

H. Müller
M. Kirchgeßner

Regulation von Energiebilanz und Körpergewicht bei isoenergetischer Kohlenhydrat- oder Fettzufuhr im langfristigen Versuch mit Sauen

Regulation of energy balance and bodyweight during long-term isoenergetic supply of a carbohydrate and fat diet in sows

Zusammenfassung In einem Gesamtstoffwechselversuch mit 14 adulten Sauen wurde die Auswirkung einer Kohlenhydrat- und Fettzehrung auf Wärmeproduktion und Energiebilanz über einen Zeitraum von 21 Wochen untersucht. Die allen Tieren gemeinsame Grundration auf der Basis Gerste/Sojaextraktionsschrot war auf 60 % des energetischen Erhaltungsbedarfes ausgerichtet. Die isoenergetischen Zulagen von Stärke (50 % Weizenstärke, 50 % Maisstärke) bzw. Fett (25 % Schweinefett, 25 % Sojaöl, 50 % Olivenöl) betrugen 173 kJ/kg W^{0.75}. Beide Rationen wurden nach der Anfangsmasse der Sauen eingestellt und über die gesamte Versuchsdauer in unveränderter Menge beibehalten. Die

Fütterung erfolgte zweimal täglich. Zur Bilanzfassung wurde im ersten und letzten Drittel des Versuchs eine 6-tägige quantitative Sammlung von Kot und Harn durchgeführt. Der Gaswechsel der Sauen wurde im Versuchsablauf fünfmal jeweils über 48 h in der Respirationsskammer gemessen. Die Wärmeproduktion und Energieretention der Tiere wurde nach der Kohlenstoff-Stickstoffbilanz-Methode sowie nach der RQ-Methode ermittelt. Bei allen Komponenten der Energiebilanz (Kotenergie, Harnenergie, umsetzbare Energie, Energieretention) ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Behandlungen. Die Wärmeproduktion belief sich bei Stärkekütterung auf 413 ± 31 und bei Fettfütterung auf 412 ± 36 kJ/kg W^{0.75}. Die wöchentlichen mittleren Tiergewichte von beiden Behandlungen zeigten im gesamten Zeitraum des Versuches einen dekongsgleichen Verlauf. Die Berechnung der Substratoxidation für die Futterration und den Organismus lieferte bei Kohlenhydratverabreichung übereinstimmende Werte, während sich bei Fettfütterung ein unrealistischer Wert für die Nährstoffbilanz ergab. Im Rahmen der Herleitung der Berechnungsformeln wird auf die Problematik von Nährstoffbilanzen hingewiesen. Aus den Ergebnissen ist insgesamt zu folgern, daß die Energiebilanz und Gewichtsentwicklung im Bereich

des Erhaltungsbedarfes vom Kohlenhydrat- und Fettgehalt der Ration unbeeinflußt sind.

Summary A respiration trial was conducted in 14 adult sows to investigate the energetic effects of a high carbohydrate and a high fat diet over a period of 21 weeks. The basal ration was mainly based on barley and soybean meal and covered 60 % of the maintenance requirement for energy. The addition of starch (50 % wheat starch, 50 % maize starch) or fats (25 % lard, 25 % soybean oil, 50 % olive oil) was 173 kJ/kg W^{0.75}. All rations were calculated with reference to the initial weight of the sows and remained constant throughout the experiment. The animals were fed twice daily. Feces and urine were collected during the first and last part of the experiment over six days each. Forty eight hour measurements of the gas exchange were recorded five times in the course of the trial. Energy balances were calculated using an indirect calorimetry technique (RQ method) as well as the carbon nitrogen balance technique.

All components of the energy balance (feces energy, urine energy, metabolizable energy, energy retention) showed no significant difference between the two treatments. The heat production of the animals was

Eingegangen: 23. März 1998
Akzeptiert: 28. April 1998

H. Müller · Prof. Dr. M. Kirchgeßner (✉)
Institut für Ernährungsphysiologie
der TU München
Hochfeldweg 4-6
D-85350 Freising-Weihenstephan

413 ± 31 with the starch diet and 412 ± 36 kJ/kg W^{0.75} when the fat diet was fed. The mean weekly body weights of both treatment groups coincided in all phases of the experiment. Calculation of nutrient oxidation performed for diets and for animal metabolism revealed that only the carbohydrate balance was achieved, whereas the

fat balance showed unrealistic results. The sensitivity of the nutrient balance method to measurement errors of the gas exchange has been discussed. The current results indicate that an equal supply of starch or fat energy acts identically in the long-term on body weight regulation and energy balance

when overfeeding is not present.

Schlüsselwörter Kohlenhydrate – Fett – Thermogenese – Energie-retention – Substratoxidation

Key words Carbohydrate – fat – thermogenesis – energy retention – nutrient oxidation

Einleitung

In der Regulation der Energiebilanz wird neuerdings den Bilanzen der verschiedenen Nährstoffe eine wesentliche Bedeutung zugeschrieben. Die Zusammensetzung der Nahrung bestimmt letztlich das Substratgemisch, das im Stoffwechsel oxidiert oder im Körper für Speicherzwecke zur Verfügung steht. Dabei scheinen die Bilanzen von Kohlenhydraten und Protein genau ausgeglichen zu werden, nicht aber die Fettbilanz, wobei dem Ausmaß der Fettsäureoxidation eine Schlüsselfunktion bei der Regulation der Energiebilanz zugemessen wird (4, 5, 9). Übermäßige Aufnahme von Kohlenhydraten stimuliert deren Oxidation, während Fettaufnahme die Oxidation von Fettsäuren wie auch von anderen Nährstoffen nicht anregt (6, 15). Das Ausmaß der Fettsäureoxidation hängt vielmehr hauptsächlich vom aktuellen Energiebedarf ab (9). Andererseits hat das Verhältnis von Kohlenhydraten zu Fett in der Nahrung auch einen wesentlichen Einfluß auf die Energieaufnahme bei ad lib. Vorlage (16, 17), so daß die Wirkung der Nahrungskomposition auf energetische Imbalancen hinsichtlich der Mechanismen differenziert gesehen werden muß. Da die bisherigen Resultate auf kurzfristigen Messungen beruhen, lassen sich über Langzeiteffekte, insbesondere im Zusammenhang mit einer Strategie zur Steuerung der Körpermasse, keine sicheren Schlüsse ziehen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, die Wirkung von Kohlenhydraten und Fett auf die Energiebilanz von Sauen in einem Langzeitexperiment unter der Bedingung des Erhaltungsbedarfs zu prüfen. Durch kontrollierte isoenergetische Futteraufnahme sollte der Faktor Appetitregulation ausgeschaltet werden.

Material und Methoden

14 adulte, nichtgravide Sauen (Deutsche Landrasse) mit einer Anfangsmasse von 184 ± 14 kg wurden in eine Kohlenhydratgruppe (KH) und eine Fettgruppe (Fett) zu je sieben Tieren eingeteilt. Alle Tiere erhielten eine Grundration, bestehend aus 59,1 % Gerste, 20 % Sojaextraktionsschrot, 15 % Haferschälkleie, 1 % Sojaöl, 4 % Mineralstoff/Vitaminmischung, 0,7 % CaCO₃ und 0,2 %

NaCl. Die Grundration war hinsichtlich der Energie auf 60 % eines unterstellten Erhaltungsbedarfs von 430 kJ umsetzbarer Energie/kg W^{0.75} ausgerichtet (7). Protein sowie alle Mineral- und Wirkstoffe waren bedarfsdeckend enthalten. Fett wurde nur in einer Menge zugesetzt, um die Versorgung mit essentiellen Fettsäuren zu gewährleisten. Der Nährstoffgehalt der Grundration betrug in der Trockenmasse 3,1 % N, 3,2 % Rohfett, 8,6 % Rohfaser, 4,3 % Rohasche und 17,9 kJ Bruttoenergie/g. Wegen der Fettzulage in der Versuchsgruppe wurde Vitamin E durch eine Ergänzung von 30 mg/kg Grundration auf eine zweifache Bedarfsdeckung angehoben.

Die isoenergetische Zulage von Kohlenhydraten (Mischung aus 50 % Weizenstärke und 50 % Maisstärke) bzw. von Fett (Mischung aus 25 % Schweinefett, 25 % Sojaöl und 50 % Olivenöl) deckte die fehlende Energie zum Erhaltungsbedarf. Bei der Auswahl der Fettkomponenten wurden verstärkt Öle berücksichtigt, um eine zu Stärke vergleichbare hohe Verdaulichkeit und Umsetzbarkeit der Energie zu erhalten. Die Höhe der Zulagen war so bemessen, daß in Analogie zur menschlichen Ernährung in der Fettgruppe eine Ration mit rechnerisch um 40 Energie %-Fett auf der Basis der verdaulichen Energie verabreicht wurde.

Die Sauen wurden zwei Wochen lang an die Versuchsbedingungen angepaßt, wobei die Grundration mit Stärke ergänzt vorgelegt wurde. Danach wurden die beiden Versuchsrationen (Grundration + Stärkemischung bzw. Grundration + Fettmischung) aufgrund der an drei Tagen ermittelten Lebendmasse der Sauen tierindividuell eingestellt und während der gesamten Versuchsdauer konstant beibehalten. Die täglichen Futtermengen betrugen in Trockenmasse pro kg W^{0.75}: 21 g Grundration und 10 g Stärkemischung (17,3 kJ/g) bzw. 4,4 g Fettmischung (39,4 kJ/g).

Die erste Messung des Gaswechsels aller Tiere erfolgte eine Woche nach Beginn der Versuchsfütterung. Danach wurden die Messungen in 5wöchigen Perioden 4mal wiederholt, so daß sich insgesamt für jedes Tier eine Versuchsdauer von 21 Wochen ergab. Bei jeder Gaswechselmessung befand sich das Einzeltier 48 h in einer Respirationsskammer. Eine quantitative 6tägige Sammlung von Kot und Harn wurde im ersten und letzten Drittel des Versuchs durchgeführt. Die daraus für jedes Tier

ermittelten Werte an Stickstoff, Kohlenstoff und Energie wurden zur Berechnung von Verdaulichkeit und Umsetzbarkeit der Rationen in allen Versuchsperioden des jeweiligen Tieres 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 Sammelperiode waren die Tiere mit einem Harnkatheter versehen. Die Fütterung erfolgte zweimal täglich. Die verwendete Fettmischung lagerte im Kühlraum und wurde erst bei Fütterung der Grundration zugegeben. Wasser wurde den Sauen zu jeder Mahlzeit in einer Menge von 5 l verabreicht.

Die Gehalte an Stickstoff, Kohlenstoff und Energie in Futter, Fäzes und Harn wurden mit Hilfe des Macro-N-Geräts (Fa. Foss-Heraeus, Hanau), der konduktometrisch arbeitenden Wösthoff-Apparatur (Wösthoff GmbH, Bochum) und eines adiabatischen Bombenkalorimeters (IKA Labortechnik, Staufen) bestimmt. Mit Ausnahme der Stickstoffbestimmung im angesäuerten und 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 ($H [kJ] = 16,18 \cdot O_2 [l] + 5,02 \cdot CO_2 [l] - 2,17 \cdot CH_4 [l] - 5,99 \cdot Harn-N [g]$) erfaßt (1). Die Berechnung der oxidierten Substratmengen wird im Zusammenhang der Ergebnisdarstellung beschrieben.

Die Versuchsdaten wurden mit Hilfe der Varianzanalyse nach einem Split-Plot-Modell statistisch ausgewertet. Ein Tier der Fettgruppe wies in allen Versuchsperioden einen vergleichsweise extrem niedrigen Sauerstoffverbrauch ($15 \text{ L/kg W}^{0,75}$ und Tag) auf und wurde deshalb von der Auswertung ausgeschlossen (Fettgruppe $n = 6$). In den Ergebnistabellen sind neben den Mittelwerten der Behandlung die Standardabweichungen der Einzelwerte angegeben. Außerdem sind die Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen F-Statistik ($P > F$, p-Level) aufgeführt, aus denen signifikante ($p < 0,05$) und tendenzielle Effekte direkt abgelesen werden können.

Versuchsergebnisse

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Sammelperioden zur Ermittlung von Verdaulichkeit und Harnausscheidung im ersten und letzten Drittel des Versuchs aufgezeigt. Bei allen Kriterien ist zwischen erster und zweiter Sammelperiode kein signifikanter Unterschied festzustellen. Für die Berechnung der Energiebilanzen wurden deshalb die Resultate der beiden Messungen von jedem einzelnen Tier gemittelt und jeweils in alle fünf Bilanzperioden eingesetzt. Beim Harn-N ergab der Interaktionstest zwischen Behandlung und Periode Signifikanz, so daß für

dieses Kriterium bei jedem Einzeltier die beiden verfügbaren Werte auf die fünf Bilanzperioden durch lineare Interpolation prozentual dem mittleren Trendverlauf aller Tiere einer Ration entsprechend übertragen wurden. Zwischen der Kohlenhydrat- und Fettration zeigten sich in der Verdaulichkeit von Futtertrockenmasse, Stickstoff und Kohlenstoff Unterschiede in Höhe von 1-3 %, die sich jedoch bei der Verdaulichkeit der Futterenergie ausglich (Tab. 1). Auch in der täglichen Ausscheidung von Harnbestandteilen konnte kein Rationseffekt nachgewiesen werden.

Die Lebendmasse der Sauen am Ende der einzelnen Bilanzperioden ist in Tabelle 2 aufgezeigt. Die Tiere nahmen während des 21wöchigen Versuchs von 183 auf 176 kg ab, wobei die zu Versuchsbeginn festgelegte Futtermenge über alle Perioden unverändert beibehalten wurde. Für die beiden Rationen ergaben sich im Mittel des Versuchs mit 178,3 bzw. 178,5 kg gleiche Lebendmassen der Sauen. Aus den wöchentlichen Gewichtsmessungen ist ersichtlich, daß die Kohlenhydratr ration mit der Fettration über die gesamte Zeitdauer zusammenfällt und daß die einzelnen Tiere einen weitgehend linearen Verlauf der Lebendmasseentwicklung mit nur geringen Fluktuationen zeigten (Abb. 1). Die Verrechnung dieser Daten mit Hilfe des Split-Plot-Modells ergab eine mittlere Reststreuung innerhalb der Tiere einschließlich unvermeidbarer Wägeschwankungen wegen unterschiedlicher Darm- und Blasenfüllung von nur 1,5 % der Körpermasse.

Im Gaswechsel der Tiere, der sich ebenfalls in Tabelle 2 findet, sind beim Verbrauch an Sauerstoff und der Methanbildung keine Versuchseffekte aufgetreten. Dagegen zeigte CO_2 in der Fettration durchwegs niedrigere Werte im Vergleich zur Kohlenhydratr ration. Der Unterschied belief sich im Mittel des Versuchs auf 10 %.

Die mittleren Daten zur N-Bilanz aus den zwei Sammelperioden sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Der angenommene Stickstoff wurde über Kot und Harn wieder vollständig ausgeschieden. Die berechnete N-Retention von $20 \text{ mg/kg W}^{0,75}$ unterscheidet sich unter Berücksichtigung der Streuung nicht von einer Nullretention.

Tabelle 4 zeigt die Energiebilanz der Tiere. Bei sämtlichen Kriterien traten im Versuchsmittel zwischen der Kohlenhydratr ration und der Fettration keine signifikanten Differenzen auf. Geringfügige Behandlungsunterschiede innerhalb der einzelnen Versuchsperioden, statistisch durch tendenzielle Interaktionseffekte gekennzeichnet, glichen sich im gesamten Versuch aus. Als Mittelwert über die 21wöchige Versuchsdauer wurde mit beiden Rationen eine Wärmeproduktion von $413 \text{ kJ/kg W}^{0,75}$ und Tag festgestellt. Die mittlere Energieretention von $15 \text{ kJ/kg W}^{0,75}$ ist nur als zufällig minimal positiv anzusehen.

Mit Hilfe der Stoffwechselkonstanten, die die Basis der Brouwer'schen Formel bilden, lassen sich aus dem gemessenen Gasumsatz und dem ausgeschiedenen Harn-N die im Stoffwechsel des Tieres abgebauten Mengen an

Tab. 1 Verdaulichkeit und Harnexkretion

	Sammelperiode				Per P>F	Int P>F	Behandlung		Beh P>F
	KH-Ratio		Fettration				KH	Fett	
	1	2	1	2					
VQ-TM, %	80,9 ± 1,2	80,3 ± 1,4	76,8 ± 2,4	77,9 ± 2,8	0,78	0,30	80,6 ± 1,3	77,3 ± 2,6	0,00
VQ-N, %	81,8 ± 3,0	81,3 ± 2,4	84,0 ± 1,7	85,6 ± 2,3	0,42	0,18	81,6 ± 2,6	84,8 ± 2,1	0,02
VQ-C, %	82,0 ± 1,4	81,4 ± 1,4	79,8 ± 2,2	80,5 ± 2,5	0,93	0,34	81,7 ± 1,4	80,2 ± 2,3	0,08
VQ-Energie, %	81,5 ± 1,4	80,7 ± 1,4	80,3 ± 2,2	81,1 ± 2,6	0,95	0,26	81,1 ± 1,4	80,7 ± 2,3	0,64
Harn-N, g/d	26,6 ± 1,7	23,8 ± 4,1	25,2 ± 3,1	27,2 ± 3,8	0,66	0,02	25,2 ± 3,3	26,2 ± 3,5	0,55
Harn-C, g/d	21,1 ± 2,8	20,7 ± 3,0	21,6 ± 3,1	23,7 ± 2,6	0,31	0,17	20,9 ± 2,8	22,7 ± 2,9	0,22
Harnenergie, MJ/d	0,89 ± 0,08	0,87 ± 0,11	0,93 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,57	0,18	0,88 ± 0,10	0,95 ± 0,07	0,17

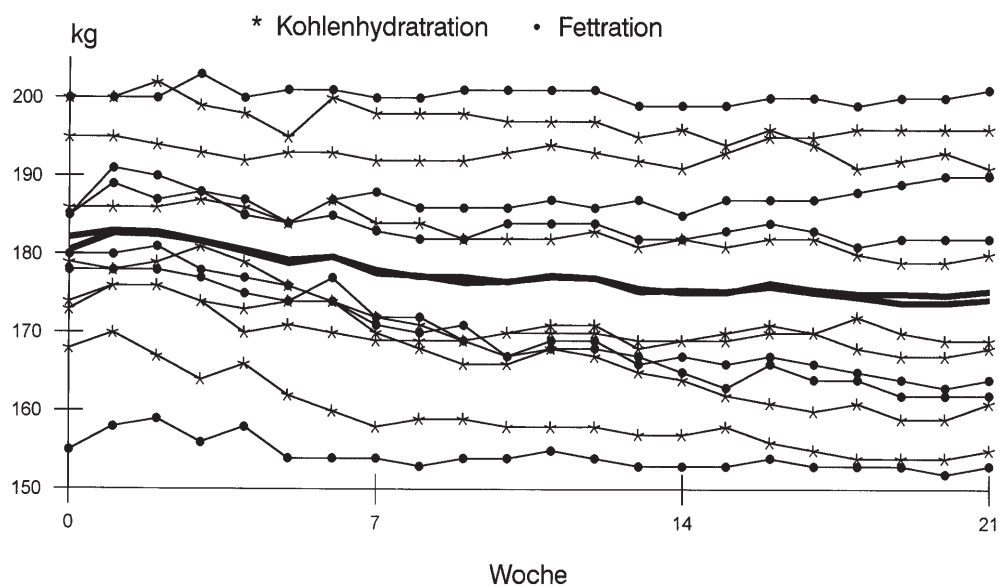
Modell: $Y = \mu + \text{Behandlung} + \text{Tier (Behandlung)} + \text{Sammelperiode} + \text{Behandlung} \times \text{Sammelperiode} + \text{Rest}$
 Per F-Test auf Effekt der Sammelperiode
 Int F-Test auf Interaktionseffekt Behandlung x Sammelperiode
 Beh F-Test auf Effekt der Behandlung

Tab. 2 Lebendmasse (kg) und Gasumsatz (L/kg $W^{0,75}$ und Tag) der Sauen

		Periode					Per P>F	Int P>F	Behandlung		Beh P>F
		1	2	3	4	5			KH	Fett	
Lebend- masse	KH	182,8 ± 11,0	179,7 13,9	177,2 14,3	175,9 15,4	175,9 15,6	0,00	1,00	178,3 13,5	178,5 15,4	0,98
	Fett	182,6 ± 14,5	179,8 15,6	177,3 16,4	176,4 16,8	176,6 18,6					
O ₂	KH	20,3 ± 1,4	20,0 1,4	19,2 1,6	20,7 1,0	20,6 1,1	0,54	0,19	20,2 1,3	20,6 2,0	0,63
	Fett	20,6 ± 2,4	20,8 1,9	20,7 1,7	20,7 2,3	20,0 2,3					
CO ₂	KH	20,2 ± 1,1	19,2 1,2	18,8 1,5	20,0 1,0	20,1 1,0	0,04	0,06	19,7 1,3	17,7 1,3	0,01
	Fett	18,0 ± 1,3	17,8 1,4	17,6 1,0	17,6 1,4	17,4 1,5					
CH ₄	KH	0,15 ± 0,04	0,14 0,03	0,16 0,03	0,16 0,05	0,17 0,05	0,19	0,58	0,16 0,04	0,17 0,03	0,35
	Fett	0,16 ± 0,04	0,17 0,02	0,18 0,03	0,18 0,04	0,18 0,04					

Modell: $Y = \mu + \text{Behandlung} + \text{Tier (Behandlung)} + \text{Periode} + \text{Behandlung} \times \text{Periode} + \text{Rest}$
 Per F-Test auf Periodeneffekt
 Int F-Test auf Interaktionseffekt
 Beh F-Test auf Behandlungseffekt

Abb. 1 Verlauf der Körpermasse der einzelnen Sauen ($n = 13$) sowie der Mittelwerte beider Behandlungen (dicke Linien)



Tab. 3 N-Bilanz (Mittelwerte der Sammelperioden, mg N/kg $W^{0.75}$ und Tag)

	KH-Ration	Behandlung Fett-Ration	P>F
N-Aufnahme	656 \pm 15	651 \pm 17	0,38
Kot-N	121 \pm 16	99 \pm 13	0,01
Harn-N	515 \pm 64	535 \pm 59	0,49
N-Retention	20 \pm 56	17 \pm 61	0,91

P>F: Behandlungseffekt nach Modell Tab. 1

pionsäure und 10 % Buttersäure umgewandelt wird und diese Fettsäuren dann intermediär zu CO_2 und H_2O mit einem RQ-Wert von 0,92 oxidiert werden. Hinzuzurechnen sind noch 0,05 g Stärke-Äquivalente je g BFS wegen der die Fermentation begleitenden Methanbildung (etwa 5 % Methanenergie aus BFS, 10). Wie aus Tabelle 6 hervorgeht, stimmen der CO_2/O_2 -Quotient und der berechnete Substratabbau von Ration und tierischem Organismus bei Kohlenhydratfütterung gut überein, bei Fettfütterung sind dagegen beim Substratabbau größere Differenzen zu verzeichnen.

Protein, Fett und Kohlenhydraten berechnen. Der Berechnungsvorgang ist in Matrix-Notation in Tabelle 5 aufgeführt, die Ergebnisse finden sich zusammen mit den respiratorischen Quotienten der Sauen in Tabelle 6. Als Gegenüberstellung wurden diese Daten auch für beide Rationen unter der Annahme eines vollständigen Abbaus der Nährstoffe ermittelt. Die Berechnung der ‚theoretisch‘ abbaubaren Substratmengen sowie des ‚RQ-Wertes‘ ($= \text{CO}_2/\text{O}_2$) der Rationen erfolgte dabei auf der Basis der verdaulichen Nährstoffe. Zu diesem Zweck wurde die Verdaulichkeit des Rohproteins der Sammelperiode entnommen, für Zucker wurde eine vollständige Verdaulichkeit und für Stärke und die Fettzulage eine solche von 98 % eingesetzt. Die verdaulichen Nichtstärke-Polysaccharide wurden durch die Menge an bakteriell fermentierter Substanz (BFS) berücksichtigt, die mit Hilfe von Futterwerttabellen (2) ermittelt (114 g/d mit beiden Rationen) und in Kohlenhydrat- und Fett-Äquivalente umgerechnet wurde, wobei 1 g BFS 0,60 g Kohlenhydraten und 0,08 g Fett gleichzusetzen sind. Diese Beziehung ergibt sich, wenn die BFS zu 75 % in kurzkettige Fettsäuren im Mol-Verhältnis 70 % Essigsäure, 20 % Pro-

Diskussion

Die Energiebilanz ist grundsätzlich das Ergebnis von Energieaufnahme und Energieabgabe eines Tieres oder des Menschen. Welche Faktoren innerhalb der Aufnahme und Abgabe im konkreten Falle für eine gestörte Bilanz verantwortlich zu machen sind, ist ein sehr schwieriges Problem, da es derzeit noch keine Theorie gibt, die eine umfassende Vorhersage der Bilanz zu leisten vermag. Schaltet man die Faktoren unterschiedlicher Energieaufnahme durch streng kontrollierte Nahrungszufuhr im Experiment aus, ist die Effizienz bzw. Thermogenese der verschiedenen Nährstoffe ein wichtiger Einflußfaktor für die Variation der Bilanz. Auf dieser Basis wurden im vorliegenden Versuch Kohlenhydrate und Fett miteinander verglichen. Um auch langfristige Auswirkungen zu erfassen, wurde eine Versuchsdauer von über 20 Wochen gewählt.

Das Versuchsergebnis zeigt ein völlig übereinstimmendes Bilanzverhalten beider Hauptnährstoffe. Wärme- und Energieproduktion, Energiebilanz und mittleres Körpergewicht zeigten gleiche Werte mit beiden Versuchsrationen. Als

Tab. 4 Energiebilanz (kJ/kg W^{0,75} und Tag)

		Periode					Per	Int	Behandlung		Beh
		1	2	3	4	5	P>F	P>F	KH	Fett	P>F
GE	KH	552	559	565	569	569			563	558	0,35
	±	7	6	7	12	14			11	14	
	Fett	548	554	560	563	563					
	±	8	7	13	16	21					
Kot	KH	104	106	107	108	107			106	108	0,78
	±	6	7	7	6	6			6	9	
	Fett	106	107	108	109	109					
	±	9	10	10	10	11					
DE	KH	448	454	458	461	461			457	450	0,37
	±	11	7	10	15	16			13	15	
	Fett	442	447	452	454	454					
	±	13	10	15	17	20					
Harn	KH	17,8	18,1	18,3	18,4	18,4			18,2	19,5	0,11
	±	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8			1,6	0,7	
	Fett	19,1	19,3	19,5	19,6	19,6					
	±	0,8	0,8	0,6	0,7	0,8					
CH ₄	KH	5,9	5,7	6,3	6,1	6,8	0,19	0,58	6,2	6,9	0,34
	±	1,7	1,3	1,0	1,9	2,0			1,6	1,3	
	Fett	6,3	7,0	7,2	7,1	7,0					
	±	1,6	0,7	1,0	1,7	1,6					
ME	KH	424	430	434	437	436	0,00	0,99	432	423	0,21
	±	9	5	8	13	15			11	14	
	Fett	416	421	425	427	427					
	±	13	10	14	16	19					
Hcn	KH	422	391	378	413	415	0,03	0,06	404	405	0,94
	±	33	35	39	28	27			35	33	
	Fett	416	408	403	402	397					
	±	37	37	28	34	38					
Hrq	KH	427	417	402	433	431	0,44	0,14	422	418	0,82
	±	27	28	33	21	23			28	39	
	Fett	421	423	420	419	408					
	±	45	37	32	45	45					
Hcnrq	KH	424	404	390	423	423	0,15	0,08	413	412	0,94
	±	29	31	35	24	25			31	36	
	Fett	418	416	411	410	402					
	±	41	37	30	39	41					
REcnrq	KH	0	26	44	14	13	0,02	0,10	19	12	0,63
	±	35	33	33	28	23			33	34	
	Fett	-2	5	14	17	25					
	±	44	32	36	31	30					

Modell und F-Tests siehe Tab. 2

Hcn = Wärmeproduktion nach der Kohlenstoff-Stickstoffbilanz-Methode

Hrq = Wärmeproduktion nach der RQ-Methode

cnrq = Mittelwert aus CN- und RQ-Methode

Vorteil des Versuches ist in diesem Zusammenhang zu werten, daß die energetische Umsetzbarkeit der Rationen gleich ausfiel und damit beiden Tiergruppen gleiche Mengen an Energie im Intermediärstoffwechsel zur Verfügung standen. Wegen der Langfristigkeit des Versuches sollte man erwarten, daß sich Gewichtsverlauf und Energieretention relativ decken. Im vorliegenden Versuch nahm die Lebendmasse um 6,4 kg ab, während die Energieretention im Mittel mit 15 kJ/kg $W^{0,75}$ und Tag minimal positiv war. Rechnet man die Gewichtsabnahme unter Annahme von 30 MJ/kg auf einen mittleren Retentionswert um, ergeben sich -27 kJ/kg $W^{0,75}$ und Tag. Dieser Betrag liegt noch im Streubereich der Bilanzmessung, so daß auf eine nachweisbare Diskrepanz beider Meßgrößen nicht geschlossen werden kann. Andererseits dürfte dem Bedarf der Tiere für Bewegungsaktivität, der im Stoffwechselstall höher anzusetzen ist als während der kalorischen Bilanzmessung bei akustisch isolierter Einzelhaltung in der Respirationskammer, eine wesentliche Bedeutung für dieses Ergebnis beizumessen sein.

Die Verdaulichkeit des Rohproteins war bei der Fett ration geringfügig höher als bei den Kohlenhydraten. Der geringere Kot-N wurde jedoch über eine entsprechend höhere Ausscheidung an Harn-N kompensiert, so daß die N-Bilanz unbeeinflusst blieb und mit der Energiebilanz relativ im Einklang stand. Der Unterschied im Kot-N ist wahrscheinlich nur als sekundärer Effekt im Zusammenhang mit der Bildung von Bakterienprotein im Dickdarm zu sehen. Bei massiver Fettzufuhr (680 g/Tag) wurde eine noch deutlichere Differenz zwischen Kot-N und Harn-N

jeweils im Vergleich zur Kontrolle beobachtet, die mit einer signifikanten Abnahme der Methanbildung im Dickdarm bei der Fettgruppe begleitet war (11).

Insgesamt weisen die Kriterien des Energie- und intermediären N-Umsatzes auf keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Versuchsrationen hin. Wegen der ausgeglichenen Energiebilanz folgt insbesondere, daß das aufgenommene Futter im Intermediärstoffwechsel nur oxidativen Zwecken diene. Als Konsequenz hiervon ist zu erwarten, daß der respiratorische Quotient der Tiere mit dem bei rechnerisch vollständigem Nährstoffabbau des Futters sich ergebenden CO_2/O_2 -Verhältnis übereinstimmt. Dies war im vorliegenden Versuch im Rahmen des Streubereiches der Werte erfüllt. Dasselbe trifft auch für die berechnete Substratoxidation in der Gegenüberstellung von Futterration und Abbau im Tier (d.h. der Nährstoffbilanz) bei Kohlenhydratfütterung zu. Bei der Fettfütterung ergaben sich dagegen keine ausgeglichenen Nährstoffbilanzen. Über die gesamte Versuchsdauer summiert, errechnet sich eine Fettanreicherung von 6 kg /Tier (= $(243-202) \cdot 147$ Tage) und eine völlig unrealistische „Kohlenhydratverarmung“ von fast 9 kg. Dies zeigt, daß die Berechnung von Nährstoffbilanzen sehr problematisch ist. Zum einem müßte man genaue Kenntnis der verdaulichen Anteile der Hauptnährstoffe einschließlich der intestinalen und postilealen Verdaulichkeiten haben, um die Nährstoffoxidation der Futterration zuverlässig berechnen zu können. Solche Informationen stehen normalerweise für eine gegebene Diät experimentell nicht zur Verfügung. Zum anderen ist auf seiten des Tieres als

Tab. 5 Berechnung der abgebauten Substratmengen aus dem Gasumsatz (O_2 , CO_2 , CH_4) und dem Harn-N

Gleichungssystem: $A \cdot s = b$

A = Gasumsätze (Liter O_2 , CO_2) sowie N-Gehalt (g) pro Gramm Substanz in der Reihenfolge Protein, Fett, Kohlenhydrate (Konstanten nach Brouwer 1965)

s = gesuchte Substratmengen

b = bekannte Meßwerte; die Komplettierung von O_2 und CO_2 wegen unvollständiger Substratoxidation infolge Methanbildung ist durch die Gleichung $CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$ berücksichtigt

$$A = \begin{pmatrix} 0.957 & 2.013 & 0.829 \\ 0.774 & 1.431 & 0.829 \\ 0.16 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

s = (Protein, Fett, KH)^T KH = Stärke oder Glykogen

b = ($O_2 + 2 \cdot CH_4$, $CO_2 + CH_4$, Harn-N)^T

Lösung des Gleichungssystems:

$$\text{Proteinabbau (g)} = 6.25 \text{ Harn-N (g)}$$

$$\text{Fettabbau (g)} = 1.7182 O_2 \text{ (L)} - 1.7182 CO_2 \text{ (L)} \\ + 1.7182 CH_4 \text{ (L)} - 1.9652 \text{ Harn-N (g)}$$

$$\text{Kohlenhydratabbau (g)} = -2.9659 O_2 \text{ (L)} + 4.1722 CO_2 \text{ (L)} \\ - 1.7597 CH_4 \text{ (L)} - 2.4431 \text{ Harn-N (g)}$$

Tab. 6 CO₂/O₂-Quotient und Substratabbau, berechnet für Futterrationen und Sauen

		KH-Fütterung			Fett-Fütterung			
		Ration	Sauen		Ration	Sauen		
CO ₂ /O ₂		0,952	0,975	± 0,031	0,833	0,862	± 0,023	
Proteinabbau	g/d	167	158	± 8	171	164	± 5	
Fettabbau	g/d	31	13	± 38	243	202	± 49	
KH-Abbau	g/d	982	991	± 89	488	547	± 74	

± = gepoolte Streuung innerhalb der Tiere bei konstanter Fütterung

wesentlicher Variationsfaktor die Empfindlichkeit der Substratberechnung gegenüber Streuungen in der Gaswechsellmessung zu sehen. Wie aus den Berechnungsgleichungen ersichtlich ist (Tabelle 5), wirken sich zwar gleichsinnige Über- oder Unterschätzungen des Gasumsatzes kaum auf die Substratberechnung aus, gegenläufige Fehler haben jedoch dramatische Folgen. So würde im vorliegenden Falle bei der Fettfütterung beispielsweise eine Überschätzung von nur 1 % O₂ und eine Unterschätzung von 1 % CO₂ eine Veränderung der berechneten oxidierten Fettmenge von 202 auf 234 g und der Kohlenhydrate von 547 auf 481 g zur Folge haben. Als Schlußfolgerung ergäbe sich dann, daß bei Fettfütterung Tier-RQ und Rations-RQ übereinstimmen. Letztlich ist noch zu erwähnen, daß bei der Berechnung von Nährstoffbilanzen die Konvertierung zwischen Nährstoffklassen im Falle einer Energiedeposition im Tier nicht erlaubt ist. Die Methode beinhaltet also wesentlich strengere Voraussetzungen als die Berechnung von Wärmeproduktion und Energieretention nach der Brouwer'schen Formel, die allein auf der Stöchiometrie der Oxidation der Nährstoffe und der Konstanz des Glykogengehaltes im Körper beruht. Aus diesen Gründen ist die Darstellung von Nährstoffbilanzen mit großem Vorbehalt zu sehen.

Bei der Rückrechnung der Wärmebildung aus den Substratmengen 'Sauen' ist zu beachten, daß für Protein der physiologische Brennwert von 18,4 kJ/g eingesetzt und die im Methan enthaltene Energie (39,5 kJ/L CH₄) abgezogen wird. Das Ergebnis ist dann mit der aus dem Gasumsatz nach der Brouwer-Formel berechneten Wärmeproduktion (H_{rq} in Tabelle 4) identisch. Im Gegensatz zu der im vorliegenden Versuch berechneten unausgeglichene Nährstoffbilanz bei Fettfütterung ist die aus dem Substratabbau resultierende energetische Bilanzierung in der Summe zwischen Futterration und Sauen nur in geringem Maße unterschiedlich. Einer Differenz von -1,6 MJ beim Fettabbau stehen 1,1 MJ bei den Kohlenhydraten gegenüber.

Nach theoretischer Berechnung (ATP-Bilanzierung) ist die Effizienz von Stärke (Glucose) und Fetten bei Energiegewinnung durch Oxidation im Intermediärstoffwechsel

gleich oder nur minimal verschieden, wenn neben der direkten Oxidation noch Energiekosten für Zwischenlagerung während absorptiver und postabsorptiver Phasen hinzugerechnet werden (3, 14). Bezogen auf die verwendeten Gesamtrationen wären danach in der Thermogenese Unterschiede zwischen beiden Behandlungen von höchstens 2 % zu erwarten. Das vorliegende Versuchsergebnis deckt sich mit diesem theoretischen Konzept sehr gut. Frühere Versuche mit Sauen bei 2 bis 3 Wochen Dauer mit gemischten Nahrungsfetten oder Fettsäurepräparaten (Öl- und Linolsäure) erbrachten im Vergleich zu einer kohlenhydratreichen Kontrolldiät ebenfalls keinen signifikanten Unterschied in der energetischen Effizienz zwischen beiden Nährstoffklassen (11, 12, 14). Gleiche Befunde wurden beim Menschen in bezug auf tägliche Wärmeabgabe und Energiebilanz festgestellt, wenn bei Ernährung auf dem Erhaltungsniveau Kohlenhydrat- und Fettdiäten in 1 bis 2wöchigen Bilanzversuchen miteinander verglichen wurden (8, 18). Ebenso erbrachte eine energiegerechte Ernährung bei Fettanteilen zwischen 0 und 75 % der Energieaufnahme über 2 bis 8 Wochen keinen Einfluß auf das Körpergewicht der Probanden (13).

Aus der vorliegenden Arbeit läßt sich insgesamt folgern, daß Stärke und Fett im Oxidationsstoffwechsel energetisch gleichwertig genutzt werden. Die Stabilität der Meßwerte über 21 Wochen zwischen beiden Nährstoffarten zeigt, daß auch bei langfristiger Verabreichung keine Veränderungen im Organismus eintreten, die eine nährstoffbedingt unterschiedliche Verschiebung der Energiebilanz und auch des Körpergewichts zur Folge hätten. Übersteigt die Energiezufuhr wie im vorliegenden Versuch nicht den Erhaltungsbedarf, spielt das Stärke-Fettverhältnis also keine Rolle für eine nahrungsinduzierte Regulation der Energiebilanz. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die menschliche Ernährung impliziert in Einklang mit den zitierten Befunden am Menschen, daß primär die Energiezufuhr mit dem Bedarf abgestimmt werden muß und unter dieser Prämisse der Zusammensetzung der aufgenommenen Nahrung keine bilanzregulierende Wirkung zukommt.

Literatur

1. 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
2. DLG-Futterwerttabellen für Schweine (1991) DLG-Verlag, Frankfurt am Main
3. Flatt JP (1978) The biochemistry of energy expenditure. Recent Adv Obes Res 2:211–228
4. Flatt JP (1993) Dietary fat, carbohydrate balance, and weight maintenance. Ann N Y Acad Sci 683:122–140
5. Flatt JP (1995) Body composition, respiratory quotient, and weight maintenance. Am J Clin Nutr 62:1107S–1117S
6. Flatt JP, Ravussin E, Acheson KJ, Jéquier E (1985) Effects of dietary fat on postprandial substrate oxidation and on carbohydrate and fat balances. J Clin Invest 76:1019–1024
7. GfE (1987) Gesellschaft für Ernährungsphysiologie: Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 4, Schweine. DLG Verlag Frankfurt am Main
8. Hill, JO, Peters JC, Reed GW, Schlundt DG, Sharp T, Greene HL (1991) Nutrient balance in humans: effects of diet composition. Am J Clin Nutr 54:10–17
9. Jéquier E (1993) Body weight regulation in humans: The importance of nutrient balance. News Physiol Sci 8:273–276
10. Kirchgeßner M, Kreuzer M, Müller HL, Windisch W (1991) Release of methane and of carbon dioxide by the pig. Agriol Res 44:103–113
11. Kirchgeßner M, Müller HL (1984) Thermogenese bei Verabreichung einer ketogenen Diät im Modellversuch an Sauen. Internat J Vit Nutr Res 54:99–106
12. Kirchgeßner M, Müller HL (1993) Effekt von Palmitin-, Öl- und Linolsäure auf die Thermogenese im Modellversuch an Sauen. Z Ernährungswiss 32:93–102
13. Leibel RL, Hirsch J, Appel BE, Chacani GC (1992) Energy intake required to maintain body weight is not affected by wide variation in the diet composition. Am J Clin Nutr 55:350–355
14. Müller HL, Kirchgeßner M (1995) Thermogenese und Energieverwertung bei Verabreichung von Olivenöl und Fischöl im Modellversuch an Sauen. Z Ernährungswiss 34:143–150
15. Schutz Y, Flatt JP, Jéquier E (1989) Failure of dietary fat intake to promote fat oxidation: a factor favoring the development of obesity. Am J Clin Nutr 50:307–314
16. Stubbs RJ, Murgatroyd PR, Goldberg GR, Prentice AM (1993) The effect of covert manipulation of dietary fat and energy density on ad lib. food intake in humans. Proc Nutr Soc 52:35A
17. Stubbs RJ, Harbron CG, Murgatroyd PR, Prentice AM (1995) Covert manipulation of dietary fat and energy density: effect on substrate flux and food intake in men eating ad libitum. Am J Clin Nutr 62:316–329
18. Wolfram G, Kirchgeßner M, Müller HL, Hollomey S (1985) Energiebilanzversuche mit fettreicher Diät beim Menschen. Ann Nutr Metab 29:23–32