Anim. Sci.* 85: 976-983.
- Wilfart, A.; L. Montagne, P. H. Simmins, J. Noblet und J. van Milgen (2007b). Digesta transit in different segments of the gastrointestinal tract as affected by insoluble fibre supplied by wheat bran. *Br. J. Nutr.* 98: 54-62.
- Wise, A. und D. J. Gilbert (1982). Phytate hydrolysis by germfree and conventional rats. *Applied and Environmental Microbiology* 43: 753-756.
- Wood, H. G. und J. E. Clark (1988). Biological aspects of inorganic polyphosphates. *Ann. Rev. Biochem.* 57: 235-260.
- Yang, W.-J.; Y. Matsuda, S. Sano, H. Masutani und H. Nakagawa (1991). Purification and characterization of phytase from rat intestinal mucosa. *Biochimica et Biophysica Acta* 1075: 75-82.
- Yanke, L. Y.; H. D. Bae, L. B. Selinger und K.-J. Cheng (1998). Phytase activity of anaerobic ruminal bacteria. *Microbiology* 144: 1565-1573.
- Yen, J. T.; V. H. Varel und J. A. Nienaber (2004). Metabolic and microbial responses in western crossbred and Meishan growing pigs fed a high-fiber diet. *J. Anim. Sci.* 82: 1740-1755.
- Yi, Z. und E. T. Kornegay (1996). Sites of phytase activity in the gastrointestinal tract of young pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 61: 361-368.
- Yi, Z.; E. T. Kornegay, V. Ravindran, M. D. Lindemann und J. H. Wilson (1996). Effectiveness of Natuphos[®] phytase in improving the bioavailabilities of phosphorus and other nutrients in soybean meal-based semipurified diets for young pigs. *J. Anim. Sci.* 74: 1601-1611.
- Yoon, S. E.; Y. J. Choi, H. K. Min, K. K. Cho, J. W. Kim, S. C. Lee und Y. H. Jung (1996). Isolation and identification of phytase-producing bacterium, *Enterobacter* sp. 4, and enzymatic properties of phytase enzyme. *Enzyme and Microbial Technology* 18: 449-454.
- Yoon, S. E.; L. U. Thompson und D. J. A. Jenkins (1983). The effect of phytic acid on *in vitro* rate of starch digestibility and blood glucose response. *Am. J. Clin. Nutr.* 38: 835-842.

- Young, L. G.; M. Leunissen und J. L. Atkinson (1993). Addition of microbial phytase to diets of young pigs. *J. Anim. Sci.* 71: 2147-2150.
- Zamudio, M.; A. Gonzáles und J. A. Medina (2001). *Lactobacillus plantarum* phytase activity is due to non-specific acid phosphatase. *Lett. Appl. Microbiol.* 32: 181-184.
- Zebrowska, T. und A. G. Low (1987). The influence of diets based on whole wheat, wheat flour and wheat bran on exocrine pancreatic secretion in pigs. *J. Nutr.* 117: 1212-1216.
- Zebrowska, T., A. G. Low und H. Zebrowska (1983). Studies on gastric digestion of protein and carbohydrate, gastric secretion and exocrine pancreatic in the growing pig. *Br. J. Nutr.* 49: 401-410.
- Zervas, S. und R. T. Zijlstra (2002). Effects of dietary protein and fermentable fiber on nitrogen excretion patterns and plasma urea in grower pigs. *J. Anim. Sci.* 80: 3247-32
- Zimmermann, B.; H.-J. Lantzsich, R. Mosenthin, F.-J. Schöner, H. K. Biesalski, und W. Drochner (2002). Comparative evaluation of the efficacy of cereal and microbial phytases in growing pigs fed diets with marginal phosphorus supply. *J. Sci. Food Agric.* 82: 1298-1304

Tabellenanhang

Tabelle A-1. Zusammensetzung des Prämix in den Versuchen I – III

Mengenelemente		Spurenelemente		Vitamine	
150	g Calcium ¹⁾	10.000	mg Zink	400.000	I.E. Vitamin A
100	g Natrium	10.000	mg Eisen	50.000	I.E. Vitamin D ₃
50	g Magnesium	2.000	mg Mangan	1.500	I.E. Vitamin E
		600	mg Kupfer	15	mg Vitamin K ₃
		7,5	mg Kobalt	170	mg Vitamin B ₁
		20	mg Iod	250	mg Vitamin B ₂
		30	mg Selen	300	mg Vitamin B ₆
				1,8	mg Vitamin B ₁₂
				1.000	mg Pantothensäure
				1.500	mg Nicotinsäure
				25	mg Folsäure
				2,0	mg Biotin
				50.000	mg Cholinchlorid

¹⁾175 g in Versuch Ia

Tabelle A-2. Lebendmassen der Tiere [kg] in allen Versuchen

Tier-Nr.	Versuch Ia		Versuch Ib ¹⁾					Versuch II		Versuch III	
	Anfang	Ende	Anfang	Anfang	Ende	Anfang	Ende	Anfang	Ende	Anfang	Ende
		3. DG		1.DG		2.DG		2.DG		2.DG	
1	36,2	58,8	31,2	39,0	43,6	49,0	54,0	31,4	57,2	28,4	53,9
2	35,8	63,1	28,2	34,2	37,4	41,6	47,0	30,9	50,4	31,6	52,2
3	36,6	66,2	28,3	36,0	40,4	45,4	51,0	29,5	51,2	29,5	51,1
4	36,5	56,9	30,3	37,2	41,4	44,2	48,0	30,6	51,9	27,5	51,3
5	36,7	- ²⁾	27,2	35,8	40,0	44,0	49,5	30,2	55,4	28,9	56,5
6	34,1	- ²⁾	30,0	35,8	39,2	44,0	46,5	31,3	52,0	29,6	51,0
7	36,1	68,8	32,5	38,4	43,0	- ²⁾	-	32,0	56,2	28,8	52,6
8	35,1	63,5	28,2	34,2	37,2	39,0	44,0	29,9	49,8	31,7	53,7
9			32,5	38,2	42,5	47,2	52,0				
10			25,5	31,4	34,8	39,0	44,6				
11			29,5	36,4	40,4	45,2	50,2				
12			31,7	39,2	42,4	44,2	49,5				

¹⁾LM-Erfassung zu Versuchsbeginn und weiterhin jeweils beim Ein- und Ausstellen in bzw. aus den Bilanzkäfigen

²⁾während Versuch euthanasiert

Tabelle A-3. Konzentrationen an T, XA, N, P, Ca und TiO₂ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	T		XA		N		P		Ca		TiO ₂	
			Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot
BD	1	1	12,1	37,3	138	220	35,5	32,6	8,73	20,1	19,0	36,2	4,46	11,0
	2	1	9,99	39,2	139	216	28,0	32,2	8,60	20,0	12,9	32,9	4,32	10,1
	3	2	11,9	35,9	133	232	37,4	33,1	8,60	18,3	12,5	30,3	12,2	27,7
	4	2	13,7	38,3	120	214	36,2	39,8	8,26	16,2	12,5	31,3	12,5	24,8
	7	3	8,38	35,0	157	218	27,2	34,7	7,22	16,1	13,7	25,5	11,6	25,9
BDc	3	1	11,5	31,3	86,8	61,3	19,7	13,6	3,05	4,20	5,80	7,31	1,53	1,91
	4	1	15,2	32,8	82,0	61,3	19,7	15,5	3,47	4,22	5,82	8,23	1,52	1,88
	5E	2	- ¹⁾	31,0	-	63,9	-	12,3	-	3,33	-	6,30	-	5,57
	6	2	13,4	26,5	93,4	65,4	16,8	13,4	3,04	3,69	4,22	5,13	4,54	5,31
	1	3	6,81	31,2	139	61,8	17,8	14,4	3,86	4,04	5,73	6,12	6,12	6,13
	2	3	13,9	26,2	112	61,1	17,9	13,0	4,42	3,73	7,38	5,21	7,05	5,61
BDs	5	1	9,81	45,8	138	254	28,2	30,1	8,87	23,1	13,1	48,7	3,71	10,1
	6	1	9,51	39,5	132	291	30,1	31,8	9,00	21,0	12,4	34,6	4,09	9,61
	7	2	9,29	40,5	146	227	32,0	30,9	8,12	17,7	11,2	29,1	10,7	28,8
	3	3	10,6	38,6	150	229	31,7	27,8	10,3	17,0	13,8	27,4	13,5	24,9
BDp	7	1	9,76	29,5	143	201	15,5	47,2	4,00	16,4	8,64	46,0	1,80	6,39
	8	1	n. b.	27,4	n. b.	182	n. b.	48,0	n. b.	13,6	n. b.	35,6	n. b.	6,07
	1	2	11,3	31,0	131	210	24,5	40,0	4,63	17,0	10,4	42,3	5,90	19,6
	2	2	8,70	33,2	132	211	24,8	41,1	4,44	17,7	10,1	41,9	5,11	21,6
	4	3	12,0	33,4	121	171	35,8	46,6	4,35	13,1	8,86	29,2	4,67	14,7
	5E	3	-	35,3	-	184	-	37,6	-	15,8	-	35,3	-	18,7
	6	3	14,9	n.b. ²⁾	127	177	28,5	40,8	3,12	12,5	11,9	31,9	4,55	17,2

¹⁾Tier 5E = unfistuliertes Ersatztier

²⁾n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A-4. Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Trockensubstanz in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss		Verdaulichkeit		
				ileal	faecal	pc	pi	tt
				g/d		%		
BD	1	1	903	224	90,8	75,2	59,5	89,9
	2	1	903	232	99,1	74,4	57,2	89,0
	3	2	1089	294	130	73,0	55,8	88,1
	4	2	1089	289	145	73,5	49,7	86,7
	7	3	1270	363	162	71,5	55,3	87,2
BDc	3	1	909	490	393	46,1	19,9	56,8
	4	1	909	493	399	45,7	19,2	56,1
	5E	2	1095	-	485	-	-	55,7
	6	2	1050 ¹⁾	571	488	45,7	14,5	53,6
	1	3	1183 ¹⁾	477	476	59,7	0,16	59,8
	2	3	1277	447	562	65,0	-25,7	56,0
BDs	5	1	903	202	74,0	77,6	63,4	91,8
	6	1	903	183	78,0	79,7	57,4	91,4
	7	2	1087	253	93,8	76,7	63,0	91,4
	3	3	1268	234	126	81,5	46,1	90,0
BDp	7	1	908	417	117	54,1	71,8	87,1
	8	1	908	n.b.	124	n.b.	n.b.	86,4
	1	2	1093	458	138	58,1	69,8	87,4
	2	2	1093	528	125	51,7	76,4	88,6
	4	3	872 ¹⁾	461	147	47,1	68,2	83,2
	5E	3	1275	-	169	-	-	86,8
	6	3	1275	692	183	45,7	73,6	85,6

¹⁾Futterreste

Tabelle A-5. Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Organischen Substanz in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss		Verdaulichkeit		
				ileal	faecal	pc	pi	tt
				g/d		%		
BD	1	1	903	224	90,8	75,2	59,5	89,9
	2	1	903	232	99,1	74,4	57,2	89,0
	3	2	1089	294	130	73,0	55,8	88,1
	4	2	1089	289	145	73,5	49,7	86,7
	7	3	1270	363	162	71,5	55,3	87,2
BDc	3	1	909	490	393	46,1	19,9	56,8
	4	1	909	493	399	45,7	19,2	56,1
	5E	2	1095	-	485	-	-	55,7
	6	2	1050 ¹⁾	571	488	45,7	14,5	53,6
	1	3	1183 ¹⁾	477	476	59,7	0,16	59,8
	2	3	1277	447	562	65,0	-25,7	56,0
BDs	5	1	903	202	74,0	77,6	63,4	91,8
	6	1	903	183	78,0	79,7	57,4	91,4
	7	2	1087	253	93,8	76,7	63,0	91,4
	3	3	1268	234	126	81,5	46,1	90,0
BDp	7	1	908	417	117	54,1	71,8	87,1
	8	1	908	n.b.	124	n.b.	n.b.	86,4
	1	2	1093	458	138	58,1	69,8	87,4
	2	2	1093	528	125	51,7	76,4	88,6
	4	3	872 ¹⁾	461	147	47,1	68,2	83,2
	5E	3	1275	-	169	-	-	86,8
	6	3	1275	692	183	45,7	73,6	85,6

¹⁾Futterreste

Tabelle A-6. Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Phosphor in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion			Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal	faecal	renal		pc	pi	tt	
				g/d		mg/d		g/d	%		
BD	1	1	2,62	1,96	1,82	15,5	0,78	25,3	6,96	30,5	29,9
	2	1	2,62	1,99	1,98	10,4	0,63	24,0	0,38	24,3	23,9
	3	2	3,21	2,53	2,38	25,5	0,80	21,2	5,86	25,8	25,0
	4	2	3,21	2,38	2,34	27,2	0,84	25,8	1,69	27,1	26,2
	7	3	3,75	2,62	2,61	24,9	1,12	30,1	0,16	30,2	29,6
BDc	3	1	1,99	1,50	1,66	34,7	0,30	24,5	-10,3	16,7	15,0
	4	1	1,99	1,72	1,69	24,7	0,28	13,5	1,67	15,0	13,8
	5E	2	2,44	-	1,62	20,7	0,80	-	-	33,5	32,7
	6	2	2,34 ¹⁾	1,74	1,81	63,5	0,47	25,5	-3,78	22,7	20,0
	1	3	2,64 ¹⁾	1,85	1,93	110	0,60	29,9	-4,49	26,7	22,6
	2	3	2,85	1,99	2,11	83,5	0,66	30,3	-6,05	26,1	23,1
BDs	5	1	2,01	1,79	1,71	13,2	0,29	10,9	4,59	15,0	14,3
	6	1	2,01	1,65	1,64	15,5	0,35	18,0	0,65	18,5	17,7
	7	2	2,46	2,05	1,66	20,6	0,78	16,6	19,3	32,7	31,8
	3	3	2,87	2,40	2,14	29,4	0,70	16,6	10,8	25,6	24,6
BDp	7	1	2,15	1,67	1,94	8,07	0,20	22,2	-15,6	10,1	9,75
	8	1	2,15	n. b.	1,69	16,7	0,44	n. b.	n. b.	21,4	20,5
	1	2	2,63	2,13	2,35	15,1	0,26	19,3	-10,5	10,8	10,2
	2	2	2,63	2,35	2,22	13,5	0,40	10,6	5,63	15,6	15,1
	4	3	2,10 ¹⁾	2,01	1,93	36,5	0,13	4,16	4,33	8,31	6,57
	5E	3	3,07	-	2,68	13,8	0,38	-	-	12,7	12,3
	6	3	3,07	2,17	2,30	n. b.	n. b.	29,5	-6,01	25,2	n. b.

¹⁾Futterreste

Tabelle A-7. Konzentrationen an IP₆₋₃ im Chymus; Aufnahme, ilealer Fluss und pc Abbau von Phytat (IP₆) in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	g/kg T				Phytat (IP ₆)		
			IP ₆	IP ₅	IP ₄	IP ₃	Aufnahme	ilealer Fluss	pc Abbau
							g/d		%
BD	1	1	1,02	1,34	3,28	0,93	5,13	0,40	92,2
	2	1	14,5	2,16	1,50	0,23	5,13	5,13	0
	3	2	0,51	0,76	0,93	0,45	6,16	0,15	97,5
	4	2	4,04	1,49	1,02	0,12	6,16	1,23	80,1
	7	3	12,7	2,65	0,99	n. d. ²⁾	7,18	4,94	31,3
BDc	3	1	8,16	2,59	0,57	n. d.	3,87	3,87	0
	4	1	n. b. ¹⁾	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	6	2	1,18	0,47	0,13	0,41	4,45	0,72	83,9
	1	3	0,90	0,78	0,95	0,14	5,01	0,47	90,7
	2	3	3,68	1,38	0,52	0,38	5,41	1,81	66,6
BDs	5	1	20,9	3,18	1,00	0,29	3,85	3,85	0
	6	1	19,8	3,27	1,08	0,24	3,85	3,85	0
	7	2	13,3	1,96	0,40	n. d.	4,61	3,49	24,3
	3	3	11,8	2,62	0,56	n. d.	5,37	2,89	46,2
BDp	7	1	5,11	0,92	0,74	0,15	3,87	2,30	40,4
	1	2	1,34	0,34	n. d.	n. d.	4,63	0,62	86,6
	2	2	1,07	0,23	n. d.	n. d.	4,63	0,59	87,3
	4	3	4,83	2,23	0,73	0,12	3,70	2,24	39,5
	6	3	2,61	0,81	0,96	0,17	5,40	1,81	66,5

¹⁾n. b. = nicht bestimmt, da zu wenig Probenmaterial

²⁾n. d. = nicht detektierbar bzw. nur in Spuren vorhanden

Tabelle A-8. Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Calcium in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss	Exkretion		Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
					ileal	faecal		renal	pc	pi	
				g/d		%					
BD	1	1	8,60	4,27	3,29	2,11	3,20	50	23	62	37,2
	2	1	8,60	2,98	3,26	3,63	1,71	65	-9,5	62	19,8
	3	2	9,67	3,67	3,95	3,97	1,75	62	-7,5	59	18,1
	4	2	9,67	3,61	4,54	4,33	0,80	63	-26	53	8,21
	7	3	11,3	4,98	4,14	3,30	3,86	56	17	63	34,1
BDc	3	1	6,74	2,86	2,89	2,14	1,71	58	-1,0	57	25,4
	4	1	6,74	2,89	3,30	1,31	2,13	57	-14	51	31,5
	5E	2	7,59	-	3,07	3,21	1,31	-	-	60	17,3
	6	2	7,28 ¹⁾	2,43	2,52	2,26	2,50	67	-3,9	66	34,4
	1	3	8,20 ¹⁾	2,74	2,93	2,74	2,53	67	-6,6	64	30,9
	2	3	8,86	3,32	2,94	2,22	3,70	63	11	67	41,7
BDs	5	1	6,45	2,63	3,60	2,44	0,41	59	-37	44	6,33
	6	1	6,45	2,27	2,69	2,84	0,92	65	-19	58	14,3
	7	2	7,25	2,84	2,72	3,14	1,39	61	4,2	63	19,1
	3	3	8,47	3,22	3,46	2,60	2,41	62	-7,4	59	28,4
BDp	7	1	6,83	3,62	5,42	1,14	0,27	47	-50	21	3,89
	8	1	6,83	n. b.	4,42	1,67	0,74	n. b.	n. b.	35	10,8
	1	2	7,70	4,76	5,86	2,42	-0,58	38	-23	24	-7,46
	2	2	7,70	5,35	5,26	1,98	0,46	31	1,7	32	5,96
	4	3	6,14 ¹⁾	4,07	4,26	1,04	0,84	33	-4,6	30	13,1
	5E	3	8,98	-	5,98	1,68	1,32	-	-	34	14,7
	6	3	8,98	8,29	5,87	n. b.	n. b.	7,9	29	35	n. b.

¹⁾Futterreste

Tabelle A-9. Aufnahme, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Stickstoff in Versuch Ia

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss	Exkretion		Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal	faecal	renal	pc	pi	tt		
				g/d			%				
BD	1	1	29	7,97	3,00	12,1	13,8	72,4	62,8	89,7	47,9
	2	1	29	6,48	3,19	12,7	13,0	77,6	50,8	89,0	44,9
	3	2	35	11,0	4,31	14,0	16,9	68,7	60,9	87,8	48,1
	4	2	35	10,4	5,78	13,8	15,6	70,4	44,6	83,6	44,4
	7	3	41	9,87	5,63	25,0	10,4	76,0	42,9	86,3	25,4
BDc	3	1	22	9,71	5,38	8,94	8,08	56,7	44,6	76,0	36,1
	4	1	22	9,77	6,23	8,46	7,71	56,4	36,4	72,2	34,4
	5E	2	27	-	6,00	9,36	11,9	-	-	78,0	43,6
	6	2	26 ¹⁾	9,64	6,59	17,3	2,24	63,1	31,6	74,8	8,59
	1	3	29 ¹⁾	8,51	6,89	18,1	4,43	71,1	19,1	76,6	14,9
	2	3	32	8,05	7,31	17,2	7,26	74,7	9,11	77,0	22,8
BDs	5	1	22	5,69	2,22	8,67	10,9	73,9	60,9	89,8	50,0
	6	1	22	5,51	2,48	7,59	11,7	74,7	55,0	88,6	53,8
	7	2	27	8,09	2,89	9,64	14,0	69,5	64,3	89,1	52,7
	3	3	31	7,41	3,51	10,2	17,2	76,1	52,6	88,7	55,8
BDp	7	1	22	6,50	5,57	6,88	9,73	70,7	14,3	74,9	43,9
	8	1	22	n. b.	5,96	6,33	9,89	n. b.	n. b.	73,1	44,6
	1	2	27	11,2	5,54	8,05	13,4	58,3	50,7	79,5	49,6
	2	2	27	13,2	5,16	8,67	13,1	51,2	60,8	80,9	48,7
	4	3	22 ¹⁾	16,6	6,85	6,75	7,92	22,9	58,7	68,2	36,8
	5E	3	32	-	6,37	10,73	14,4	-	-	79,8	45,7
	6	3	32	19,8	7,50	n. b.	n. b.	37,1	62,1	76,2	n. b.

¹⁾Futterreste

Tabelle A-10. Konzentrationen an T [% der FS], XA, N, P, Ca und TiO₂ [g/kg T] im Kot der Tiere in Versuch Ib

Behandlung	Tier-Nr.	DG	T	XA	N	P	Ca	TiO ₂
BD	1	1	34,3	231	37,1	19,9	34,2	48,4
	5	1	29,8	190	46,9	18,2	23,3	40,5
	9	1	31,7	210	38,8	17,4	23,9	39,7
	4	2	37,4	240	39,1	20,0	33,7	51,9
	10	2	34,3	251	38,4	20,8	34,9	51,4
	11	2	37,5	227	41,0	17,8	31,8	47,4
BDc	2	1	28,4	102	20,1	6,59	12,4	15,8
	6	1	31,2	86,8	23,4	6,89	10,9	15,8
	10	1	25,0	97,0	25,3	7,06	13,9	15,6
	1	2	32,8	89,8	21,0	6,41	12,3	15,6
	12	2	32,6	94,9	22,1	6,53	13,2	16,6
BDs	3	1	31,4	212	39,5	19,4	27,7	43,1
	7	1	36,8	217	37,5	19,2	28,4	46,9
	11	1	31,4	210	40,5	19,8	27,6	42,7
	2	2	37,8	213	41,3	19,3	26,5	48,8
	5	2	35,6	224	38,5	20,6	27,7	51,4
	8	2	35,8	203	40,0	17,6	20,8	50,1
BDp	4	1	31,3	182	50,8	14,9	31,2	27,4
	8	1	24,3	149	49,7	11,3	22,5	22,6
	12	1	26,2	145	61,4	12,2	25,2	19,4
	3	2	31,6	196	43,6	15,8	31,2	33,4
	6	2	33,3	160	53,2	15,0	25,8	24,5
	9	2	28,0	176	46,8	15,6	24,3	31,2

Tabelle A-11. Aufnahme, gemessene faecale Exkretion, sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit der T in Versuch Ib

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion	Verdaulichkeit	
			g/d		quantitativ	Marker
					%	
BD	1	1	1083	100	90,7	88,6
	5	1	1083	133	87,8	86,3
	9	1	1083	116	89,3	86,1
	4	2	1264	106	91,6	89,3
	10	2	1264	135	89,4	89,2
	11	2	1264	134	89,4	88,3
BDc	2	1	1027 ¹⁾	265	74,2	70,3
	6	1	1088	270	75,2	70,4
	10	1	1088	296	72,8	70,0
	1	2	1269	319	74,9	69,9
	12	2	1269	304	76,1	71,8
BDs	3	1	1083	91,3	91,6	90,4
	7	1	1083	70,4	93,5	91,1
	11	1	1083	87,8	91,9	90,3
	2	2	1263	98,3	92,3	91,5
	5	2	1263	97,1	91,8	91,9
	8	2	1263	103	92,2	91,7
BDp	4	1	1089	122	88,8	84,9
	8	1	1089	131	88,0	81,7
	12	1	1089	169	84,5	78,7
	3	2	1205 ¹⁾	123	89,8	87,6
	6	2	1132 ¹⁾	112	90,1	83,2
	9	2	1270	153	87,9	86,7

¹⁾Futterreste

Tabelle A-12. Aufnahme, gemessene faecale Exkretion sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit der OS in Versuch Ib

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion	Verdaulichkeit	
			g/d		quantitativ	Marker
					%	
BD	1	1	1029	77,2	92,5	90,7
	5	1	1029	107	89,6	88,4
	9	1	1029	91,2	91,1	88,4
	4	2	1201	80,9	93,3	91,5
	10	2	1201	101	91,6	91,5
	11	2	1201	103	91,4	90,5
BDc	2	1	982 ¹⁾	238	75,8	71,8
	6	1	1043	246	76,4	71,6
	10	1	1043	267	74,4	71,6
	1	2	1217	290	76,1	71,2
	12	2	1217	275	77,4	73,2
BDs	3	1	1042	72,0	93,1	92,1
	7	1	1042	55,1	94,7	92,8
	11	1	1042	69,4	93,3	92,0
	2	2	1216	77,4	93,6	93,0
	5	2	1216	75,4	93,8	93,5
	8	2	1216	82,3	93,2	93,1
BDp	4	1	1037	99,6	90,4	87,0
	8	1	1037	112	89,2	83,6
	12	1	1037	145	86,1	80,8
	3	2	1147 ¹⁾	99,2	91,4	89,5
	6	2	1078 ¹⁾	94,0	91,3	85,1
	9	2	1210	126	89,6	88,5

¹⁾Futterreste

Tabelle A-13. Aufnahme, gemessene faecale und renale Exkretion, Retention, Bilanz sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit von Phosphor in Versuch Ib

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion		Retention	Verdaulichkeit		Bilanz
			g/d	faecal	renal	g/d	quantitativ	Marker	
				mg/d	g/d		%		
BD	1	1	3,47	2,00	21,9	1,45	42,4	28,7	41,7
	5	1	3,47	2,42	41,8	1,01	30,3	22,1	29,0
	9	1	3,47	2,01	17,6	1,44	42,1	24,1	41,5
	4	2	4,04	2,13	20,0	1,90	47,3	33,3	46,9
	10	2	4,04	2,80	15,5	1,23	30,7	29,9	30,4
	11	2	4,04	2,38	46,8	1,62	41,1	34,9	40,0
BDc	2	1	2,82 ¹⁾	1,74	17,8	1,06	38,3	28,1	37,5
	6	1	2,98	1,86	26,8	1,09	37,6	25,0	36,8
	10	1	2,98	2,09	34,2	0,85	29,9	22,1	28,7
	1	2	3,47	2,04	20,5	1,41	41,2	29,1	40,6
	12	2	3,47	1,98	24,8	1,46	42,9	32,2	42,2
BDs	3	1	2,66	1,78	23,2	0,86	33,1	23,5	32,2
	7	1	2,66	1,35	48,3	1,26	49,2	30,6	47,3
	11	1	2,66	1,73	21,5	0,90	35,0	21,7	33,9
	2	2	3,10	1,89	26,4	1,18	39,0	33,2	38,1
	5	2	3,10	2,00	14,5	1,09	35,5	32,2	35,0
	8	2	3,10	1,82	28,5	1,25	41,3	40,5	40,5
BDp	4	1	2,83	1,82	41,9	0,97	35,7	12,9	34,2
	8	1	2,83	1,48	14,2	1,34	47,7	20,2	47,3
	12	1	2,83	2,06	27,5	0,74	27,2	-0,20	26,3
	3	2	3,15 ¹⁾	1,95	41,2	1,16	38,1	24,4	36,9
	6	2	2,96 ¹⁾	1,67	13,3	1,28	43,6	2,56	43,1
	9	2	3,30	2,39	18,5	0,89	27,6	20,0	27,0

¹⁾Futterreste

Tabelle A-14. Aufnahme, gemessene faecale und renale Exkretion, Retention, Bilanz sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit von Calcium in Versuch Ib

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion		Retention	Verdaulichkeit		Bilanz
				faecal	renal		quantitativ	Marker	
				g/d		%			
BD	1	1	9,83	3,44	1,66	4,73	65,0	56,8	48,1
	5	1	9,83	3,09	1,55	4,19	68,6	64,9	52,8
	9	1	9,83	2,76	2,09	4,97	71,9	63,2	50,6
	4	2	11,5	3,59	1,90	5,97	68,7	60,3	52,1
	10	2	11,5	4,69	1,55	5,22	59,1	58,6	45,6
	11	2	11,5	4,25	1,87	5,35	62,9	59,0	46,6
BDc	2	1	8,06 ¹⁾	3,28	1,39	3,39	59,3	53,1	42,1
	6	1	8,59	2,94	1,29	4,36	65,8	58,9	50,8
	10	1	8,59	4,10	1,18	3,31	52,3	47,0	38,5
	1	2	10,0	3,92	2,24	3,86	60,9	52,8	38,5
	12	2	10,0	4,00	1,80	4,22	60,1	52,7	42,2
BDs	3	1	7,38	2,53	1,33	3,52	65,7	60,8	47,7
	7	1	7,38	2,00	1,44	3,93	72,9	63,0	53,3
	11	1	7,38	2,42	1,12	3,83	67,2	60,6	52,0
	2	2	8,61	2,60	1,75	4,25	69,8	66,9	49,4
	5	2	8,61	2,69	1,35	4,57	68,8	67,2	53,1
	8	2	8,61	2,14	1,53	4,94	75,1	74,7	57,4
BDp	4	1	7,82	3,79	1,08	2,95	51,5	34,3	37,8
	8	1	7,82	2,95	0,89	3,98	62,3	42,3	50,9
	12	1	7,82	4,26	1,08	2,49	45,5	25,0	31,8
	3	2	8,65 ¹⁾	3,85	1,90	2,89	55,5	45,9	33,5
	6	2	8,15 ¹⁾	2,89	1,40	3,86	64,5	39,1	47,4
	9	2	9,13	3,73	1,74	3,66	59,1	54,9	40,1

¹⁾Futterreste

Tabelle A-15. Aufnahme, gemessene faecale und renale Exkretion, Retention, Bilanz sowie quantitative und mittels Marker berechnete Verdaulichkeit von Stickstoff in Versuch Ib

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion		Retention	Verdaulichkeit		Bilanz
				faecal	renal		quantitativ	Marker	
				g/d		%			
BD	1	1	35,6	3,72	16,2	15,7	89,5	87,1	44,1
	5	1	35,6	6,22	14,4	14,9	82,5	80,5	41,9
	9	1	35,6	4,48	17,4	13,7	87,4	83,5	38,6
	4	2	41,5	4,15	21,2	16,2	90,0	87,3	39,0
	10	2	41,5	5,17	16,2	20,1	87,5	87,4	48,4
	11	2	41,5	5,48	18,1	17,9	86,8	85,4	43,1
BDc	2	1	29,0 ¹⁾	5,31	9,37	14,3	81,7	78,8	49,4
	6	1	30,8	6,31	13,8	10,7	79,5	75,4	34,7
	10	1	30,8	7,47	9,81	13,6	75,8	73,1	44,0
	1	2	36,0	6,71	12,3	16,9	81,3	77,5	47,0
	12	2	36,0	6,70	11,6	17,7	81,4	77,9	49,2
BDs	3	1	26,8	3,60	8,13	15,1	86,6	84,6	56,2
	7	1	26,8	2,64	8,41	15,8	90,1	86,6	58,8
	11	1	26,8	3,55	9,58	13,7	86,7	84,1	51,0
	2	2	31,3	4,06	11,3	15,9	87,0	85,8	50,9
	5	2	31,3	3,74	11,9	15,6	88,0	87,4	50,0
	8	2	31,3	4,12	12,4	14,8	86,8	86,6	47,3
BDp	4	1	27,3	6,19	8,92	12,2	77,3	69,3	44,6
	8	1	27,3	6,52	5,55	15,2	76,1	63,5	55,8
	12	1	27,3	10,4	6,20	10,7	62,0	47,6	39,2
	3	2	30,2 ¹⁾	5,38	11,0	13,8	82,2	78,3	45,7
	6	2	28,4 ¹⁾	5,96	8,44	14,0	79,0	64,1	49,2
	9	2	31,8	7,18	9,64	15,0	77,4	75,1	47,2

¹⁾Futterreste

Tabelle A-16. Konzentrationen an T [% der FS], XA, N, P, Ca und TiO₂ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	T		XA		N		P		Ca		TiO ₂	
			Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot
BD-	3	1	9,08	34,0	130	222	34,5	41,3	7,96	19,7	10,9	32,4	11,9	27,2
	7	1	11,6	38,1	125	227	32,4	36,8	8,36	20,0	12,2	30,9	12,4	31,1
	4	2	11,4	30,8	136	199	28,7	37,6	8,28	20,1	12,2	28,2	12,0	29,7
	8	2	12,0	37,4	133	199	30,7	43,9	7,78	18,0	11,4	26,6	12,2	29,2
BD+	1	1	10,6	31,7	137	219	28,8	35,4	7,75	20,3	11,9	33,1	11,5	29,0
	8	1	11,6	34,4	133	189	34,2	44,5	8,84	17,4	14,9	26,8	12,9	25,1
	2	2	10,0	36,1	139	205	30,6	39,8	7,90	20,6	12,0	31,6	11,2	29,5
	5	2	10,7	40,4	147	186	28,2	39,2	8,49	19,2	17,1	32,6	11,7	29,2
MCP-	2	1	7,78	33,7	172	259	29,1	35,1	13,1	28,8	22,4	49,4	10,9	24,6
	4	1	10,4	36,0	151	238	27,5	31,9	11,5	25,8	21,4	43,7	12,0	25,0
	3	2	9,80	34,8	156	232	31,8	36,7	12,4	24,7	19,3	36,7	12,4	24,9
	6	2	10,6	43,2	167	250	31,2	37,2	12,7	30,7	24,2	49,5	11,5	26,1
MCP+	5	1	11,0	39,7	148	252	26,2	34,3	12,1	32,4	22,5	51,8	11,3	23,3
	6	1	10,0	30,0	152	238	34,1	40,0	12,0	25,8	24,0	44,2	11,4	22,1
	1	2	11,0	34,4	145	215	27,9	36,6	11,7	24,0	17,3	34,0	12,0	25,9
	7	2	10,9	37,0	149	238	28,4	39,2	11,3	27,8	16,1	42,3	11,6	26,9

Tabelle A-17. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Organischen Substanz in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss	Exkretion	Verdaulichkeit		
				ileal	faecal	pc	pi	tt
				g/d		%		
BD-	3	1	843	220	85,7	73,9	61,0	89,8
	7	1	843	212	74,6	74,8	64,9	91,2
	4	2	1012	259	97,2	74,5	62,4	90,4
	8	2	1012	256	98,6	74,8	61,4	90,3
BD+	1	1	896	225	80,6	73,3	71,0	91,0
	8	1	896	202	95,8	76,1	61,9	89,2
	2	2	1065	276	96,9	72,7	70,6	90,9
	5	2	1065	263	101	74,1	68,2	90,6
MCP-	2	1	832	228	90,3	72,7	60,3	89,1
	4	1	832	213	91,6	74,4	56,9	89,0
	3	2	1007	246	111	75,6	54,8	89,0
	6	2	1007	261	103	74,1	60,4	89,7
MCP+	5	1	885	226	96,5	72,8	65,4	89,1
	6	1	885	223	103	73,2	62,5	88,3
	1	2	1060	256	109	74,6	64,7	89,7
	7	2	1060	264	102	73,8	67,8	90,4

¹⁾inkl. 53 g OS aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-18. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Phosphor in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss		Exkretion		Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal	faecal	renal	pc		pi	tt		
			g/d	g/d	g/d	mg/d	g/d	%				
BD-	3	1	2,80	2,01	2,17	27,0	0,61	28,3	-8,01	22,5	21,7	
	7	1	2,80	2,02	1,92	20,5	0,86	27,7	4,94	31,3	30,6	
	4	2	3,56	2,48	2,45	37,0	1,07	30,3	1,47	31,3	30,1	
	8	2	3,56	2,30	2,21	19,7	1,32	35,5	3,66	37,8	37,2	
BD+	1	1	2,85	2,02	2,09	36,0	0,72	28,0	-1,53	26,5	25,3	
	8	1	2,85	2,06	2,05	18,8	0,78	26,6	0,99	26,8	27,3	
	2	2	3,60	2,54	2,51	25,1	1,06	28,7	2,67	30,2	29,4	
	5	2	3,60	2,62	2,38	16,5	1,20	26,5	10,58	34,0	33,5	
MCP-	2	1	6,45	3,59	3,51	264	2,68	44,4	2,08	45,5	41,5	
	4	1	6,45	2,87	3,11	247	3,10	55,5	-8,27	51,9	48,1	
	3	2	7,78	3,61	3,57	448	3,75	53,6	0,96	54,1	48,3	
	6	2	7,78	3,97	4,23	375	3,17	49,0	-6,55	45,6	40,8	
MCP+	5	1	6,50	3,21	4,18	28,1	2,29	50,3	-28,5	35,7	35,3	
	6	1	6,50	3,14	3,50	79,5	2,92	51,3	-10,0	46,1	44,9	
	1	2	7,82	3,51	3,34	58,5	4,42	54,9	6,13	57,3	56,6	
	7	2	7,82	3,49	3,72	33,7	4,06	55,2	-5,37	52,4	52,0	

¹⁾inkl. 0,044 g P aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-19. Konzentrationen an IP₆₋₃ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	IP ₆		IP ₅		IP ₄		IP ₃	
			Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot
BD-	3	1	20,4	2,88	3,83	0,55	0,92	n.d.	n.d.	n.d.
	7	1	22,1	n.d. ¹⁾	4,20	n.d.	0,95	n.d.	n.d.	n.d.
	4	2	16,0	0,58	2,36	n.d.	0,64	n.d.	0,81	n.d.
	8	2	14,2	n.d.	2,78	n.d.	0,82	n.d.	0,64	n.d.
BD+	1	1	15,8	1,30	3,33	0,32	0,97	n.d.	0,56	n.d.
	8	1	18,8	n.d.	3,36	n.d.	0,92	n.d.	n.d.	n.d.
	2	2	13,5	3,05	2,14	0,44	1,32	0,12	0,72	n.d.
	5	2	16,6	0,76	2,51	0,14	0,79	n.d.	0,88	n.d.
MCP-	2	1	12,9	21,8	2,70	3,63	0,62	1,44	0,51	0,45
	4	1	15,9	19,8	2,61	2,89	0,77	1,04	n.d.	0,37
	3	2	16,3	15,7	2,96	2,68	0,83	0,45	0,97	0,33
	6	2	17,8	21,5	2,51	3,97	0,70	0,70	0,73	0,43
MCP+	5	1	20,6	16,1	4,35	2,72	1,04	0,59	n.d.	0,11
	6	1	16,9	21,2	2,62	3,22	0,78	1,63	0,36	0,46
	1	2	14,3	3,87	2,69	0,96	0,76	0,24	0,75	0,14
	7	2	17,6	19,4	3,40	3,88	0,91	1,12	0,62	0,24

¹⁾n.d. = nicht detektierbar bzw. nur in Spuren vorhanden

Tabelle A-20. Aufnahme, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt Abbau von Phytat in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss		Phytatabbau		
				ileal	faecal	pc	pi	tt
				g/d		%		
BD-	3	1	5,02	5,15	0,68	0	93,8	93,7
	7	1	5,02	5,37	n.d. ¹⁾	0	100	100
	4	2	6,02	4,79	0,07	20,4	98,5	98,8
	8	2	6,02	4,19	n.d.	30,4	100	100
BD+	1	1	5,02	4,11	0,13	18,1	96,7	97,3
	8	1	5,02	4,38	n.d.	12,7	100	100
	2	2	6,02	4,34	0,37	28,0	91,4	93,8
	5	2	6,02	5,11	0,09	15,2	98,2	98,4
MCP-	2	1	4,97	3,55	2,66	28,6	25,1	46,5
	4	1	4,97	3,99	2,38	19,8	40,3	52,2
	3	2	5,96	4,74	2,27	20,6	52,0	61,9
	6	2	5,96	5,57	2,96	6,63	46,8	50,3
MCP+	5	1	4,97	5,46	2,07	0	62,0	58,3
	6	1	4,97	4,44	2,88	10,7	35,2	42,1
	1	2	5,96	4,27	0,54	28,3	87,4	91,0
	7	2	5,96	5,46	2,59	8,46	52,5	56,5

¹⁾n.d. = nicht detektierbar bzw. nur in Spuren vorhanden

Tabelle A-21. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Calcium in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion			Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal	faecal	renal		pc	pi	tt	
				g/d			%				
BD-	3	1	7,18	2,76	3,56	0,38	3,24	61,5	-29,0	50,4	45,1
	7	1	7,18	2,96	2,98	0,31	3,88	58,8	-0,86	58,5	54,1
	4	2	8,40	3,66	3,42	2,26	2,72	56,4	6,73	59,3	32,4
	8	2	8,40	3,37	3,27	0,60	4,53	59,9	2,86	61,0	53,9
BD+	1	1	7,26	3,11	3,42	1,72	2,13	56,7	-7,02	53,0	29,3
	8	1	7,26	3,47	3,16	1,39	2,71	51,7	9,64	55,8	37,3
	2	2	8,49	3,83	3,85	0,73	3,90	54,4	1,69	54,6	46,0
	5	2	8,49	5,26	4,03	1,56	2,90	37,3	24,7	52,5	34,2
MCP-	2	1	10,7	6,15	6,03	0,28	4,38	42,4	1,94	43,5	41,0
	4	1	10,7	5,36	5,25	0,55	4,88	49,8	1,97	50,8	45,7
	3	2	11,8	5,62	5,31	1,11	5,35	52,3	5,49	54,9	45,4
	6	2	11,8	7,59	6,83	0,17	4,76	35,5	9,99	42,0	40,5
MCP+	5	1	10,8	5,97	6,68	0,54	3,55	44,1	-10,2	38,0	33,0
	6	1	10,8	6,30	6,00	0,17	4,60	41,1	5,91	44,3	42,7
	1	2	11,9	5,18	4,73	0,77	6,36	56,0	10,3	60,1	53,6
	7	2	11,9	4,98	5,66	0,20	5,99	57,7	-11,8	52,3	50,5

¹⁾inkl. 0,085 g Ca aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-22. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Stickstoff in Versuch II

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	il. Fluss	Exkretion		Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
					faecal	renal		pc	pi	tt	
					g/d		%				
BD-	3	1	28,4	8,72	4,54	12,0	11,9	69,3	47,8	84,0	41,9
	7	1	28,4	7,87	3,55	13,1	11,8	72,3	54,9	87,5	41,5
	4	2	34,2	8,57	4,58	15,0	14,6	74,9	46,8	86,6	42,6
	8	2	34,2	9,05	5,40	15,6	13,2	73,5	40,3	84,2	38,6
BD+	1	1	28,5	7,50	3,66	10,5	14,3	73,6	51,9	87,2	50,3
	8	1	28,5	7,95	5,25	11,2	12,0	72,0	33,9	81,6	42,2
	2	2	34,3	9,84	4,85	17,1	12,3	71,2	51,2	85,9	36,0
	5	2	34,3	8,68	4,83	13,8	15,6	74,6	44,9	85,9	45,6
MCP-	2	1	28,3	7,99	4,28	10,3	13,7	71,8	46,4	84,9	48,5
	4	1	28,3	6,89	3,83	10,2	14,3	75,7	44,2	86,5	50,4
	3	2	34,1	9,25	5,33	11,7	17,1	72,9	42,6	84,4	50,1
	6	2	34,1	9,80	5,12	12,3	16,7	71,3	47,6	85,0	48,9
MCP+	5	1	28,4	6,94	4,42	12,1	12,0	75,5	37,3	84,5	42,1
	6	1	28,4	8,95	5,43	11,9	11,1	68,4	40,1	80,9	39,1
	1	2	34,2	8,33	5,09	9,45	19,7	75,6	39,6	85,1	57,5
	7	2	34,2	8,81	5,24	10,6	18,4	74,2	41,1	84,7	53,7

¹⁾inkl. 0,097 g N aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-23. Konzentrationen an T [g/kg FS], XA, N, P, Ca und TiO₂ [g/kg T] in Chymus und Kot der Tiere in Versuch III

Behandlung	Tier-Nr.	DG	T		XA		N		P		Ca		TiO ₂	
			Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot	Chy	Kot
BD-	4	1	9,77	32,3	146	198	32,8	39,5	9,18	18,4	14,1	27,7	16,6	30,1
	5	1	11,4	39,9	134	225	30,4	36,5	8,11	20,3	15,6	41,3	13,3	29,9
	3	2	4,70	36,2	144	206	28,5	37,8	8,79	19,0	13,3	31,2	13,9	29,1
	7	2	11,2	40,7	133	205	29,6	33,1	7,06	16,4	12,4	27,9	12,4	33,4
BD+	1	1	11,3	38,0	139	187	33,9	43,8	9,11	17,5	13,0	28,6	14,2	25,6
	8	1	10,6	35,6	134	204	30,7	39,4	8,43	18,4	11,1	32,3	14,2	28,5
	2	2	11,2	37,7	122	189	35,0	45,1	8,09	16,1	11,2	29,6	12,4	27,9
	4	2	12,0	34,8	137	175	30,9	42,4	9,30	15,6	10,2	18,8	15,8	27,7
PHY-	6	1	8,48	35,0	123	195	32,2	35,8	3,84	11,5	7,80	30,5	12,2	30,7
	7	1	9,84	38,6	130	188	30,4	34,6	4,14	12,2	8,38	25,1	12,2	32,2
	1	2	11,1	37,6	136	168	30,6	37,0	4,47	12,1	10,9	18,1	10,8	29,5
	5	2	11,2	37,3	119	184	26,9	34,2	3,52	11,3	10,1	21,3	11,0	31,4
PHY+	2	1	7,70	36,1	139	189	31,7	41,1	4,37	10,8	9,39	31,7	12,0	27,2
	3	1	9,10	28,1	141	178	29,6	38,4	3,48	10,8	10,4	29,3	10,3	27,5
	6	2	9,83	35,8	121	180	29,4	40,2	3,40	11,1	7,77	20,9	10,5	31,3
	8	2	11,3	33,0	125	162	27,5	36,2	3,57	11,2	10,1	18,2	10,8	28,3

Tabelle A-24. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ der Organischen Substanz in Versuch III

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss	Exkretion	Verdaulichkeit		
				ileal	faecal	pc	pi	tt
				g/d	%			
BD-	4	1	848	154	80,0	81,8	48,1	90,6
	5	1	848	195	77,8	77,0	60,1	90,8
	3	2	1010	221	98,2	78,1	55,6	90,3
	7	2	1010	251	85,8	75,2	65,8	91,5
BD+	1	1	901	182	95,2	78,5	59,6	89,4
	8	1	901	183	83,9	78,4	64,5	90,7
	2	2	1063	255	105	74,8	65,9	90,2
	4	2	1063	197	107	80,5	57,1	89,9
PHY-	6	1	852	216	78,5	74,7	63,6	90,8
	7	1	852	214	75,7	74,9	64,6	91,1
	1	2	1011	288	102	71,5	64,7	90,0
	5	2	1011	289	93,4	71,4	67,7	90,8
PHY+	2	1	905	216	89,7	74,6	66,7	90,1
	3	1	905	250	89,5	70,7	70,4	90,1
	6	2	1064	301	94,5	70,2	73,3	91,1
	8	2	1064	292	106	71,2	69,1	90,0

¹⁾inkl. 53 g OS aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-25. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Phosphor in Versuch III

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme g/d	Fluss		Exkretion		Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal g/d	faecal g/d	renal mg/d	g/d	pc	pi %	tt	%	
BD-	4	1	2,71	1,66	1,83	18,8	0,86	38,8	-10,6	32,3	31,6	
	5	1	2,71	1,83	2,04	14,3	0,66	32,6	-11,5	24,8	24,3	
	3	2	3,17	2,27	2,35	33,7	0,78	28,3	-3,53	25,8	24,7	
	7	2	3,17	2,05	1,77	27,6	1,37	35,4	13,4	44,1	43,2	
BD+	1	1	2,75	1,93	2,05	20,8	0,68	28,7	-3,89	25,4	24,6	
	8	1	2,75	1,78	1,94	22,9	0,79	34,3	-6,46	29,4	28,6	
	2	2	3,21	2,35	2,08	19,1	1,11	25,9	13,0	35,2	34,6	
	4	2	3,21	2,12	2,03	30,2	1,15	33,1	6,24	36,8	35,9	
PHY-	6	1	2,77	0,94	1,13	10,9	1,63	65,9	-19,3	59,3	58,9	
	7	1	2,77	1,02	1,14	23,7	1,61	63,3	-11,7	59,0	58,1	
	1	2	3,22	1,49	1,48	25,1	1,71	53,7	0,49	54,0	53,2	
	5	2	3,22	1,16	1,32	16,6	1,88	64,1	-14,4	58,9	58,4	
PHY+	2	1	2,81	1,10	1,19	10,3	1,61	60,4	-4,79	57,5	57,1	
	3	1	2,81	1,01	1,17	13,5	1,63	63,5	-11,0	58,4	57,9	
	6	2	3,26	1,18	1,28	10,9	1,97	63,5	-5,00	60,8	60,5	
	8	2	3,26	1,19	1,41	21,9	1,82	63,0	-14,9	56,6	55,9	

¹⁾inkl. 0,044 g P aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-26. Konzentrationen an IP₆₋₃ im Chymus; Aufnahme, ilealer Fluss und pc Abbau von Phytat (IP₆) in Versuch III

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Phytat (IP ₆)						
			IP ₆	IP ₅	IP ₄	IP ₃	Aufnahme	ilealer Fluss	pc Abbau
			g/kg T				g/d		%
BD-	4	1	13,6	2,50	1,26	0,15	4,98	2,46	50,7
	5	1	12,6	2,15	1,26	0,16	4,98	2,83	43,2
	3	2	10,6	2,16	0,52	0,12	5,98	2,74	54,2
	7	2	9,69	2,26	0,92	n.d. ¹	5,98	2,81	53,0
BD+	1	1	14,9	2,66	1,57	0,18	4,98	3,15	36,8
	8	1	14,8	2,82	1,43	0,13	4,98	3,13	37,1
	2	2	9,04	2,58	0,55	0,12	5,98	2,62	56,1
	4	2	12,1	4,10	1,04	0,58	5,98	2,76	53,8
PHY-	6	1	1,03	0,49	0,55	0,69	5,12	0,25	95,0
	7	1	1,19	0,39	0,66	0,56	5,12	0,29	94,3
	1	2	3,65	1,45	0,71	0,41	6,14	1,21	80,2
	5	2	2,20	1,16	1,20	0,63	6,14	0,72	88,3
PHY+	2	1	12,8	2,04	1,19	0,31	5,12	3,21	37,4
	3	1	11,4	1,87	1,64	0,47	5,12	3,30	35,5
	6	2	8,89	2,52	2,12	0,79	6,14	3,05	50,4
	8	2	2,09	1,41	0,81	0,34	6,14	0,70	88,7

¹n. d. = nicht detektierbar bzw. nur in Spuren vorhanden

Tabelle A-27. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von Ca in Versuch III

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Exkretion			Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal	faecal	renal		pc	pi	tt	
				g/d			%				
BD-	4	1	7,83	2,54	2,77	1,34	4,12	67,5	-8,90	64,6	52,6
	5	1	7,83	3,51	4,15	1,16	2,52	55,1	-18,2	47,0	32,2
	3	2	9,58	3,43	3,86	1,24	4,48	64,2	-12,7	59,7	46,8
	7	2	9,58	3,58	3,00	1,39	5,19	62,6	16,3	68,7	54,2
BD+	1	1	7,92	2,76	3,35	1,17	3,40	64,7	-17,4	57,7	42,9
	8	1	7,92	2,34	3,41	1,31	3,20	70,1	-40,5	57,0	40,4
	2	2	9,67	3,25	3,83	1,05	4,79	66,0	-14,7	60,4	49,5
	4	2	9,67	2,31	2,44	1,82	5,41	75,8	-1,57	74,8	56,0
PHY-	6	1	7,79	1,92	2,97	0,68	4,14	75,4	-54,9	61,9	53,2
	7	1	7,79	2,06	2,34	0,97	4,48	73,6	-13,9	69,9	57,5
	1	2	8,58	3,63	2,21	1,00	5,37	57,6	39,2	74,2	62,6
	5	2	8,58	3,30	2,46	1,27	4,85	61,5	25,5	71,3	56,5
PHY+	2	1	7,88	2,36	3,50	0,77	3,61	69,8	-43,4	55,6	45,8
	3	1	7,88	3,03	3,19	0,75	3,94	61,1	-2,16	59,5	50,0
	6	2	8,67	2,66	2,40	0,93	5,34	69,0	12,7	72,3	61,6
	8	2	8,67	3,36	2,31	1,02	5,34	60,8	33,0	73,3	61,6

¹⁾inkl. 0,085 g Ca aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-28. Aufnahme¹⁾, ilealer Fluss, renale und faecale Exkretion, pc, pi und tt VQ sowie Retention und Bilanz von N in Versuch III

Behandlung	Tier-Nr.	DG	Aufnahme	Fluss		Exkretion		Retention	Verdaulichkeit			Bilanz
				ileal	faecal	renal	pc	pi	tt	%		
			g/d	g/d		g/d					%	
BD-	4	1	28,3	5,92	3,93	10,1	14,3	79,1	33,4	86,1	50,4	
	5	1	28,3	6,84	3,65	11,0	13,6	75,8	46,5	87,1	48,2	
	3	2	33,7	7,36	4,68	15,2	13,8	78,1	36,5	86,1	41,0	
	7	2	33,7	8,57	3,57	11,3	18,8	74,5	58,4	89,4	55,9	
BD+	1	1	28,4	7,19	5,14	9,86	13,4	74,6	29,6	81,9	47,2	
	8	1	28,4	6,49	4,15	9,72	14,5	77,1	37,1	85,4	51,2	
	2	2	33,8	10,2	5,85	11,4	16,6	69,8	43,2	82,7	49,0	
	4	2	33,8	7,04	5,51	12,1	16,2	79,1	22,8	83,7	47,9	
PHY-	6	1	28,1	7,91	3,51	9,31	15,3	71,8	55,8	87,5	54,4	
	7	1	28,1	7,47	3,23	9,30	15,6	73,4	56,9	88,5	55,4	
	1	2	33,3	10,2	4,53	10,6	18,2	69,4	55,7	86,4	54,6	
	5	2	33,3	8,82	3,83	12,0	17,5	73,5	56,7	88,5	52,5	
PHY+	2	1	28,2	7,95	4,54	8,90	14,8	71,7	43,6	83,9	52,3	
	3	1	28,2	8,61	4,17	9,55	14,5	69,4	51,9	85,2	51,3	
	6	2	33,4	10,1	4,61	11,2	17,6	69,7	54,6	86,2	52,7	
	8	2	33,4	9,17	4,61	12,7	16,1	72,5	50,4	86,2	48,2	

¹⁾inkl. 0,097 g N aus intracaecal verabreichtem Pektin

Tabelle A-29. mittlere Ca:tP-Verhältnisse in Futter, Chymus und Kot in allen Versuchen

	Behandlung	Futter	Chymus	Kot
Versuch Ia	BD	3,1:1	1,8:1	1,7:1
	BDc	3,2:1	1,7:1	1,7:1
	BDs	3,0:1	1,4:1	1,8:1
	BDp	3,0:1	2,4:1	2,5:1
Versuch Ib	BD	2,8:1	-	1,6:1
	BDc	2,8:1	-	1,8:1
	BDs	2,8:1	-	1,4:1
	BDp	2,8:1	-	2,0:1
Versuch II	BD-	2,4:1	1,5:1	1,5:1
	BD+	2,4:1	1,7:1	1,6:1
	MCP-	1,6:1	1,8:1	1,6:1
	MCP+	1,6:1	1,6:1	1,6:1
Versuch III	BD-	3,0:1	1,7:1	1,7:1
	BD+	3,0:1	1,3:1	1,6:1
	PHY-	2,7:1	2,3:1	2,0:1
	PHY+	2,7:1	2,6:1	2,3:1

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation

„Einfluss einer Zulage unterschiedlicher Kohlenhydrate auf die praecaecale und postileale Umsetzung und die Ausscheidung von Phosphor beim Schwein.“

selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Mit dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden noch keine vergeblichen Promotionsversuche unternommen.



Halle/Saale, den 06. April 2009

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Tina Baumgärtel
Geburtsdatum: 10. Juni 1979
Geburtsort: Karl-Marx-Stadt
Nationalität: deutsch

Ausbildung und beruflicher Werdegang

1986 – 1992: Johann-Gottfried-Herder Oberschule, Chemnitz
1992 – 1998: Johannes-Kepler-Gymnasium, Chemnitz
1998 – 2003: Studium der Agrarwissenschaften an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Schwerpunkt: Nutztierwissenschaften
09|2003: Abschluss: Diplom (Dipl.-Ing. agr.)
Diplomarbeit zum Thema: *„Zum Futterwert verschiedener Traubentrester für Wiederkäuer“*
11|2003 – 04|2004: studentische Hilfskraft im Institut für Ernährungswissenschaften an der Landwirtschaftlichen Fakultät der MLU Halle-Wittenberg
05|2004 – 03|2007: Promotionsstudent am Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der MLU Halle-Wittenberg
04|2007 – 03|2009: Referendarin für den höheren Dienst in der Agrarverwaltung im Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt
seit 04|2009: Referent für Fütterung in der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die mich in der Zeit der Anfertigung dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt und somit wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. M. Rodehutschord für die Überlassung des interessanten Themas und die angediehene wissenschaftliche Betreuung und stete Gesprächsbereitschaft.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. R. Mosenthin vom Institut für Tierernährung der Universität Hohenheim für die Betreuung während des tierexperimentellen Teils, sowie meiner Projektpartnerin, Frau Dr. B. U. Metzler-Zebeli, für die Teamarbeit bei der gemeinsamen Durchführung der Versuche und für die Diskussion der Ergebnisse.

Ferner gilt mein Dank dem technischen Personal des Instituts für Tierernährung der Uni Hohenheim sowie Herrn Prof. Dr. H. Schenkel und seinem Team von der Landesanstalt für landwirtschaftliche Chemie für die Durchführung eines Teils der Analysen.

Herrn Dr. R. Greiner und seinem Team vom Max Rubner-Institut in Karlsruhe möchte ich für die Durchführung der HPLC-Messungen sowie für die Einführung in die „Welt der Inositolphosphate“ danken.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Analysen im Labor des Instituts für Agrar- und Ernährungswissenschaften möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn N. Markus, Frau A. Schmidt, Frau I. Rapp und Frau H. Lehmann bedanken. Frau Isaak und Frau Lauch danke ich für die organisatorische Betreuung.

Für die tatkräftige Hilfe bei der Durchführung des Bilanzversuches in Merbitz sei dem Personal des Nutztierwissenschaftlichen Zentrums, allen voran O. Hödel und D. Barth, gedankt. Herzlichen Dank auch an die beiden „Starken“ A. Steinhagen und M. Hey für die Unterstützung beim Wiegen der Tiere.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen für die kameradschaftliche Unterstützung und Gesprächsbereitschaft sowie die gemütlichen Grillabende. Allen voran sei Dr. M. Bulang für seinen wertvollen Rat in Statistikfragen und die damit verbundene Geduld gedankt. Bedanken möchte ich mich auch bei meinem lieben Zimmerkollegen Dr. C. Ganzer für seine ständig offenen Ohren für jede Art von Problemen und das fast schon familiäre Verhältnis. Frau Dr. J. Boguhn danke ich für die manchmal sehr hilfreiche pragmatische Sicht der Dinge.

Mein Dank gebührt darüber hinaus B. Hildebrand, R. Krüger M. Witzig, R. Hempel, Dr. F. Hirche, Dr. L. Peters, Dr. C. Birkenfeld, Dr. M. R. Rezvani, Dr. C. Elwert und Dr. A. Dieckmann, mit denen ich sogar noch nach Feierabend gerne und viel Zeit verbrachte.

Weiterhin möchte ich mich bei O. Töpfer, und D. Jeziorny von der Universität Hohenheim für den freundschaftlichen Beistand während der Versuche bedanken. Schön, Euch beide kennen gelernt zu haben!

Für die finanzielle Unterstützung bedanke ich mich ganz herzlich bei der H. Wilhelm Schaumann Stiftung, Hamburg.

Besonderer Dank gilt meiner Familie für den Beistand und die vielen ermutigenden Worte und all meinen Freunden, die mir in dieser Zeit auf vielfältige Art und Weise treue Wegbegleiter waren.

Meinem lieben Holger danke ich für das Vertrauen, die Unterstützung und die unerschöpfliche Geduld, die er mir entgegengebracht hat.