

Verdaulichkeit, intestinale Passagezeit und Energiewert von Weizenkleie im Modellversuch an Sauen

M. Kirchgeßner, H. L. Müller und F. X. Roth

Institut für Ernährungsphysiologie der Technischen Universität München
in Freising-Weihenstephan

Zusammenfassung: In einem Gesamtstoffwechselversuch erhielten vier Sauen in jeweils zweiwöchiger Periode eine tägliche Zulage von 7, 14, 21 bzw. 28 g Weizenkleie pro kg Lebendmasse^{0,75}. Die Grundration wurde in einer konstanten Menge von 36 g/kg LM^{0,75} und Tag gefüttert. Zur Messung der präzäkalen Verdaulichkeit wurden dem Futter 0,3 % Cr₂O₃ zugemischt und Zäkumsaft den kanülierten Tieren entnommen. Die Passagezeit des Futters wurde mit Hilfe von peroral und intrazäkal applizierten Kunststoffmarkern erfaßt. In allen Versuchsperioden wurde von jedem Einzeltier eine komplette Energiebilanz erstellt.

Die Verdaulichkeit der Energie aus Kleie betrug im gesamten Verdauungstrakt 60 %, die Umsetzbarkeit der Energie 57 %. Davon beliefen sich der präzäkale Anteil auf 70 % und der postileale Anteil auf 30 %. Die energetische Verwertung der umsetzbaren Energie für den Energieansatz betrug 66,2 %. Die postileal abgebaute Kleie wurde um rund ein Viertel schlechter verwertet als die im Dünndarm zur Resorption vorliegende Kleieenergie. Der Gehalt an umsetzbarer Energie in der Kleie errechnete sich auf 10,1 kJ/g Trockenmasse. Der energetische Wert von Ballaststoffen in der Weizenkleie ist auf 5 kJ/g zu beziffern.

Die Ausscheidung von kurzkettigen Fettsäuren im Kot war mit 1–2 % der Kotenergie sehr gering. Die Passagezeit des Futters im gesamten Verdauungstrakt verringerte sich von 78 h ohne Kleiezulage auf 52 h in Kleiestufe 28. Die präzäkale Aufenthaltsdauer des Markers betrug nur ein Fünftel der gesamten Passagezeit.

Summary: An energy metabolism trial was conducted with four sows allocated to each of four levels of wheat bran (7, 14, 21 or 28 g/kg body weight^{0,75} · day). During 2-week experimental periods half the number of animals received increasing levels of the wheat bran supplementation, the other sows were fed in decreasing order. The basal diet was given constantly at a level of 36 g/kg Bw^{0,75}. Total digestibility of energy was determined by the collection method. For partitioning the digestible energy into a prececal and postileal component the diet was supplemented with 0,3 % Cr₂O₃, and samples of digesta taken by means of a cecum cannula were analyzed for this marker. The rate of passage of food was evaluated by using plastic pellets fed orally as well as inserted into the cecum. During each experimental period a complete energy balance was performed according to the methods of indirect calorimetry.

The digestibility and metabolizability of wheat bran energy over the total alimentary tract was 60 % and 57 %, respectively. As a percentage of the total digestible energy, 70 % were found in the prececal site of the digestive tract, and 30 % in the hindgut fermentation. The efficiency of utilization of metabolizable energy (ME) for energy retention was 66.2 %. Utilization of hindgut energy was lower by about a quarter than utilization of energy digested in the small intestine. The mean contents of ME of wheat bran amounted to 10.1 kJ/g dry matter. The ME of the wheat bran fiber (non-starch poly-saccharides) was calculated to be 5 kJ/g.

The excretion of short-chain fatty acids in the feces was only 1–2 % of fecal energy. The rate of passage of food decreased from 78 h (basal diet alone) to 52 h with the highest wheat bran supplementation. The prececal retention time was only 20 % of the total rate of passage through the alimentary tract.

Schlüsselwörter: Verdaulichkeit, Passagerate, Ballaststoffe, Weizenkleie, energetischer Nährwert

Key words: digestibility, rate of passage, dietary fiber, wheat bran, energy value

Einleitung

Alimentäre Faserstoffe haben in der Ernährungsphysiologie in den letzten Jahren reges Interesse gefunden. Während in der Tierernährung vor allem der energetische Futterwert für den Monogastriden diskutiert wird (12), stehen bei Labortieren und in der Humanernährung physiopathologische Wirkungen im Vordergrund der Untersuchungen (22, 13, 2). Ein wichtiger Vertreter der Ballaststoffe ist die Weizenkleie, deren Kohlenhydratfraktion zu etwa 70 % aus Nichtstärke-Polysacchariden besteht. Wegen dieses hohen Anteils an Faserstoffen ist die Kleie in der Ernährung von Monogastriden, wenn hohe Energiekonzentrationen erforderlich sind, nur in begrenztem Umfang verwendbar. Bei der menschlichen Ernährung ist den Darmfunktionen der Kleie große Bedeutung beizumessen, wobei neben Wasserbindung und Passageeffekten vor allem die Adsorption von Gallensäuren und im weiteren Sinn Beziehungen zu Arteriosklerose und Dickdarmkrebs zu nennen sind. Da somit die Zufuhr von Ballaststoffen physiologisch begründet ist, stellt sich aber auch die Frage des Energiebeitrages der Kleie im Rahmen der täglichen Energieaufnahme. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, im Modellversuch an Sauen energetische Parameter bei Zufuhr von Weizenkleie zu prüfen. Neben der Messung der präzökalen und postilealen Verdaulichkeit und der intestinalen Passagerate sollte vor allem die Höhe der Energieretention ermittelt werden. Durch gestaffelte Zulagen sollte dabei auch der Kurvenverlauf der Reaktion erfaßt werden.

Material und Methoden

Für den Versuch standen vier adulte Sauen zur Verfügung, von denen drei mit einer Zäkumkanüle versehen waren. Die Tiere wogen zu Versuchsbeginn im Durchschnitt 182 ± 20 kg.

Als Grundfutter erhielten die Sauen eine aus 66,8 % Gerste, 18,5 % Weizenkleie, 12,2 % Sojaextraktionsschrot und 2,5 % Mineralstoff-Vitamin-Mischung bestehende Ration, die in einer täglichen Menge von 36 g Frischsubstanz/kg $LM^{0,75}$ (584 kJ/kg $LM^{0,75}$) gefüttert wurde. Jedes Tier erhielt im Verlaufe des Versuchs 4 Zulagen an Weizenkleie (7, 14, 21 bzw. 28 g/kg $LM^{0,75}$; 16,6 kJ/g). Die Kleiezulage war bei zwei Tieren zeitlich in steigender Folge, bei den anderen beiden Tieren in fallender Folge angeordnet. Zulagen und Grundfutter wurden jeweils als gemeinsame Mischung hergestellt und in dickbreiiger Form täglich zweimal verabreicht. Alle Rationen wurden vollständig aufgenommen, so daß keine Verzehrskorrekturen erforderlich waren.

Jede Stoffwechselperiode umfaßte eine Zeitdauer von zwei Wochen und war in folgende Teilabschnitte gegliedert: 1.–4. Tag Anpassung an die Zulagestufe, 5.–7.

Tag Kotsammlung zur Messung der intestinalen Passagerate, 8.–12. Tag Kot- und Harnsammlung (mit Dauerkatheter) zur Bilanzmessung sowie Entnahme von Frischkot zur Bestimmung der kurzkettigen Fettsäuren, 13.–14. Tag Messung des Gaswechsels (O_2 , CO_2 , CH_4) in der Respirationskammer.

Zur Ermittlung der präzäkalen und postilealen Verdaulichkeit wurden dem Futter 0,3 % Cr_2O_3 zugemischt und die Konzentration dieses Indikators im Zäkumsaft bestimmt. Die Entnahme des Zäkumsafts bei den drei kanülierten Sauen erfolgte an vier hintereinander folgenden Tagen während der Sammelperiode (8.–11. Tag). Im 4-Stunden-Rhythmus wurden täglich, jeweils um eine Stunde versetzt, Proben von je 75 g gezogen und sofort in einer Sammelflasche tiefgefroren aufbewahrt. Über die 4 Tage stand somit ein Stundenraster von 7 bis 22 Uhr in Form einer Mischprobe zur Verfügung. Die aus dem Zäkum entnommene Chymusmenge wurde bei der Verdaulichkeits- und Bilanzberechnung (C, N, Energie) berücksichtigt.

Zur Messung der Passagerate wurden jedem Tier als Marker 100 rote Kunststoffpellets peroral und 100 blaue Pellets (Polyäthylen; 3 mm Durchmesser, 4 mm lang) über die Zäkumkanüle einmalig am 4. Tag der jeweiligen Versuchsperiode appliziert.

Die Ausscheidung des Markers wurde bis zur vollständigen Wiederauffindung verfolgt. Als Maß für die intestinale Passagerate wurde die mittlere Retentionszeit des Markers (t) in Stunden nach der von Warner (24) angegebenen Formel berechnet: $t = \sum m_i t_i / \sum m_i$. Hierbei bedeuten m_i die Menge des Markers, ausgeschieden in der i -ten Defäkation und t_i die Zeit der i -ten Defäkation nach der Marker verabreichung.

Die Berechnung der Energieretention (RE) erfolgte nach der Kohlenstoff-Stickstoff-Bilanzmethode sowie nach der RQ-Methode (3) mit den erhaltenen Meßdaten der Sammel- und Gaswechselperioden. Die Gehalte an Energie, Kohlenstoff und Stickstoff im Futter, Kot und Harn wurden mit Hilfe eines adiabatischen Bombenkalorimeters, eines Wösthoff-C-Analysators und eines Kjehl-Foss-Automatic-Gerätes bestimmt. Auf eine Korrektur der RE im Hinblick auf geringfügige Veränderungen der Lebendmasse und damit des energetischen Erhaltungsbedarfs während des Versuchs wurde verzichtet, da sich eventuelle Effekte aufgrund der gegenläufigen Anordnung der Zulagen insgesamt ausgleichen.

Die kurzkettigen Fettsäuren im Kot wurden gaschromatographisch nach Ranfft (20), Cr_2O_3 in Anlehnung der von Petry und Rapp (19) beschriebenen Methode analysiert.

Die Versuchsdaten wurden regressionsanalytisch ausgewertet. Mittelwertvergleiche wurden mit Hilfe des Tukey-Tests durchgeführt (5%-Niveau).

V Versuchsergebnisse

Die verabreichte Grundration wies eine Verdaulichkeit der Energie von 83 % und eine Umsetzbarkeit der Energie von 78 % auf. Die Energieretention betrug in der Grundperiode durchschnittlich $37 \text{ kJ/kg LM}^{0,75}$, was einem Niveau des Energieumsatzes von etwa 10 % über dem Erhaltungsgleichgewicht entsprach.

In Abbildung 1 sind die mittleren Energieverluste im Kot und Harn sowie die verdauliche (DE) und umsetzbare Energie (ME) in Abhängigkeit der Zulage an Weizenkleie dargestellt. Während die Verluste an Harnenergie streng linear anwuchsen, deutet der Kurvenverlauf für Kotenergie, DE und ME auf eine leichte Krümmung hin. In der regressionsanalytischen Auswertung der Daten ließ sich diese Krümmung mit Hilfe kurvilinearere Funktionsansätze nicht deutlich aufzeigen. In Tabelle 1 sind deshalb die

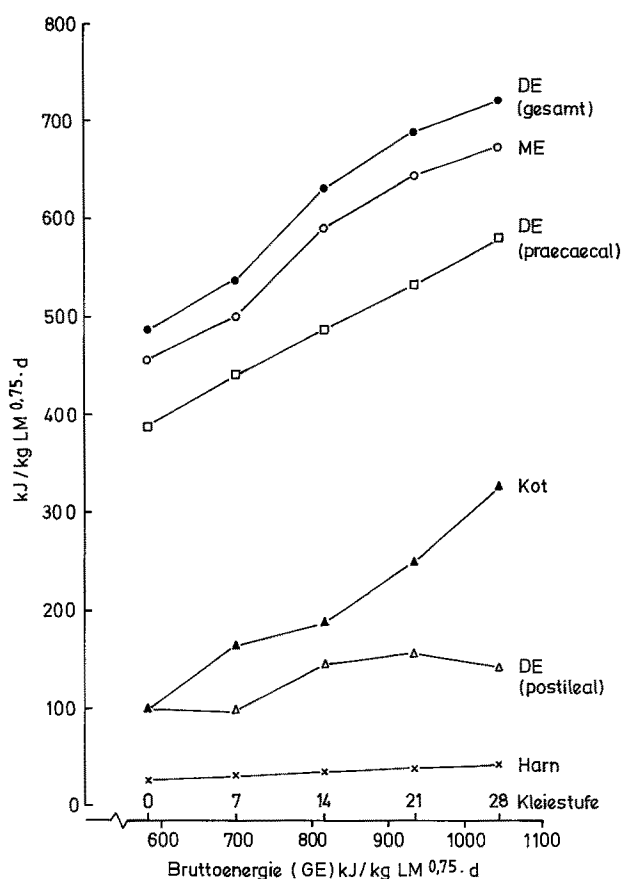


Abb. 1. Verlauf der Energieausscheidung in Kot und Harn sowie der verdaulichen und umsetzbaren Energie bei Zulage von 0 bis 28 g Weizenkleie/kg LM^{0.75} und Tag.

Tab. 1. Lineare Regressionsgleichungen zu den Energieverlusten (Kot, Harn, CH₄) sowie der verdaulichen und umsetzbaren Energie in Abhängigkeit der Zufuhr an Bruttoenergie (kJ/kg LM^{0.75} · d).

Y	b ₀ ± s _{b0}	b ± s _b	R ²	s _{y · x}	F-Test PR > F
Kleiestufen 0 bis 28					
Kotenergie	-170,0 ± 28,2	0,457 ± 0,034	0,912	23,8	< 0,01
DE	170,0 ± 28,2	0,543 ± 0,034	0,936	23,8	< 0,01
Harnenergie	6,3 ± 4,0	0,034 ± 0,005	0,740	3,3	< 0,01
CH ₄	7,2 ± 2,0	-0,001 ± 0,002	0,011	1,7	0,67
ME	156,5 ± 27,4	0,510 ± 0,033	0,932	23,2	< 0,01
Kleiestufen 0 bis 21					
DE	132,8 ± 28,5	0,596 ± 0,037	0,949	19,3	< 0,01
DE-präzäkal	148,1 ± 24,2	0,413 ± 0,031	0,925	16,4	< 0,01
ME	117,8 ± 28,3	0,566 ± 0,037	0,944	19,2	< 0,01

entsprechenden linearen Regressionen zusammengestellt. Danach betrug die Verdaulichkeit der Kleieenergie 54,3 % und die Umsetzbarkeit der Energie 51,0 %. Beide Parameter fallen etwas höher aus, wenn bei der Auswertung die höchste Kleiestufe (28 g) weggelassen wurde. Auch die Auftrennung der verdaulichen Energie in den präzäkalen und postilealen Anteil spricht für eine gewisse Nichtlinearität im Hinblick auf die Gesamtration (Abb. 1). Während im präzäkalen Bereich eine strenge Linearität in Abhängigkeit der GE-Zufuhr festzustellen ist, zeigt die postileale Verdauung der Energie eher einen plateauartigen Charakter. Dies geht auch aus Abbildung 2 hervor, in der die Verdauungsquotienten der Energie für die einzelnen Kleiestufen dargestellt sind. Die Verdaulichkeit der Energie der Gesamtration und die präzäkale Verdaulichkeit fallen mit steigender Kleiezufuhr von 83,2 % auf 68,9 % bzw. von 66,3 % auf 55,5 % ab. Der Verdauungsquotient der postilealen Energie ist dagegen weitgehend konstant. Er beträgt im Mittel $15,8 \pm 3,3$ %. Aus diesen Werten sowie den Angaben in Tabelle 1 ergibt sich ein postilealer Anteil der verdaulichen Energie von etwa 30 %. Bezüglich des Methans konnte keine Abhängigkeit zur Kleiestufe festgestellt werden. Im Mittel aller Rationen betrug die Methanproduktion $6,3 \pm 1,7$ kJ/kg LM^{0,75}.

Die Verwertung der Energie für den Energieansatz ist in Abbildung 3 und Tabelle 2 aufgezeigt. Der Zusammenhang zwischen Energieretention und ME aus Kleie ist im Rahmen der Meßgenauigkeit als linear anzusehen. Die energetische Effizienz der umsetzbaren Energie berechnete sich auf 66,2 %. Die verdauliche Energie wurde zu 62,0 % für den Energieansatz verwertet. Dabei erwies sich die Ausnutzung der Energie für den postileal-

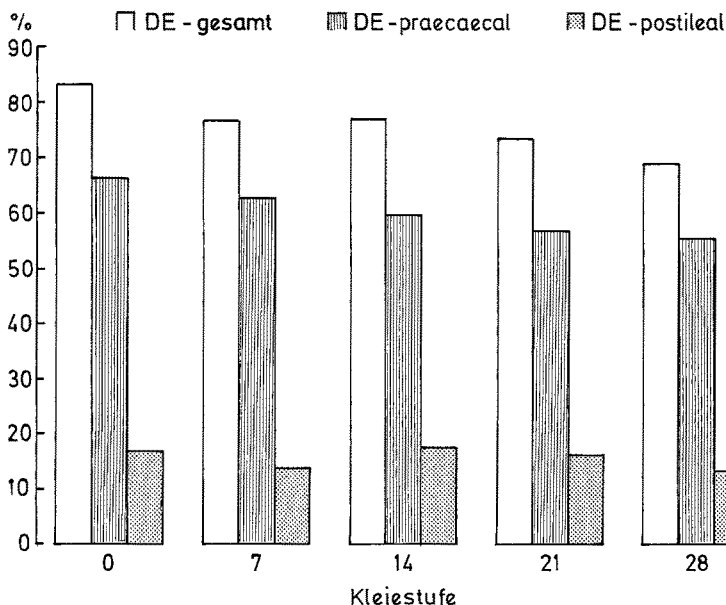


Abb. 2. Totale, präzäkale und postileale Verdaulichkeit der Futterenergie in den einzelnen Kleiestufen.

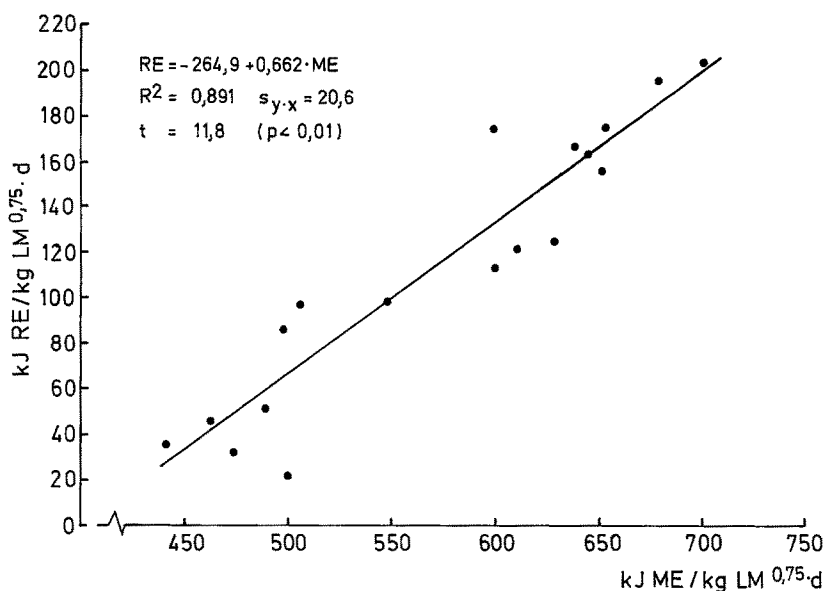


Abb. 3. Energetische Verwertung der ME aus Kleie für den Energieansatz.

len Anteil um etwa ein Viertel niedriger im Vergleich zur Verwertung der präzäkalen verdaulichen Energie.

Tabelle 3 enthält Regressionsgleichungen zur N-Bilanz bei Zulage der Weizenkleie. Das zu 62 % verdaute Rohprotein der Kleie wurde zum großen Teil über den Harn ausgeschieden. Die N-Retention stieg tendenziell an, der Ausnutzungsquotient von 18 % weist jedoch einen hohen relativen Fehler von 50 % auf.

Die Auswirkung der Kleiezulage auf die flüchtigen Fettsäuren im Kot ist in Tabelle 4 zusammengestellt. Es ergaben sich zum Teil signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen. Eine streng gerichtete Veränderung der Fettsäurenwerte mit steigender Kleiezufuhr ist jedoch in den meisten Fällen nicht gegeben. Lediglich die tägliche Gesamtausscheidung als Anteil der Kotenergie zeigt für Essigsäure und Propionsäure einen Rückgang mit der Kleiezulage. Da beide Säuren mengenmäßig dominieren, fiel die Summe der Ausscheidung aller Säuren von Kleiestufe 0 auf Stufe 28 von 2,3 % auf 1,3 % der Kotenergie zurück.

Tab. 2. Verwertung der verdaulichen Energie (DE) für den Energieansatz (RE) (kJ/kg LM^{0,75} · d).

$$RE = -265,4 + 0,620 DE$$

$$R^2 = 0,879 \quad s_{y \cdot x} = 21,7 \quad t = 11,1 \quad (p < 0,01)$$

$$RE = -275,2 + 0,668 DE_1 + 0,514 DE_2$$

$$R^2 = 0,879 \quad s_{y \cdot x} = 22,4$$

$$t_{b1} = 7,58 \quad (p < 0,01) \quad t_{b2} = 2,83 \quad (p < 0,05)$$

DE₁ = präzäkalere DE, DE₂ = postileale DE

Tab. 3. Regression von N-Bilanzkomponenten auf die N-Aufnahme (mg N/kg LM^{0,75} · d).

Y	b ₀ ± s _{b0}	b ± s _b	R ²	s _{y · x}	F-Test PR > F
Kot-N	-264,5 ± 103,9	0,383 ± 0,075	0,605	80,2	< 0,01
N-verdaut	264,5 ± 103,9	0,617 ± 0,075	0,799	80,2	< 0,01
Harn-N	353,2 ± 109,8	0,431 ± 0,079	0,635	84,7	< 0,01
N-Retention	- 88,7 ± 131,5	0,185 ± 0,095	0,182	101,5	0,07

Tab. 4. Konzentration und Ausscheidung kurzkettiger Fettsäuren¹⁾ im Kot.

	Kleiestufe					± s ²⁾	F-Test PR > F
	0	7	14	21	28		
mmol/100 g Kot-Trockenmasse							
C ₂	21,6 ^a	22,0 ^a	12,8 ^b	11,6 ^b	9,5 ^b	3,4	< 0,01
C ₃	8,1 ^{ab}	10,7 ^a	6,4 ^b	5,9 ^b	4,6 ^b	1,8	< 0,01
C _{4i}	0,5 ^{ab}	0,7 ^a	0,6 ^{ab}	0,4 ^b	0,4 ^b	0,1	< 0,01
C _{4n}	1,3 ^{ab}	2,0 ^a	1,4 ^{ab}	1,0 ^b	0,9 ^b	0,4	0,03
C _{5i}	0,7	0,6	0,7	0,5	0,5	0,2	> 0,2
C _{5n}	0,9	1,0	1,0	0,8	1,2	0,3	> 0,2
Fettsäurenmuster, mol-%							
C ₂	65,5 ^a	59,3 ^{ab}	56,5 ^b	57,5 ^b	54,5 ^b	3,0	< 0,01
C ₃	24,4	29,0	27,3	29,5	26,6	2,8	0,13
C _{4i}	1,6	2,0	2,5	2,0	2,6	0,5	0,06
C _{4n}	3,9	5,4	5,9	4,8	5,7	1,3	> 0,2
C _{5i}	2,0	1,7	3,1	2,2	3,2	0,8	0,09
C _{5n}	2,6 ^b	2,7 ^b	4,7 ^b	4,1 ^b	7,4 ^a	1,1	< 0,01
Gesamtausscheidung, mmol/d							
C ₂	67,3	104,8	64,5	79,8	81,4	20,7	0,10
C ₃	25,2 ^b	50,1 ^a	31,7 ^a	40,6 ^{ab}	39,6 ^{ab}	9,7	0,02
C _{4i}	1,6 ^b	3,4 ^a	2,9 ^{ab}	2,7 ^{ab}	3,7 ^a	0,7	< 0,01
C _{4n}	3,9 ^b	9,3 ^a	6,8 ^{ab}	6,7 ^{ab}	8,1 ^{ab}	2,2	0,04
C _{5i}	2,0	2,9	3,4	3,1	4,6	1,8	0,09
C _{5n}	2,7 ^b	4,8 ^b	5,2 ^b	5,7 ^b	10,6 ^a	1,9	< 0,01
Ausscheidung in % der Kotenergie							
C ₂	1,09 ^a	1,13 ^a	0,62 ^b	0,57 ^b	0,46 ^b	0,17	< 0,01
C ₃	0,72 ^{ab}	0,95 ^a	0,54 ^{bc}	0,51 ^{bc}	0,39 ^c	0,15	< 0,01
C _{4i}	0,07 ^{ab}	0,09 ^a	0,07 ^{ab}	0,05 ^b	0,05 ^b	0,01	< 0,01
C _{4n}	0,16 ^{ab}	0,26 ^a	0,16 ^{ab}	0,12 ^b	0,11 ^b	0,06	0,02
C _{5i}	0,11	0,10	0,11	0,07	0,08	0,03	> 0,2
C _{5n}	0,14	0,17	0,16	0,13	0,19	0,04	> 0,2

¹⁾ Essigsäure, Propionsäure, iso- und n-Buttersäure, iso- und n-Valeriansäure²⁾ gepoolte Standardabweichung innerhalb der Behandlungen

Tab. 5. Mittlere Retentionszeit des Markers im Verdauungstrakt (h).

Verdauungs- trakt	Kleiestufe					$\pm s$	F-Test PR>F
	0	7	14	21	28		
gesamt	77,7	78,7	68,9	58,5	51,6	10,2	<0,05
präzäkal	15,0	15,6	19,1	9,7	12,5	9,9	0,83
postileal	62,7	63,1	49,8	48,8	39,1	12,7	0,13

Die gemessenen Parameter der Energieausnutzung sind in engem Zusammenhang mit dem Einfluß der Kleie auf die intestinale Passagerate zu sehen. Aus Tabelle 5 geht hervor, daß mit zunehmender Kleieaufnahme die mittlere Retentionszeit des Markers, die gleichzusetzen ist mit der durchschnittlichen Aufenthaltsdauer der Futterpartikel, erheblich abnahm. Für den gesamten Verdauungstrakt betrug die mittlere Retentionszeit für alle Kleiestufen 67,1 h. Gegenüber der Kleiestufe 0 mit 77,7 h verkürzte sich diese Aufenthaltsdauer auf 51,6 h in der Stufe 28. Dabei ist sehr wesentlich, daß die Kleiefütterung die präzäkale Passagerate nicht beeinflusste. Im Mittel aller Kleiestufen dauerte die präzäkale Retentionszeit des Markers 14,4 h und betrug damit nur ein Fünftel der gesamten Passagezeit, während vier Fünftel (im Mittel 52,7 h) auf das Dickdarmsystem entfielen. In diesem postilealen Abschnitt ging die mittlere Retentionszeit des Markers von über 60 h in der Kleiestufe 0 auf weniger als 40 h in der Stufe 28 zurück.

Diskussion

Nach den vorliegenden Ergebnissen wird Weizenkleie von Sauen in einem weiten Bereich linear verdaut. Rechnet man die in der Grundration enthaltene Menge an Weizenkleie hinzu, so entspricht die in diesem Bereich (bis Kleiestufe 21 g) maximal aufgenommene Kleiemenge im Mittel der Versuchstiere 1370 g/d. Die ermittelte Verdaulichkeit der Energie von 59,6 % stimmt gut mit dem in Tabellenwerken (5) verzeichneten Verdauungsquotienten der organischen Substanz von 64 % überein. Bei der höchsten Kleiestufe (28 g), die einer totalen Aufnahme von 1700 g Kleie/d entsprach, deutete sich jedoch ein kurvilinearere Verlauf der verdaulichen Energie an. Die Begrenzung im Verdauungsvermögen lag dabei in der Fermentation im Dickdarm. Offensichtlich wurde die positive Wirkung einer höheren Kleiemenge auf den Ertrag an Fermentationsenergie durch den negativen Effekt einer kürzeren Verweildauer gerade ausgeglichen, so daß der Anteil an fermentierter Energie nicht mehr weiter anstieg. Für die praktische Fütterung dürfte diese Abweichung von der Linearität ohne Bedeutung sein, da die Mengenbegrenzung an Kleie vorrangig durch die Energiekonzentration der Gesamtration bestimmt wird und Kleien wegen ihrer relativ niedrigen Verdaulichkeit deshalb nur in begrenztem Umfang (15–25 %) in der Schweinefütterung eingesetzt werden können. Auch für die Ernährung der Menschen darf man annehmen, daß die verhältnismäßig geringe tägliche Kleieaufnahme auch unter

Berücksichtigung der Unterschiede der Darmvolumina zwischen Sauen und Menschen noch in den linearen Bereich der Verdauung fällt.

Die Messungen der Retentionszeit des verabreichten Markers verdeutlichen die positive Wirkung der Weizenkleie auf die intestinale Passage-rate. Die gemessene schnellere Passagerate beim Schwein wird zunächst durch die erhöhte Futtermenge bedingt (4, 21), aber auch durch den Fasereffekt der Kleie, der über eine verstärkte Wasserbindung das Volumen des Darminhalts erhöht, wodurch die motorische Aktivität ansteigt (6) und die Ausscheidungsgeschwindigkeit der Futterpartikel zunimmt. Daß hierbei, wie vorliegende Untersuchungen aufzeigen, im wesentlichen nur das Dickdarmsystem betroffen ist, hängt vor allem mit der langen Verweildauer der Futterpartikel in diesem Darmabschnitt zusammen. Beispielhaft wurde hierzu in Abbildung 4 der Ausscheidungsverlauf des Markers in den Fäzes bei intrazäkaler Verabreichung für die Kleiestufen von 0, 14 und 28 g dargestellt. Während der Beginn der Markerausscheidung mit 20 bis 30 h zwischen den Stufen wenig differierte, war das Ende der Ausscheidung bei Kleiestufe 0 erst nach 115 h, bei der Stufe 28 aber bereits nach 55 h erreicht. Gerade bei relativ gut fermentierbaren Faserquellen dürfte eine aufgrund der Fasermenge erhöhte Passagerate den limitierenden Faktor für den mikrobiellen Abbau im Dickdarm darstellen, wie auch die Ergebnisse von Kass et al. (10) zeigen. Bei einer Kleieaufnahme von insgesamt $35 \text{ g/kg LM}^{0,75} \cdot \text{d}$ in der Stufe 28 scheint die Begrenzung im Verdauungsvermögen im Dickdarmabschnitt bereits überschritten worden zu sein.

Bei der Methanproduktion konnte kein Einfluß der Kleiezulage beobachtet werden. Dies deckt sich nicht mit Resultaten aus früheren Versuchen, in denen nach oraler Zufuhr von Pektin oder Cellulose wie auch nach intrazäkaler Infusion dieser Stoffe bis über 10 % der fermentierten

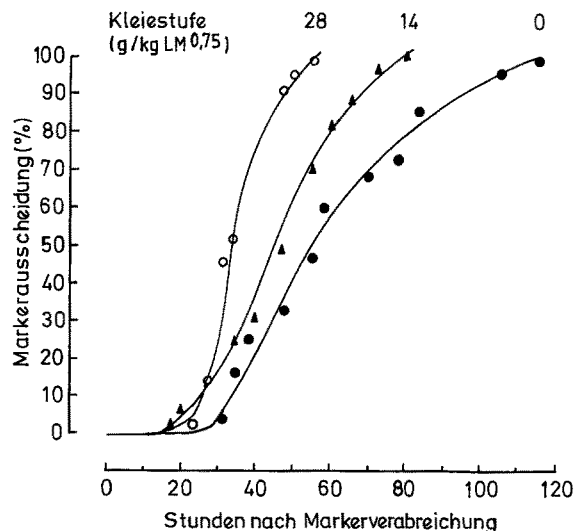


Abb. 4. Fäkale Ausscheidungskurven des intrazäkal verabreichten Markers.

Energie in Form von Methan ausgeschieden wurden (15, 16, 11). Allerdings war bei Infusion von Casein keine Erhöhung von CH_4 festzustellen, obwohl das infundierte Casein im Dickdarm fast vollständig abgebaut wurde (11). Möglicherweise besteht mit dem vorliegenden Versuch hierzu insofern eine Parallele, als das mit steigender Kleiezufuhr vorhandene Überangebot an Eiweiß in Dickdarm auf die Methanbildung Einfluß nahm.

Die Ausscheidung von Harnenergie stieg bis zur höchsten Kleiestufe linear an. Da der größte Teil des verdaulichen Stickstoffs im Harn ausgeschieden wurde ($0,431/0,617 = 70\%$), dürfte der renale Energieanstieg in erster Linie mit dieser N-Elimination zusammenhängen. Für diese Erklärung spricht auch, daß der Anteil von Harnenergie pro Gramm Harn-N bei allen Rationen in etwa gleich groß war (33–38 kJ/g) und die als Harnstoff berechnete N-Ausscheidung zwei Drittel der Harnenergie lieferte.

Der geringere energetische Wert der Weizenkleie im Vergleich zum Vollgetreide ist zunächst durch die wesentlich schlechtere Verdaulichkeit der Kleie bedingt. Aber auch die Verwertung der verdaulichen bzw. umsetzbaren Energie ist gegenüber dem Vollgetreide deutlich erniedrigt. Die ermittelten Verwertungskoeffizienten von 62,0 bzw. 66,2 % liegen um etwa 10 Prozentpunkte tiefer als entsprechende Zahlen von Körnern verschiedener Getreidearten (18). Im Vergleich zu einem älteren Experiment über die energetische Verwertung der Kleien durch Schweine (9) liegen die vorliegenden Werte um 4 Prozentpunkte niedriger. Die Aufteilung der verdaulichen Energie in eine präzäkale und postileale Komponente hatte ergeben, daß ein Viertel und mehr der DE über die Fermentation im Dickdarm bereitgestellt wurde. Aus einer Reihe von Untersuchungen ist bekannt, daß diese Energiekomponente vom Schwein schlechter verwertet wird als Produkte der Verdauung im Dünndarm (12). Der gefundene partielle Verwertungskoeffizient der postilealen DE für den Energieansatz von 51 % entspricht dieser Erwartung. Der energetische Futterwert von Weizenkleie als umsetzbare Energie, die auf bakteriell fermentierte Substanzen (BFS) korrigiert ist (8), errechnet sich aus den experimentellen Werten des Versuchs wie folgt: Zunächst erhält man aus der Bruttoenergie von Kleie (16,6 kJ/g) und der Umsetzbarkeit der Energie (56,6 %) 9,40 kJ ME/g. Unter Berücksichtigung von 30 % ($[0,596-0,413]/0,596$; Tab. 1) postilealer Energie und 23 % ($[0,668-0,514]/0,668$; Tab. 2) schlechterer Verwertung dieses Energieanteils ergibt sich eine Korrektur von -0,65 kJ/g, so daß sich die BFS-korrigierte ME auf 8,75 kJ/g beläuft. Umgerechnet auf Kleie-Trockenmasse ergeben sich somit 10,1 kJ/g.

Für die menschliche Ernährung ist vor allem eine Abschätzung des Energiewertes der Ballaststoffe von Interesse. Diese wird in den Nährwerttabellen des Menschen (23, 25) bislang nicht berücksichtigt. Obwohl zwischen beiden Spezies Unterschiede in der Kapazität des Darmvolumens und der Passagerate bestehen, erscheinen infolge der als verhältnismäßig gering anzusetzenden Aufnahme an Ballaststoffen beim Menschen die vorliegenden Ergebnisse für die Energiebewertung extrapolierbar. Aus der festgestellten postilealen Verdaulichkeit von 18 % (59,6–41,3; Tab. 1) ergibt sich eine Fermentationsenergie von $16,6 \text{ kJ/g} \cdot 0,18 = 3 \text{ kJ/g}$ Kleie. Bei einem Gehalt von 40–45 % Nichtstärke-Polysacchariden in Weizenkleie folgt daraus, auf Ballaststoffe bezogen, ein Wert von 7 kJ/g.

Unter Berücksichtigung eines schlechteren Energieansatzes der fermentierten Energie von 23 % im Vergleich zur präzākalen Energie ergeben sich schließlich rund 5 kJ umsetzbare Energie pro g Ballaststoff, die der umsetzbaren Energie aus intestinaler Verdauung der Nährstoffe äquivalent sind.

Bei sehr gut fermentierbaren Ballaststoffen wie z. B. Pektinen muß im Vergleich zu den Kleiefaserstoffen mit einem höheren Energiebetrag aus der Dickdarmverdauung gerechnet werden. In Modellversuchen am Schwein zeigte sich, daß die Resorptionskapazität des Dickdarms für kurzkettige Fettsäuren als Endprodukte des fermentativen Abbaus sehr hoch ist (1, 11). Weiterhin sind kaum Unterschiede bei der intermediären Verwertung der Fermentationsendprodukte in Abhängigkeit der molaren Zusammensetzung des anfallenden Fettsäurengemisches zu erwarten (11, 7, 17). Insofern kann die Energiezufuhr über Faserstoffe proportional ihrer mikrobiellen Abbaubarkeit im Dickdarm angesetzt werden.

Die mit der Fermentation zusätzlich verbundenen Energieverluste (CH_4 , H_2 , Fermentationswärme, geringerer intermediärer Wirkungsgrad) im Vergleich zur Energieausnutzung der im Dünndarm verdauten und resorbierten Kohlenhydrate können – in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung – für Cellulose, Hemicellulose und Pektine ballaststoffunspezifisch auf etwa ein Viertel der fermentierten Energie veranschlagt werden (12). Bei der mikrobiellen Abbaubarkeit im Dickdarm liegen dagegen erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Ballaststoffarten vor. Unterstellt man für die Fermentationsrate eine Spannweite von 30–90 % sowie 17 kJ Bruttoenergie/g, so erhält man einschließlich der Korrektur auf die genannten zusätzlichen Energieverluste bei der Fermentation im Dickdarm einen verwertbaren Energiebetrag von 4 bis 11 kJ/g Ballaststoff. Bei einer mittleren Abbaubarkeit von 50–60 % kann somit der Anteil an umsetzbarer Energie pauschal mit einem Drittel der Bruttoenergie eingesetzt werden. Zur Abschätzung der über Ballaststoffe täglich zugeführten Energie dürfte dieses Vorgehen ausreichend sein.

Für eine exakte Energiebewertung im Sinne einer umsetzbaren Energie des einzelnen Lebensmittels müßte allerdings die Fermentationsrate der verschiedenen Ballaststoffe differenziert betrachtet werden. Unter Verwendung der von Leitzmann (14) angegebenen Daten zum Abbau von Ballaststoffen beim Menschen errechnen sich die in Tabelle 6 aufgezeigten Gehalte an umsetzbarer Energie. Danach liefern Hemicellulosen und Pektine etwa die doppelte Menge an Energie wie die Cellulose. Der

Tab. 6. Umsetzbare Energie von Ballaststoffen.

Ballaststoff	Bruttoenergie kJ/g	Abbau ¹⁾ %	umsetzbare Energie kJ/g
Cellulose	17	40 (30–50)	5 (4–6)
Hemicellulosen	17	75 (60–90)	9 (7–11)
Pektine	15	95 (90–100)	10,5 (10–11)

¹⁾ nach Leitzmann (14)

Streibereich ist allerdings beträchtlich. Demzufolge ist eine Berücksichtigung der Energie aus Ballaststoffen in Nährwerttabellen erst dann sinnvoll, wenn von den einzelnen Lebensmitteln genügend Daten über Gehalt, Zusammensetzung und Verdaulichkeit der Ballaststoffe vorliegen.

Literatur

1. Argenzio RA, Southworth M (1975) Sites of organic acid production and absorption in gastrointestinal tract of the pig. *Am J Physiol* 228:454–460
2. Bingham SA (1990) Mechanisms and experimental and epidemiological evidence relating dietary fibre (non-starch polysaccharides) and starch to protection against large bowel cancer. *Proc Nutr Soc* 49:153–171
3. Brouwer E (1965). Report of Sub-committee of constants and factors. In: *Proc 3rd Symp on Energy Metabolism*. EAAP-Publ No 11, 235–251. Oriel Press, Newcastle upon Tyne
4. Castle EJ, Castle ME (1956) The rate of passage of food through the alimentary tract of pigs. *J Agric Sci* 47:196–203
5. DLG (1984) DLG-Futterwerttabellen für Schweine. 5. Aufl, DLG-Verlag, Frankfurt am Main
6. Fioramonti J, Bueno L (1980) Motor activity in the large intestine of the pig related to dietary fibre and retention time. *Brit J Nutr* 43:155–162
7. Gädeken D, Breves G, Oslage HJ (1989) Efficiency of energy utilization of intracaecally infused volatile fatty acids in pigs. *Proc 11th Symp on Energy Metabolism*, EAAP-Publ No 43:115–118, Pudoc, Wageningen
8. Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (1987) Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere, Nr 4, Schweine. DLG-Verlag, Frankfurt am Main
9. Jentsch W, Hoffmann L, Schiemann R (1968) Die energetische Verwertung der Kleien durch Schweine. *Arch Tierernährg* 18:344–351
10. Kass ML, van Soest PJ, Pond GW, Lewis B, McDowell RE (1980) Utilization of dietary fiber from alfalfa by growing swine. I. Apparent digestibility of diet components in specific segments of the gastrointestinal tract. *J Animal Sci* 50:175–191
11. Kirchgeßner M, Müller HL, Roth FX, Ascherl R, Erhardt W (1987) Intracaecal infundierte Kohlenhydrate sowie Casein und ihr Einfluß auf die Energie- und N-Bilanz von Sauen. *J Anim Physiol a Anim Nutr* 58:241–253
12. Kirchgeßner M, Müller HL (1991) Energy utilization via hindgut fermentation in pigs. *Adv Animal Physiol Animal Nutr* No 22:41–49. Paul Parey, Hamburg Berlin
13. Kritchevsky D (1988) Dietary fiber. *Ann Rev Nutr* 8:301–328
14. Leitzmann C (1990) Ballaststoffe: Funktionen, Zufuhrempfehlungen und ihre Umsetzung in Lebensmittel. Schriftenreihe FB 19, Heft 1, 27–44. Ernährungs- und Haushaltswissenschaften, Justus-Liebig-Universität Gießen
15. Müller HL, Kirchgeßner M (1983) Energetische Verwertung von Cellulose beim Schwein. *Z Tierphysiol, Tierernährg u Futtermittelkde* 49:127–133
16. Müller HL, Kirchgeßner M (1985) Energetische Verwertung von Pektin bei Sauen. *Z Tierphysiol, Tierernährg u Futtermittelkde* 54:14–20
17. Müller HL, Kirchgeßner M, Roth FX (1991) Energetische Effizienz eines intracaecal infundierten Essigsäure-Propionsäuregemisches bei Sauen. *Anim Physiol a Anim Nutr* 65: im Druck
18. Nehring K, Hoffmann L, Schiemann R (1963) Die energetische Verwertung der Kraftfutterstoffe durch Schweine. *Arch Tierernährg* 13:147–161
19. Petry H, Rapp W (1970/71) Zur Problematik der Chromoxidbestimmung in Verdauungsversuchen. *Z Tierphysiol, Tierernährg u Futtermittelkde* 27:181–189

20. Ranfft K (1973) Gaschromatographische Bestimmung kurzkettiger, flüchtiger Fettsäuren im Pansensaft. *Arch Tierernährg* 23:343–352
21. Roth FX, Kirchgeßner M (1985) Verdaulichkeit und intestinale Passagerate beim Schwein in Abhängigkeit vom Fütterungsniveau und Rohfasergehalt des Futters. *Tierphysiol, Tierernährg u Futtermittelkde* 53:254–264
22. Smith U (1987) Dietary fibre, diabetes and obesity. *Intern J Obesity* 11 (Suppl 1): 27–31
23. Souci SW, Fachmann W, Kraut H (1989/90) Die Zusammensetzung der Lebensmittel. Wiss Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart
24. Warner ACJ (1981) Rate of passage of digesta through the gut of mammals and birds. *Nutr Abstr & Rev (B)* 51:789–820
25. Wirths W (1989) Kleine Nährwerttabelle. Umschau Verlag, Frankfurt/M

Eingegangen 12. Januar 1991

Für die Verfasser:

Prof. Dr. M. Kirchgeßner, Institut für Ernährungsphysiologie, Technische Universität München, 8050 Freising-Weihenstephan