

H.L. Müller
M. Kirchgeßner

Energetische Ausnutzung von retrogradierter Stärke im Respirationsversuch mit Sauen

Energy utilization of retrograded starch by sows

Zusammenfassung In einem Gesamtstoffwechselversuch mit 8 adulten Sauen wurden die energetische Verwertung, der N-Umsatz und die Passagerate von retrogradierter Stärke (RGS) im Vergleich zu Weizenquellstärke (WQS) geprüft. Die Stärke wurde in einer Menge von 12 und 24 g/kg $W^{0,75}$ einer den Erhaltungsbedarf deckenden Grundration zugelegt. Jedes Tier erhielt im Change-over-Verfahren alle vier Behandlungskombinationen. Zu Versuchsbeginn und Versuchsende wurde an alle Sauen die Basisration allein verabreicht. Die Fütterung erfolgte zweimal täglich. In den jeweils dreiwöchigen Stoffwechselperioden wurde von allen Tieren eine vollständige Bilanzmessung mit sechstägiger Sammlung von Kot

und Harn sowie eine 48stündige Messung des Gaswechsels in der Respirationskammer durchgeführt. Die Wärmeproduktion und EnergieRetention der Tiere wurde nach der Kohlenstoff-Stickstoff-Bilanz-Methode sowie nach der RQ-Methode ermittelt.

Die Verdaulichkeit und Umsetzbarkeit der Energie sowie die Energieretention lagen in der Gesamtration mit RGS-Zulage niedriger als mit der WQS-Ration. Beim N-Umsatz wurde mit RGS mehr N im Kot und weniger N im Harn ausgeschieden, während die N-Retention mit beiden Rationen gleich war. Die CH_4 -Bildung lag bei RGS höher als bei Fütterung von Weizenquellstärke. Gegenüber der alleinigen Basisration war die Kotmasse bei WQS unverändert, bei RGS dagegen signifikant erhöht. Die Futterpassage, die als mittlere Aufenthaltsdauer eines Markers im Verdauungstrakt gemessen wurde, betrug bei Grundfütterung 86 h und fiel bei WQS-Zulage auf 75 h und mit RGS auf 65 h ab. Die Ausnutzung der zugelegten Energie war bei RGS um 12 % geringer im Vergleich zur WQS. Dieser Unterschied verteilte sich je zur Hälfte auf eine verminderte Verdaulichkeit und intermediäre Verwertung der Energie. Die umsetzbare Energie berechnete sich für die RGS zu 16 kJ/g und die Nettoenergie zu 12,5 kJ/g. Die Versuchsergebnisse unterstreichen die Be-

deutung der retrogradierten Stärke als Nährstoff mit Ballaststoffcharakter und den damit verbundenen Vorteilen für die Darmphysiologie. Dagegen liegt die energetische Verwertung insgesamt nur wenig unter der von nichtresistenter Stärke, so daß anders als bei ausschließlichen Faserstoffen von keiner „energiereduzierten“ Eigenschaft gesprochen werden kann.

Summary A total metabolism trial was conducted in eight adult sows to compare the energetic utilization, nitrogen balance, and passage rate of retrograded starch (RGS) with that of pregelatinized wheat starch (PWS). The starch was added at levels of 12 and 24 g/kg $W^{0,75}$ to a basal ration that covered the maintenance requirement. Each animal received all four treatment combinations in a change-over design. At the start and end of the trial all sows were fed the basal ration alone. Feeding took place twice daily. During each 3-week metabolism period a complete balance measurement was performed for all animals, with 6 daily collections of feces and urine and a 48-h gas exchange measurement in a respiration chamber. The sows' heat production and energy retention were calculated by the carbon-nitrogen balance method and the RQ method.

Eingegangen: 17. September 1998
Akzeptiert: 21. September 1998

H.L. Müller · Prof. Dr. Dr. h.c. mult.
M. Kirchgeßner (✉)
Institut für Ernährungsphysiologie
der TU München
D-85350 Freising-Weihenstephan

Digestibility and metabolizability of energy and energy retention were lower in the basal ration with RGS supplemented than in the PWS supplemented ration. With regard to N exchange, sows supplemented with RGS excreted more N in the feces and less N in the urine, whereas N retention was equal with both rations. The production of CH₄ was higher with RGS than after feeding pregelatinized wheat starch. When compared with the nonsupplemented basal ration, the fecal volume was unchanged with PWS but significantly increased with RGS. The feed passage,

measured as the mean retention time of a marker in the digestive tract, was 86 h on the basal diet, falling to 75 h with PWS supplementation and 65 h with RGS. The utilization of the supplemented energy was 12 % lower for RGS compared with PWS. This difference was due to a reduction in the digestibility and intermediate utilization of the energy. The amount of metabolizable energy was calculated as 16 kJ/g and the net energy as 12.5 kJ/g RGS. The results of the trial underline the importance of retrograded starch as a fiber type

nutrient and the associated advantages for the bowel function. The energetic utilization on the other hand is only slightly lower than that of non-resistant starch; unlike pure fibrous feed materials, RGS can therefore not be regarded as a "low energy" substance.

Schlüsselwörter Retrogradierte Stärke – Verdaulichkeit – Energieverwertung – C-Bilanz – N-Bilanz – Passagezeit

Key words Retrograded starch – digestibility – energy utilization – C-balance – N-balance – passage time

Einleitung

Die Verabreichung resistenter Stärke bedeutet Zufuhr eines Nährstoffes, der im Verdauungskanal den Dünndarm unverdaut verläßt und dann postileal den Bakterien als Energiequelle zur Verfügung steht. Mit der Begünstigung des bakteriellen Wachstums wird eine Reihe von vorteilhaften physiologischen Einflüssen diskutiert. Dazu zählen die Bildung kurzkettiger Fettsäuren insbesondere von Buttersäure, die Bindung von Stickstoff (Ammoniak) und Senkung von Phenolen, Senkung des pH-Wertes, Beeinflussung des Darmepithels sowie Erhöhung des Kotvolumens und der Passagerate (1, 3, 15, 24, 25). Neben diesen Effekten auf die Darmfunktion liefert resistente Stärke aber auch Energie für den Stoffwechsel des Tieres bzw. Menschen, wenn die bei der Fermentation gebildeten kurzen Fettsäuren im Intermediärstoffwechsel umgesetzt werden. Untersuchungen zur Energieausnutzung beim Nahrungsabbau im Dickdarm haben allerdings ergeben, daß eine schlechtere energetische Effizienz zu erwarten ist als wenn Kohlenhydrate im Dünndarm verdaut und dort absorbiert werden (9, 12, 13, 16). Insgesamt streuen die Ergebnisse jedoch ziemlich, so daß mit verschiedenen Substraten von keiner einheitlichen Zahl ausgegangen werden kann. Während von resistenter Stärke in Form granulärer, partiell kristalliner Stärke wie in rohen Kartoffeln Ergebnisse zur Energieverwertung vorliegen (11), gibt es von der sog. retrogradierten Stärke (rekristallisierte Amylose) bislang keine vollständigen energetischen Bilanzversuche. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, im Gesamtstoffwechselversuch die energetische Verwertung retrogradiertter Maisstärke im Vergleich zu Weizenquellstärke zu messen.

Material und Methodik

Der Respirationsversuch wurde mit 8 nichtgraviden Sauen (Deutsche Landrasse) mit einer Anfangsmasse von

185 ± 6 kg durchgeführt. Alle Tiere erhielten zu Versuchsbeginn, zu Versuchsmitte und zu Versuchsende eine alleinige Grundrationsfütterung. In den Behandlungsperioden wurden zur Grundration zwei Stärkeformen in jeweils zwei Mengestufen verabreicht. Die Zulagen waren in zwei 4x4-lateinischen Quadraten angeordnet, so daß innerhalb einer Sequenz (Tier) alle Behandlungen vertreten waren.

Die Grundration setzte sich aus 93,5 % Wintergerste, 3 % Haferschälkleie, 1 % Sojaöl und 2,5 % Mineralstoff-Vitamin-Mischung zusammen. Der Rohnährstoffgehalt betrug in der Trockenmasse (TM) 2,3 % N, 3,4 % Rohfett, 7,1 % Rohfaser, 3,4 % Rohasche und 18,5 kJ/g Energie. Die Fütterungsmenge wurde aufgrund der an drei Tagen ermittelten Lebendmasse der Sauen tierindividuell eingestellt und während der gesamten Versuchsdauer konstant beibehalten. Die tägliche Futtermenge (31 g Trockenmasse/kg W^{0,75}) war so kalkuliert, daß der Erhaltungsbedarf (430 kJ umsetzbare Energie/kg W^{0,75}, nach GfE (7)) bei erwartetem Anstieg der Körpermasse im Versuchsablauf aufgrund der Zulagen auch noch gegen Versuchsende aus der Grundration gedeckt werden konnte. Fett (Sojaöl) wurde nur zur Sicherstellung der Versorgung mit essentiellen Fettsäuren beigemischt. Außerdem wurden zur Eiweißergänzung der Ration 1,3 g Lysin/kg zugemischt.

Als Stärke wurden retrogradierte Stärke (Novelose, National Starch and Chemical, Neustadt/Weinstraße; abgekürzt mit RGS) und Weizenquellstärke (WQS) verwendet. Die Zulagen betrugen jeweils 12 und 24 g TM pro kg W^{0,75}, entsprechend 211 und 422 kJ Bruttoenergie/kg W^{0,75}.

Vor dem Versuch wurden die Sauen zwei Wochen lang an die Versuchsbedingungen angepaßt. Die Versuchsperioden dauerten jeweils 21 Tage, wobei während der Grundfütterung zu Versuchsbeginn und während allen Zulageperioden von jedem Tier eine komplette Bilanzmessung durchgeführt wurde. Zu diesem Zweck wurden

in den letzten 8 Tagen der jeweiligen Versuchsperiode Kot und Harn 6 Tage lang quantitativ gesammelt und daran anschließend der Gaswechsel über 48 h in der Respirationskammer gemessen. In der Wiederholung der Grundfütterung zu Versuchsende wurde auf die Kotsammlung verzichtet und nur die Harnzusammensetzung und der Gaswechsel erfaßt. Bei der Grundfütterung zu Versuchsmitte beschränkte sich die Bilanzmessung auf die Erfassung des Gasumsatzes. Von den teilweise wiederholten Meßdaten bei Verabreichung der Grundration wurden Mittelwerte erstellt und diese in der weiteren Versuchsauswertung eingesetzt.

Die Tiere wurden in Sauenboxen eines Stoffwechselstalls gehalten. Die Lufttemperatur im Stall sowie in den Stoffwechselkammern war auf 20–21 °C reguliert. Während der Sammlerperiode waren die Tiere mit einem Harnkatheter versehen. Die Fütterung erfolgte zweimal täglich. Wasser wurde den Sauen zu jeder Mahlzeit in einer Menge von 5 l verabreicht.

Zur Erstellung der Energiebilanz wurden neben dem Gaswechsel die Gehalte an Stickstoff, Kohlenstoff und Energie in Futter, Fäzes und Harn erfaßt. Stickstoff wurde mit dem Macro-N-Gerät (Fa. Foss-Heraeus, Hanau), Kohlenstoff mit der konduktometrisch arbeitenden Wösthoff-Apparatur (Wösthoff GmbH, Bochum) und der Energiegehalt im adiabatischen Bombenkalorimeter (IKA Labortechnik, Staufen) bestimmt. Mit Ausnahme der Bestimmung des Stickstoffs im angesäuerten sowie des C-Gehaltes im nicht angesäuerten Frischharn wurden die Analysen mit gefriergetrocknetem Material durchgeführt. Die Energieretention (RE) und die Wärmeproduktion (H) als Differenz $H = ME - RE$ wurden nach der Kohlenstoff-Stickstoff-Bilanzmethode ermittelt. Außerdem wurde die Wärmeproduktion nach der RQ-Methode ($H [kJ] = 16,18 \cdot O_2 [L] + 5,02 \cdot CO_2 [L] - 2,17 \cdot CH_4 [L] - 5,99 \cdot \text{Harn-N} [g]$) erfaßt (2).

Zur Messung der Passagezeit wurden der Hälfte der Tiere als Marker 100 rote Kunststoffpellets (Polyethylen, 3 mm Durchmesser, 4 mm lang) einmalig am 8. Tag der jeweiligen Versuchsperiode verabreicht und die Ausscheidung des Markers sechs Tage lang verfolgt. Als Maß für die Passagezeit wurde die mittlere Verweildauer des Markers im Darmtrakt (mittlere Retentionszeit) in Stunden nach der Formel $\bar{t} = \sum a_i t_i / \sum a_i$ berechnet (26). Hierbei bedeuten a_i die Anzahl der in der i-ten Defäkation ausgeschiedenen Pellets und t_i die Zeit der i-ten Defäkation nach der Markerverabreichung. Außerdem wurden zeitliche Ausscheidungskurven durch Mittelwertbildung über die Tiere innerhalb von Rationen und Zeitpunkten erstellt. Zur mathematischen Beschreibung der Kurven wurde ein 2-Kompartiment-Modell mit den Gleichungen $dw/dt = -k w$ und $dx/dt = k w$ angenommen. w und x sind als zeitabhängige Funktionen für die Nahrung in Magen/Darm bzw. für die Faeces anzusehen. Die Lösung der ersten Differentialgleichung mit der Anfangsbedingung $w(0) = w_0$ liefert $w(t)$ und dieses eingesetzt in die zweite

Gleichung ergibt unter Berücksichtigung von $x(0) = 0$ und einer Zeitverzögerung τ schließlich mit $w_0 = 100$ Pellets die Ausscheidungskurve $x(t)$:

$$x(t) = 100 (1 - e^{-k(t-\tau)})$$

Die Schätzung der Parameter k und τ erfolgte durch Kurvenanpassung mit Hilfe der Gauß-Newton-Methode (Statistik-Programmsystem SAS (21), NLIN-Prozedur).

Die statistische Auswertung der Bilanzdaten erfolgte nach einem zweifaktoriellen Modell mit den Variablen Zulagenart und Zulagenhöhe sowie dem Faktor Tier als Blockungsvariable. Die Zulagestufe Null (Grundration, $n = 8$) wurde in der Varianzanalyse beiden Zulagearten zugeordnet, beim Freiheitsgrad im Nennerterm der F-Statistik jedoch nur einmal berücksichtigt. In den Ergebnistabellen sind neben den Mittelwerten der Behandlung die Standardfehler der Mittelwerte (SEM) angegeben. Außerdem sind die Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen F-Statistik aufgeführt, aus denen signifikante ($p < 0,05$) und tendenzielle Effekte direkt abgelesen werden können. Die partielle Ausnutzung der Stärkezulagen hinsichtlich verschiedener energetischer Kriterien wurde mit Hilfe der Regressionsrechnung ermittelt.

V Versuchsergebnisse

Die Daten zur Lebendmasse der Sauen und zum Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Werte der Grundration stellen in allen Fällen Mittelwerte über den gesamten Versuchszeitraum dar. Die Stärkezulagen verursachten eine starke Zunahme der Lebendmasse der Tiere, ein Unterschied zwischen retrogradierter Maisstärke und Weizenquellstärke konnte aber nicht festgestellt werden (213,7 vs. 214,0 kg). Die kumulative Gewichtszunahme belief sich beim mittleren Endgewicht aller Sauen von 225 kg auf 40 kg im Gesamtversuch. Bei den Kriterien des C- und N-Umsatzes waren in den meisten Fällen sowohl durch die Zulagenhöhe als auch durch die Stärkeart signifikante Effekte zu verzeichnen. Im Vergleich zur Weizenstärke wurde bei Verabreichung der retrogradierten Stärke mehr Kohlenstoff über Kot und Methan ausgeschieden, während der Harn-C und die C-Retention niedriger lagen. Das Gleiche traf für die N-Ausscheidung in Kot und Harn zu. CO_2 -C und die N-Retention wurden von der Stärkeart nicht beeinflusst. Behandlungseffekte auf den Harn-C und Harn-N sind im wesentlichen auf Unterschiede in den Konzentrationswerten zurückzuführen, da die tägliche Menge an Harnflüssigkeit weder durch die Art noch durch die Höhe der Stärkezulagen verändert wurde (Tabelle 1).

In Tabelle 2 finden sich der Gasumsatz und die Energiebilanz der Tiere. Der Sauerstoffverbrauch und die CO_2 -Ausscheidung stiegen mit der Zulagenhöhe signifikant an. Die Stärkeart hatte dagegen keinen signifikanten

Tab. 1 Mittelwerte der Lebendmasse der Sauen und des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes

	Versuchsrationen								
	GR	WQS1	WQS2	RGS1	RGS2	SEM	R	Z	R*Z
Lebendmasse, kg	201,8	211,3	216,0	210,8	217,2	3,3	0,92	0,00	0,96
Kohlenstoffumsatz, g/Tier und Tag									
Futter-C	710	983	1255	983	1255	2	0,92	0,00	0,99
Kot-C	118	112	126	138	157	3	0,00	0,00	0,00
Harn-C	21	24	23	19	21	1	0,00	0,71	0,01
CH ₄ -C	5,2	5,2	5,9	8,0	6,5	0,4	0,01	0,01	0,00
CO ₂ -C	542	654	747	649	751	8	0,99	0,00	0,84
C-Retention	24	187	354	167	319	9	0,02	0,00	0,18
Kohlenstoffumsatz, g/kg W ^{0,75} und Tag									
Futter-C	13,3	17,8	22,3	17,8	22,2	0,2	0,92	0,00	0,95
Kot-C	2,2	2,0	2,2	2,5	2,8	0,1	0,00	0,00	0,00
Harn-C	0,40	0,43	0,40	0,35	0,37	0,01	0,00	0,77	0,02
CH ₄ -C	0,10	0,09	0,10	0,14	0,12	0,01	0,01	0,02	0,00
CO ₂ -C	10,1	11,8	13,3	11,8	13,3	0,1	0,92	0,00	0,97
C-Retention	0,4	3,4	6,3	3,0	5,6	0,2	0,03	0,00	0,23
Stickstoffumsatz, g/Tier und Tag									
Futter-N	36,2	37,9	39,6	36,2	36,2	0,0	0,00	0,00	0,00
Kot-N	6,5	6,1	7,3	8,8	11,0	0,3	0,00	0,00	0,00
Harn-N	23,1	26,5	23,0	20,9	18,5	0,8	0,00	0,00	0,01
N-Retention	6,6	5,4	9,4	6,5	6,7	0,9	0,46	0,06	0,10
Stickstoffumsatz, mg/kg W ^{0,75} und Tag									
Futter-N	677	686	704	657	642	8	0,00	0,74	0,00
Kot-N	122	109	129	160	195	6	0,00	0,00	0,00
Harn-N	433	480	409	379	328	15	0,00	0,00	0,01
N-Retention	122	97	166	118	118	17	0,50	0,12	0,12
Harnausscheidung									
Menge g/Tag	8584	8698	8485	8484	8308	159	0,32	0,40	0,77
N %	0,27	0,30	0,27	0,25	0,22	0,01	0,00	0,01	0,01
C %	0,25	0,28	0,27	0,23	0,26	0,01	0,00	0,26	0,01
Energie J/g	107	114	116	103	110	4	0,11	0,38	0,41

GR = Grundration (ohne Stärkezulage)

WQS = Ration mit Weizenquellstärke, RGS = Ration mit retrogradierte Stärke; jeweils 2 Zulagestufen

Varianzanalyse (F-Test):

R: Prob > F für Rationseffekt

Z: Prob > F für Effekt der Zulagehöhe

R*Z: Prob > F für Interaktionseffekt

Effekt auf die CO₂-Menge und bewirkte beim Sauerstoff nur mit der höheren Zulage an RGS einen tendenziell gesteigerten Verbrauch. Die Methanbildung blieb gegenüber der Grundration durch die Zulage von Weizenstärke unverändert, bei Zufuhr von RGS erhöhte sich CH₄ im Mittel um ein Drittel. In Analogie zur C-Bilanz waren auch beim Energieumsatz überwiegend signifikante Effekte von Zulagenhöhe und Zulageart aufgetreten. Die verdauliche Energie lag in der RGS-Gruppe bei beiden Zulagestufen signifikant niedriger im Vergleich zur Kontrolle. Im gleichen Ausmaß traf dies auch für die umsetzbare Energie zu. Relativ betrachtet betrugen Verdaulichkeit und

Umsetzbarkeit der Gesamtration bei RGS-Fütterung um 2,9 Prozentpunkte weniger. Demgegenüber hatte die Stärkeart keinen signifikanten Einfluß auf die Wärmeproduktion der Sauen. Sie betrug im Mittel der beiden Meßmethoden (Mittel aus Hcn und Hrq) für die Rationen mit Weizenstärke 24,9 MJ und für die RGS-Rationen 25,1 MJ/Tag. Die Energieretention wies einen signifikanten Unterschied auf und belief sich im Mittel auf 13,6 bzw. 12,0 MJ/d mit beiden Stärkerationen. Die angesetzte Energie bestand zum überwiegenden Anteil aus Körperfett, wobei sich beide Stärkearten nicht unterschieden (91,7 % für WQS, 91,0 % für RGS).

Tab. 2 Mittelwerte des Gas- und Energieumsatzes

	Versuchsrationen								
	GR	WQS1	WQS2	RGS1	RGS2	SEM	R	Z	R*Z
Gasumsatz, Liter/Tier und Tag									
O ₂	1066	1155	1164	1142	1226	13	0,14	0,00	0,02
CO ₂	1012	1220	1394	1212	1402	14	0,99	0,00	0,84
CH ₄	9,7	9,6	11,0	14,9	12,2	0,8	0,01	0,01	0,00
RQ (CO ₂ /O ₂)	0,950	1,057	1,198	1,061	1,143	0,008	0,02	0,00	0,00
Gasumsatz, Liter/kg W ^{0,75} und Tag									
O ₂	19,9	20,9	20,7	20,7	21,7	0,3	0,18	0,00	0,05
CO ₂	18,9	22,0	24,8	22,0	24,8	0,3	0,92	0,00	0,97
Energieumsatz, MJ/Tier und Tag									
Aufnahme (GE)	28,7	39,5	50,3	39,4	50,1	–	–	–	–
Kotenergie	5,0	4,7	5,3	5,9	6,7	0,1	0,00	0,00	0,00
DE	23,7	34,8	45,0	33,5	43,4	0,2	0,00	0,00	0,00
Harnenergie	0,92	0,99	0,98	0,87	0,91	0,04	0,04	0,72	0,23
CH ₄	0,38	0,38	0,44	0,59	0,48	0,03	0,01	0,01	0,00
ME	22,4	33,4	43,5	32,1	42,0	0,2	0,00	0,00	0,00
Hcn	21,4	23,8	25,4	23,5	25,6	0,4	0,99	0,00	0,82
Hrq	22,2	24,6	25,7	24,4	26,7	0,3	0,22	0,00	0,06
REcnrq	0,7	9,2	18,0	8,1	15,8	0,4	0,00	0,00	0,04
RE-Protein	1,0	0,8	1,4	1,0	1,0	0,1	0,46	0,06	0,10
REcnrq-Fett	-0,3	8,4	16,6	7,2	14,8	0,4	0,01	0,00	0,11
DE/GE %	82,7	88,0	89,4	85,1	86,6	0,3	0,00	0,00	0,00
ME/GE %	78,2	84,5	86,6	81,4	83,9	0,4	0,00	0,00	0,00
REcnrq/ME %	2,9	27,4	41,3	25,2	37,6	1,3	0,07	0,00	0,34
kJ/kg W ^{0,75} und Tag									
Aufnahme (GE)	536	714	894	714	887	9	–	–	–
Kotenergie	93	86	95	106	119	3	0,00	0,00	0,00
DE	444	628	799	608	768	8	0,01	0,00	0,17
Harnenergie	17,1	18,0	17,4	15,8	16,1	0,7	0,05	0,89	0,31
CH ₄	7,2	6,9	7,7	10,6	8,6	0,5	0,01	0,02	0,00
ME	419	604	774	581	744	8	0,01	0,00	0,16
Hcn	399	430	452	426	454	7	0,92	0,00	0,91
Hrq	415	445	456	442	474	5	0,26	0,00	0,13
REcnrq	12	166	320	147	280	8	0,01	0,00	0,07

Abkürzungen: siehe Tabelle 1

DE = verdauliche Energie

ME = umsetzbare Energie

Hcn = Wärmeproduktion nach der CN-Bilanzmethode

Hrq = Wärmeproduktion nach der Brouwer-Formel

RE = Energieretention

cnrq = Mittelwert nach CN-Bilanzmethode und Brouwer-Formel

Die bisher dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die gesamte Futterration. Um den partiellen Energieumsatz mit steigender Zulage zu quantifizieren, wurden für beide Rationsarten Regressionen zur Zulageenergie berechnet (Tabelle 3). Für die Verdaulichkeit der Energie aus Weizenstärke ergab sich ein Wert von 98,3 %, während die retrogradierte Stärke 91,9 % aufwies. Die RGS wurde damit um 6,4 Prozentpunkte schlechter verdaut. Nahezu die gleiche Differenz zwischen beiden Stärkearten ist bei der Umsetzbarkeit der Energie zu verzeichnen. In der Verwertung der umsetzba-

ren Energie für den Energieansatz unterschieden sich die Stärkearten um 4,7 Prozentpunkte. Beide Teilvorgänge sind in Abbildung 1 in Form einer Regression der Energieretention auf die Zufuhr an Brutto-Stärkeenergie zusammengefaßt. Danach liegt insgesamt die RE aus retrogradiertem Stärke um 9,5 Prozentpunkte bzw. relativ um 11,8 % niedriger als der Energieansatz aus Weizenstärke. Wie die Darstellung zeigt, steigt der Energieansatz in beiden Fällen streng linear mit der Zufuhr an Bruttoenergie an.

Tab. 3 Ausnutzungskoeffizienten der StärkezulagenModell: $Y = \text{const} + \text{Tier} + \beta X + \varepsilon$

Y, MJ/d	X, MJ/d	P (Tier)	$\beta \pm s\beta$	t (β)	RSD	R ²
Weizenquellstärke:						
DE	GE	0,10	0,983 \pm 0,010	99,9	0,42	0,998
ME	GE	0,26	0,977 \pm 0,010	98,5	0,43	0,998
Hcn	ME	0,05	0,191 \pm 0,028	6,80	1,18	0,805
Hrq	ME	0,02	0,165 \pm 0,022	7,46	0,93	0,836
REcnrq	ME	0,03	0,822 \pm 0,024	34,4	1,01	0,988
Retrogradierte Stärke:						
DE	GE	0,84	0,919 \pm 0,009	103	0,38	0,999
ME	GE	0,74	0,916 \pm 0,011	84,6	0,46	0,998
Hcn	ME	0,06	0,217 \pm 0,027	8,1	1,05	0,844
Hrq	ME	0,00	0,233 \pm 0,017	13,3	0,68	0,934
REcnrq	ME	0,01	0,775 \pm 0,021	36,3	0,84	0,989

P (Tier): p-Werte des F-Tests auf den Tiereffekt

RSD = Wurzel aus der Restvarianz

R² = Bestimmtheitsmaß

Neben der energetischen Auswirkung wurde auch der Einfluß von retrogradierte Stärke auf die Futterpassage untersucht. Hierzu sind zunächst in Tabelle 4 Angaben zur Futteraufnahme und Ausscheidung von Kotmasse wiedergegeben. Die Zulage von Weizenstärke zur Grundration führte im Mittel zu keiner Erhöhung der frischen oder trockenen Kotmasse, so daß die Relativzahlen in bezug auf die aufgenommene Futtermenge deutlich niedriger lagen. Im Gegensatz dazu wurde bei Zulage der retrogradierten Stärke vermehrt Kot ausgeschieden. Die Frischmasse an Kot lag im Vergleich zur Grundration in den beiden Zulagestufen um 35 bzw. 62 % höher. Weniger stark ausgeprägt war mit 14 bzw. 27 % die entsprechende Ausscheidung an Kottrockenmasse. Die Passagezeit des Futters war mit Hilfe von peroral verabreichten Kunststoffpellets gemessen worden. Die mittlere Aufenthaltsdauer dieses Markers im Verdauungstrakt nahm von

86 h bei Verfütterung der Grundration über 75 h bei WQS auf 65 h bei RGS ab (Tabelle 5). Da bei der Retentionszeit kein Einfluß der Zulagenhöhe zu erkennen war (siehe Kontraste WQS1 vs WQS2 und RGS1 vs RGS2), wurden für die Kurvendarstellung der Markerausscheidung die Zulagestufen innerhalb der Stärkeart jeweils zu einer Stichprobe zusammengefaßt. Das Ergebnis ist in Abbildung 2 als kumulative Markerausscheidung in den Fäzes gegen die Zeit nach der Markerverabreichung dargestellt, die Parameterwerte der Ausscheidungskurven sind in Tabelle 6 aufgezeigt. Die Markerausscheidung setzte bei der RGS wesentlich früher ein als bei der WQS, die sich ihrerseits nur geringfügig von der Grundration unterschied. Dagegen stimmte die Steilheit der Kurven (Geschwindigkeitskonstante k) bei beiden Stärkearten überein, während die Kurve bei der Grundration signifikant flacher verlief.

Tab. 4 Futteraufnahme und Kotausscheidung

	Versuchsrationen								
	GR	WQS1	WQS2	RGS1	RGS2	SEM	R	Z	R*Z
Futteraufnahme, g/Tag									
Frischmasse (FM)	1747	2424	3100	2409	3071	5,3	–	–	–
Trockenmasse (TM)	1555	2165	2775	2163	2771	4,8	–	–	–
Kotmasse, g/Tag									
frisch	675	639	706	915	1098	26	0,00	0,00	0,00
frisch/Futter-FM, %	38,6	26,3	22,8	38,0	35,7	1,1	0,00	0,00	0,00
trocken	272	261	287	311	346	7	0,00	0,00	0,00
trocken/Futter-TM, %	17,5	12,1	10,3	14,4	12,5	0,3	0,00	0,00	0,00
Verdaulichkeit									
der Trockenmasse, %	82,5	87,9	89,7	85,6	87,5	0,3	0,00	0,00	0,00

Diskussion

Resistente Stärke wird definiert als Stärke und Abbauprodukte davon, die im Dünndarm nicht resorbiert werden und den Dickdarm erreichen (6). Nach der Art der Resistenz gegen die enzymatische Verdauung unterscheidet man unter anderem die Kategorie RS₃, bei der durch physikalisch-thermische Behandlung ein Teil der Stärke in diese Eigenschaft übergeführt wird (retrogradierte Stärke). Im vorliegenden Versuch wurde ein solches kommerziell hergestelltes Präparat verwendet.

Die Daten zeigen, daß die verfütterte retrogradierte Stärke zwar schlechter verdaut wurde als die äußerst hochverdauliche Weizenquellstärke, mit einem Verdauungskoeffizienten von 92 % aber auch sehr hoch abgebaut wurde. Der Wert liegt im Bereich von Ergebnissen bei Ferkeln und Menschen, wo die Wiederauffindung von resistenter Stärke in den Faezes zwischen 0 und einem Fünftel lag (8, 19, 25). Ein höherer Wert mit 32 % Stärke (polymerisierte Glucose) im Kot von Ratten errechnet sich aus Daten von Schulz et al. (23).

Eine deutliche Verschiebung im Verdauungsgeschehen zwischen Weizenquellstärke und retrogradierte Stärke geht aus dem Kot-N und den Harn- und CH₄-Daten hervor. Zufuhr von RGS erhöhte die N-Ausscheidung mit dem Kot. Andererseits war die N-Exkretion im Harn und damit verbunden auch die Harnenergie vermindert. Methan wiederum lag bei RGS-Verabreichung im Mittel höher. Auch in Versuchen mit Zugabe resistenter Stärke an Ferkel und Ratten wurde wie im vorliegenden Versuch diese Veränderung der Ausscheidungsroute des N festgestellt (8, 27). Beim Menschen wurde ebenfalls eine erhöhte fäkale N-Ausscheidung mit resistenter Stärke beobachtet, jedoch keine signifikante Änderung des täglichen Harn-N (1). Vergleichbare Ergebnisse mit erhöhtem Kot-N und verringertem Harn-N sind bereits früher mehrfach beobachtet worden, wenn fermentierbare Futterstoffe wie Cellulose oder Pektin, die durch körpereigene intestinale Enzyme nicht gespalten werden, an Schweine verabreicht wurden (14, 16, 17). Der physiologische Zusammenhang liegt primär in der Stimulation der bakteriellen Umsetzungen im Caecum und Dickdarm der Tiere und der damit verbundenen Bildung von Bakterienprotein, das

im Kot ausgeschieden wird. Die Folge ist eine Verschiebung des N vom Harn zum Kot. Heijnen und Beynen (8) weisen darauf hin, daß möglicherweise auch eine Überführung von Ammoniak in Ammonium durch die Absenkung des pH-Wertes infolge verstärkter Fermentation eine Rolle spielt. Ammonium wird im Colon schlechter absorbiert als Ammoniak und damit eher im Kot ausgeschieden. Auch mehr Methanbildung, wie im vorliegenden Versuch gefunden, ist als Indikator einer verstärkten Fermentation anzusehen. Allerdings zeigen Untersuchungen, daß mit der Fermentation nicht notwendigerweise Methan linear ansteigen muß (5, 14). Eine Konsequenz der fäkalen Ausscheidung von Bakterienmasse im Kot ist schließlich, daß die verdaute und fermentierte Menge an RGS höher war als der scheinbare Verdauungskoeffizient von 92 % wiedergibt. Unter Berücksichtigung des höheren Kot-N als Bakterienmasse, gewisser CH₄-Verluste und einer anteiligen Fermentationswärme dürfte im vorliegenden Versuch die RGS nahezu vollständig fermentiert worden sein.

Einen starken Einfluß zeigte die RGS-Fütterung auch auf die Ausscheidung an Kotmasse, die anders als bei Grundfütterung und WQS mit der aufgenommenen Futtermenge linear anstieg. Die damit verbundene höhere Wasserausscheidung im Kot korrespondiert mit einem entsprechenden Rückgang der Harnflüssigkeit, wobei zu bemerken ist, daß die täglich angebotene Wassermenge für alle Versuchsgruppen gleich war. Eine höhere Kotmasse nach Aufnahme resistenter Stärke wird auch bei Menschen und Ratten beobachtet (z.B. 4, 8, 23). Wie aus dem vorliegenden Versuch hervorgeht, ist mit der erhöhten Kotmasse eine veränderte Futterpassage verbunden. Die Ausscheidung des Markers setzte bei RGS früher ein als bei WQS und der Grundfütterung, jedoch war der Zeitverlauf zwischen beiden Stärkearten gegenüber der flacheren Kurve bei alleiniger Grundfütterung gleich. Diese Unterschiede erklären letztlich die gefundenen Differenzen in der Retentionszeit der drei verschiedenen Futterationen.

Neben der unterschiedlichen Verdaulichkeit war auch bei der Konvertierung der verdaulichen bzw. umsetzbaren Energie in Energieansatz eine Differenz zwischen beiden Stärkearten festzustellen. Die Art des Energieansatzes war dagegen in beiden Fällen mit rund 90 % Körperfett

Tab. 5 Mittlere Retentionszeit des Markers im Verdauungstrakt, h

Grundration	WQS1	Versuchsrationen		RGS1	RGS2	F-Test Prob>F
		WQS2				
85,8 ± 17,8	75,6 7,2	74,6 15,1		68,3 13,1	62,6 10,0	0,03
Kontraste:	Grundration	vs	WQS, RGS	Prob > t	0,01	
	WQS vs RGS				0,05	
	WQS1 vs WQS2				0,88	
	RGS1 vs RGS2				0,38	

Tab. 6 Parameterschätzung der Ausscheidungskurven des Markers

		Grundration	WQS	RGS
k [h ⁻¹]		0,0286 ^b	0,0381 ^a	0,0372 ^a
	± s.e.	0,0006	0,0019	0,0035
τ [h]		47,8 ^a	45,8 ^a	32,4 ^b
	± s.e.	0,4	0,8	1,5

s.e. = asymptotischer Standardfehler

p-Level = 0,05 für Parametervergleich mit dem Tukey-Test

gleich. Die schlechtere Verwertung der RGS ist darauf zurückzuführen, daß entweder nur der intestinal verdaute Anteil der RGS genutzt wurde oder daß die Energieausnutzung postileal verdauter (fermentierter) Energie schlechter ist. Aufgrund mehrerer Arbeiten (Literatur siehe Einleitung) kann der erste Fall ausgeschlossen werden. Da im vorliegenden Versuch eine Aufteilung in intestinal und postileal verdaute RGS nicht direkt gemessen werden konnte, läßt sich aus den Versuchsdaten keine genaue Zerlegung der partiellen Energieverwertung in diese beiden Teilprozesse durchführen. Überschlagsmäßig kann jedoch unter der Annahme von einem Drittel resistenter Stärke in dem Produkt Novelose (nach Herstellerzertifi-

kat, bestimmt nach Prosy et al. (20)) berechnet werden, daß bei gleicher intestinaler Stärkeverwertung beider Stärkearten der im Dickdarm verdaute Anteil von RGS zu 68 % $(=(0,775-0,822*2/3)/(1/3))$ in Körperenergie umgesetzt wurde. Im Vergleich zu Weizenquellstärke (0,822) liegt damit die über Fermentation genutzte Stärke um 17 % niedriger. Die errechnete partielle Verwertung von 68 % stimmt mit Versuchen überein, bei denen verschiedene Kohlenhydrate in das Caecum von Sauen infundiert wurden und im Mittel eine energetische Verwertung der Substrate von 67 % gefunden wurde (14). Bei regressionsanalytischer Auswertung umfangreicher Versuchsdaten mit Rationen sehr unterschiedlicher Nährstoffzusammensetzung fanden Schieman et al. (22) im Vergleich von postilealer mit präcaecaler Energienutzung eine Differenz von 20 %. Auch mit diesem Ergebnis deckt sich obige Berechnung. Für eine praktische Aussage über den energetischen Wert von retrogradierter Stärke ist diese Unterteilung allerdings weniger von Bedeutung als vielmehr die Gesamtverwertung der Energie. Sie belief sich im vorliegenden Versuch auf 71,2 % und war damit nur 12 % schlechter als die Gesamtverwertung von Weizenquellstärke (80,7 % (Abb. 1)). Dies bedeutet, daß ein Gramm retrogradierte Stärke bei einem Bruttoenergiegehalt von 17,6 kJ einem Nettowert von 12–13 kJ Körperfettansatz entspricht. Die nutzbare (umsetzbare) Energie beläuft sich auf 16 kJ/g.

Die Extrapolation von Versuchsergebnissen mit Tieren auf den Menschen muß immer unter Vorbehalt erfolgen, gewisse Parallelbefunde zwischen Modelltieren und dem Menschen bei Fütterung resistenter Stärke weisen aber auf Gemeinsamkeiten hin. Bezüglich der Energieausnutzung sind zum einen die Verdaulichkeit (Fermentierbarkeit) der Energie und zum anderen die intermediäre energetische Nutzung der Verdauungsprodukte (Verwertung der umsetzbaren Energie) zu unterscheiden. Da im vorliegenden Versuch beide Teilnutzungen nur rund je 6 Prozentpunkte unter denen der WQS lagen, müßten beim Menschen schon starke Abweichungen zum Modelltier Schwein vorliegen, um nicht die Schlußfolgerung ziehen zu können, daß sich der Einsatz retrogradierter Stärkeprodukte in bezug auf die Energiebilanz auch beim Menschen im allgemeinen nur wenig von normaler Stärke unterscheiden wird. Unterstützt wird diese Aussage durch

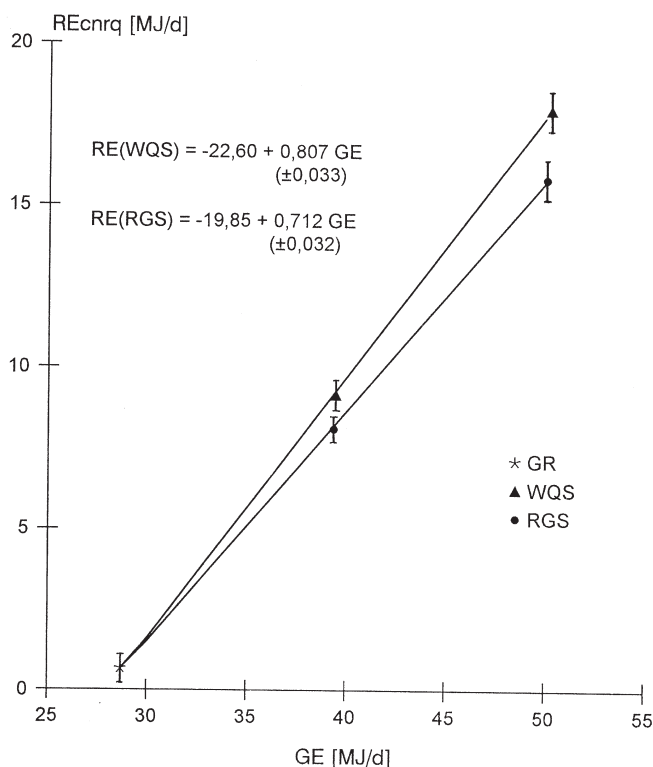
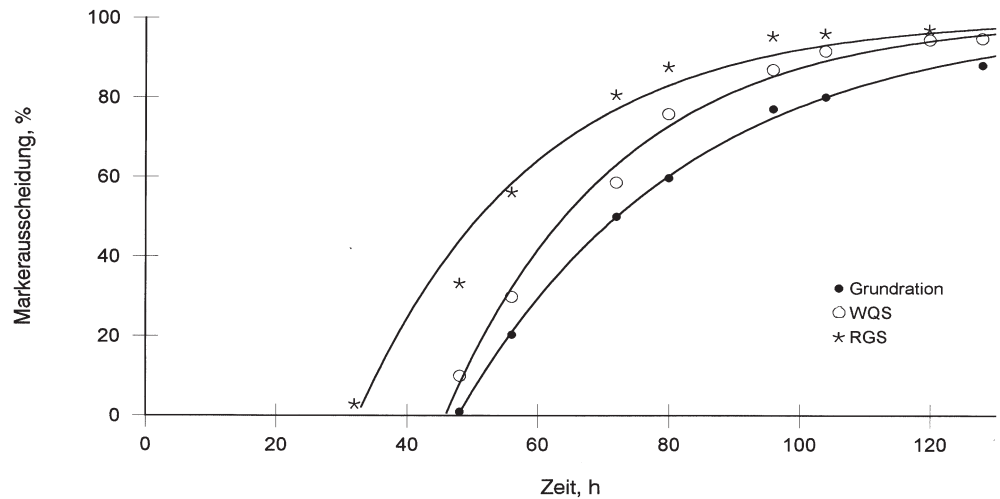


Abb. 1 Abhängigkeit der Energieretention von der Zufuhr an Bruttoenergie aus Weizenquellstärke und retrogradierter Stärke (Behandlungsmittel ± SEM, n = 8)

Abb. 2 Kumulative fäkale Ausscheidungskurve des Markers bei Fütterung der Grundration, WQS-Ration und RGS-Ration



Befunde an Schweinen, wo gezeigt wurde, daß in den Dickdarm infundierte Fettsäuren energetisch nach theoretisch zu erwartender Effizienz aufgrund allgemeiner Prinzipien des Energiestoffwechsels im Säuger verwertet werden (18). Demzufolge dürften Speziesunterschiede im Energiewert vorrangig durch die Höhe der Fermentierbarkeit bestimmt werden. Ein interessantes Ergebnis hierzu liefern Verdauungsversuche von Cummings et al. (4), die mit RS₃-Stärke aus Weizen und Mais bei der größeren Zahl von Probanden Werte um 90 % fanden, in einem Viertel der Fälle konnte die Stärke jedoch nicht abgebaut werden. Interindividuale Unterschiede im Abbau von resi-

stenter Stärke können demzufolge bedeutsamer sein als Differenzen zwischen Schwein und Mensch im allgemeinen. Unabhängig von diesem Energieaspekt sollten die beobachteten Auswirkungen der retrogradierten Stärke auf N-Ausscheidung und Nahrungspassage, wenn auf den Menschen extrapoliert, günstige darmphysiologische Wirkungen erwarten lassen. Damit unterstützen die vorliegenden Ergebnisse letztlich die steigende Tendenz in der Humanernährung, den gesundheitlichen Wirkungen von fermentierbaren Inhaltsstoffen der Nahrung mehr Bedeutung beizumessen (10).

Literatur

- Birkett A, Muir J, Phillips J, Jones G, O'Dea K (1996) Resistant starch lowers fecal concentrations of ammonia and phenols in humans. *Am J Clin Nutr* 63:766–772
- Brouwer E (1965) Report of Sub-committee on constants and factors. *Proc. 3rd Symp. Energy Metabolism*, EAAP-Publ. No. 11:441–443. Academic Press London
- Brown IL (1994) High amylose starches – new developments in human nutrition. *Proc Nutr Soc Austr* 18:33–39
- Cummings JH, Beatty ER, Kingman SM, Bingham SA, Englyst HN (1996) Digestion and physiological properties of resistant starch in the human large bowel. *Br J Nutr* 75:733–747
- Demeyer DI, DeGraeve K (1991) Differences in stoichiometry between rumen and hindgut fermentation. *Adv Anim Physiol Anim Nutr* 22:50–61
- Englyst HN, Kingman SM, Hudson GJ, Cummings JH (1996) Measurement of resistant starch in vitro and in vivo. *Brit J Nutr* 75:749–755
- GfE (1987) Gesellschaft für Ernährungsphysiologie: Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 4, Schweine. DLG Verlag Frankfurt am Main
- Heijnen M-LA, Beynen AC (1997) Consumption of retrograded (RS₃) but not uncooked (RS₂) resistant starch shifts nitrogen excretion from urine to feces in cannulated piglets. *J Nutr* 127:1828–1832
- Hoffmann L, Schiemann R (1985) Zur Weiterentwicklung der energetischen Futterbewertung. *Arch Tierernähr* 35:439–460
- Jakobasch G, Schmiedl D, Schmehl K (1997) Darmkrebsprävention durch resistente Stärke? *Ern-Umschau* 44:369–373
- Jentsch W, Schiemann R, Hoffmann L, Beyer M, Zwierz P (1989) Untersuchungen zur energetischen Verwertung von Kartoffelstärke und Kartoffeln unterschiedlicher Behandlung beim Schwein. *Arch Anim Nutr* 39:875–892
- Jørgensen H, Zhao XQ, Eggum BO (1996) The influence of dietary fiber and environmental temperature on the development of the gastrointestinal tract, digestibility, degree of fermentation in the hindgut and energy metabolism in pigs. *Brit J Nutr* 75:365–378
- Kirchgeßner M, Müller HL (1991) Energy utilization via hindgut fermentation in pigs. *Adv Anim Physiol Anim Nutr* 22:41–49
- Kirchgeßner M, Müller HL, Roth FX, Ascherl R, Erhardt W (1987) Intracaeal infundierte Kohlenhydrate sowie Casein und ihr Einfluß auf die Energie- und N-Bilanz von Sauen. *J Anim Physiol Anim Nutr* 58:241–253
- Mathers JC, Dawson LD (1991) Large bowel fermentation in rats eating processed potatoes. *Br J Nutr* 66:313–329
- Müller HL, Kirchgeßner M (1983) Energetische Verwertung von Cellulose beim Schwein. *Z Tierphysiol Tierernährg Futtermittelkde* 49:127–133
- Müller HL, Kirchgeßner M (1985) Energetische Verwertung von Pektin

- bei Sauen. *Z Tierphysiol Tierernährg Futtermittelkde* 54:14–20
18. Müller HL, Kirchgeßner M, Roth FX (1991) Energetische Effizienz eines intracaecal infundierten Essigsäure-Propionsäuregemisches bei Sauen. *J Anim Physiol Anim Nutr* 65:140–145
 19. Phillips J, Muir JG, Birkett A, Lu ZX, Jones GP, O'Dea K, Young GP (1995) Effect of resistant starch on fecal bulk and fermentation-dependent events in humans. *Am J Clin Nutr* 62:121–130
 20. Prosky L, Asp NG, Schweizer TF, DeVries JW, Furda I (1988) Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and food products. *J Assoc Off Anal Chem* 71:1017–1023
 21. SAS Institute Inc., SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, 1994, p 1135, Cary, NC, USA
 22. Schiemann R, Hoffmann L, Jentsch W, Beyer M (1989) Investigation of the energetic utilization of rations with a high variation in the content of different carbohydrate fractions in adult pigs. *Proc. 11th Symp. on Energy Metabolism of farm animals, EAAP-Publ, No. 43:316–319. Pudoc Wageningen*
 23. Schulz AGM, Van Amelsvoort JMM, Beynen AC (1993) Dietary native resistant starch but not retrograded resistant starch raises magnesium and calcium absorption in rats. *J Nutr* 123: 1724–1731
 24. Silvester KR, Englyst HN, Cummings JH (1995) Ileal recovery of starch from whole diets containing resistant starch measured in vitro and fermentation of ileal effluent. *Am J Clin Nutr* 62: 403–411
 25. Van Munster IP, Tangerman A, Nagen-gast FM (1994) Effect of resistant starch on colonic fermentation, bile acid metabolism, and mucosal proliferation. *Dig Dis Sci* 39:834–842
 26. Warner ACI (1981) Rate of passage of digesta through the gut of mammals and birds. *Nutr Abstr Rev (B)* 51:789–820
 27. Younes H, Demingné C, Behr S, Révész C (1995) Resistant starch exerts a lowering effect on plasma urea by enhancing ureal N transfer into the large intestine. *Nutr Res* 15:1199–1210