

Aus dem Institut für  
Physiologie, Physiologische Chemie und Tierernährung  
Lehrstuhl für Tierernährung und Diätetik  
der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

Arbeit angefertigt unter der Leitung von  
Univ.-Prof. Dr. Ellen Kienzle

---

**Untersuchungen zur Energiebewertung von  
Standardmischfuttermitteln für Ratten**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung der tiermedizinischen Doktorwürde  
der Tierärztlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

von  
Karin Schug  
aus Konstanz

München 2005

Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. A. Stolle  
Referentin: Univ.-Prof. Dr. E. Kienzle  
Korreferent: Prof. Dr. M. El-Matbouli

Tag der Promotion: 11. Februar 2005

**Für meine Eltern**

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>V</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>VII</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>X</b>
<b>I. EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>II. SCHRIFTTUM</b>	<b>2</b>
<b>A. ENERGIEBEWERTUNG VON FUTTERMITTELN FÜR RATTEN</b>	<b>2</b>
<b>1. Die Bruttoenergie (GE)</b>	<b>2</b>
1.1 Experimentelle Bestimmung der GE	2
1.2 Rechnerische Bestimmung der GE	3
<b>2. Verdauliche Energie (DE)</b>	<b>10</b>
2.1 Experimentelle Bestimmung der DE	10
2.2 Schätzverfahren zur Ermittlung der DE	12
2.2.1 Verwendung von Tabellenwerten für die Verdaulichkeit	12
2.2.2 Verwendung von Faktoren für die Rohnährstoffe	12
2.2.3 Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand des Fasergehaltes	13
<b>3. Umsetzbare Energie (ME)</b>	<b>14</b>
3.1 Experimentelle Bestimmung der ME - Energiewechselmessung	14
3.2 Schätzverfahren zur Ermittlung der ME	15
3.2.1 Verwendung von Faktoren für die Rohnährstoffe	15
3.2.2 Verwendung von Faktoren für Rohnährstoffe, Stärke und Zucker	16
3.3 Kombinierte Verfahren zur Ermittlung der ME	17
3.3.1 Bestimmung der DE mit anschließender N-Korrektur	17
3.3.2 Ermittlung der ME anhand der verdaulichen Nährstoffe	17
<b>B. VERDAULICHKEIT VON FUTTERMITTELN BEI RATTEN</b>	<b>20</b>
<b>1. Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der Proteine</b>	<b>20</b>
1.1 Die Verdauung der Proteine	20
1.2 Scheinbare Verdaulichkeit von Protein	20
<b>2. Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der Fette</b>	<b>21</b>

2.1	Die Verdauung der Fette	21
2.2	Scheinbare Verdaulichkeit der Fette	21
<b>3.</b>	<b>Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der Kohlenhydrate</b>	<b>22</b>
3.1	Die Verdauung der Kohlenhydrate	22
3.2	Scheinbare Verdaulichkeit der Kohlenhydrate	22
<b>4.</b>	<b>Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der pflanzlichen Gerüstsubstanzen</b>	<b>22</b>
4.1	Die Verdauung der pflanzlichen Gerüstsubstanzen	23
4.2	Scheinbare Verdaulichkeit der pflanzlichen Gerüstsubstanzen	23
<b>5.</b>	<b>Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der organischen Substanz</b>	<b>24</b>
<b>III.</b>	<b>EIGENE UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>25</b>
<b>A.</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>25</b>
<b>1.</b>	<b>Versuchsplan</b>	<b>25</b>
<b>2.</b>	<b>Versuchstiere</b>	<b>25</b>
<b>3.</b>	<b>Versuchsfutter</b>	<b>26</b>
<b>4.</b>	<b>Versuchstechnik</b>	<b>29</b>
4.1	Tierhaltung	29
4.2	Versuchsablauf	29
<b>5.</b>	<b>Probennahme</b>	<b>30</b>
<b>6.</b>	<b>Prüfparameter</b>	<b>30</b>
<b>7.</b>	<b>Angewandte Untersuchungsmethoden</b>	<b>31</b>
7.1	Bestimmung der Roh Nährstoffe in Futter und Kot	32
7.2	Bestimmung der Stärke und Zucker im Futter	33
7.3	Bestimmung der Acid Detergent Fibre, Neutral Detergent Fibre und des Acid Detergent Lignin im Futter	33
7.4	Bestimmung der Bruttoenergie in Futter und Kot	34
7.5	Bestimmung des Chromoxidgehaltes in Futter und Kot	34
7.6	Bestimmung der Mineralstoffe in Futter und Kot	35
<b>8.</b>	<b>Berechnungsmethoden</b>	<b>36</b>

8.1	Berechnung der scheinbaren Verdaulichkeit	36
8.2	Berechnung der verdaulichen Energie (DE)	36
<b>9.</b>	<b>Statistische Methoden</b>	<b>36</b>
<b>B.</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>38</b>
<b>1.</b>	<b>Gesundheitszustand</b>	<b>38</b>
<b>2.</b>	<b>Futter- und Trinkwasseraufnahme</b>	<b>38</b>
<b>3.</b>	<b>Gewichtsentwicklung</b>	<b>39</b>
<b>4.</b>	<b>Kot</b>	<b>40</b>
4.1	Kotmenge und Kotbeschaffenheit	40
4.2	Trockensubstanzgehalt des Kotes	41
4.3	Der pH-Wert des Kotes	43
<b>5.</b>	<b>Scheinbare Verdaulichkeit (sV)</b>	<b>43</b>
<b>6.</b>	<b>Mineralstoffe</b>	<b>45</b>
6.1	Natrium	45
6.2	Kalium	46
6.3	Calcium	46
6.4	Phosphor	47
<b>IV.</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>49</b>
<b>A.</b>	<b>KRITIK DER METHODEN</b>	<b>49</b>
<b>1.</b>	<b>Das Alter der Ratten</b>	<b>49</b>
<b>2.</b>	<b>Der Rattenstamm</b>	<b>49</b>
<b>3.</b>	<b>Verdaulichkeitsbestimmung anhand von Kollektions- und Markermethode</b>	<b>51</b>
<b>B.</b>	<b>BESPRECHUNG DER ERGEBNISSE</b>	<b>53</b>
<b>1.</b>	<b>Verdaulichkeit</b>	<b>53</b>
1.1	Einfluss des Autoklavierens auf die Verdaulichkeit	56
1.2	Scheinbare Verdaulichkeit der Rohnährstoffe	59
1.2.1	Scheinbare Verdaulichkeit der Proteine	59
1.2.2	Scheinbare Verdaulichkeit der Fette	60
1.2.3	Scheinbare Verdaulichkeit der Kohlenhydrate	61

1.2.4	Scheinbare Verdaulichkeit der Faser	62
1.3	Scheinbare Verdaulichkeit der Mineralstoffe	63
1.3.1	Calcium und Phosphor	63
1.3.2	Natrium und Kalium	65
<b>2.</b>	<b>Energiebewertung</b>	<b>67</b>
2.1	Bruttoenergiegehalt im Futter	67
2.2	Bruttoenergiegehalt im Kot	68
2.3	Verdauliche Energie (DE)	72
2.3.1	Schätzung mittels Faktoren	72
2.3.1.1	Konventionelle Futtermittel: Faktoren für die Rohnährstoffe	73
2.3.1.2	Halbsynthetische Rationen: Faktor für die Energieverdaulichkeit	74
2.3.2	Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand des Fasergehaltes	75
2.4	Umsetzbare Energie (ME)	78
2.4.1	Schätzung mittels Faktoren	78
2.4.1.1	Konventionelle Futtermittel: Faktoren für die Rohnährstoffe	78
2.4.1.2	Halbsynthetische Rationen: Faktor für die Energieverdaulichkeit	79
2.4.2	Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand des Fasergehaltes	80
2.4.3	Verwendung von Schätzformeln für Schweine	81
2.4.3.1	Gleichung mit Faktoren für die verdaulichen Nährstoffe	81
2.4.3.2	Gleichung mit Faktoren für Rohnährstoffe, Stärke und Zucker	83
<b>3.</b>	<b>Bewertung der angewandten Schätzverfahren</b>	<b>84</b>
3.1	Konventionelle Futtermittel	84
3.2	Halbsynthetische Rationen	86
3.3	Schlussbetrachtung	87
<b>V.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>88</b>
<b>VI.</b>	<b>SUMMARY</b>	<b>91</b>
<b>VII.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>94</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANHANG</b>	<b>104</b>

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADF	Acid Detergent Fibre
ADL	Acid Detergent Lignin
ber	berechnet
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d	Tag (day)
DE	verdauliche Energie (digestible energy)
DLG	Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft
et al.	und Mitarbeiter
exkl.	exklusive
exp	experimentell
g	Gramm
GD	Grenzdifferenz
GE	Bruttoenergie (gross energy)
gesch	geschätzt
GfE	Gesellschaft für Ernährungsphysiologie
i.d.R.	in der Regel
kcal	Kilokalorie
kJ	Kilojoule
KM	Körpermasse
max	maximal
ME	umsetzbare Energie (metabolizable energy)
mg	Milligramm
min	minimal
MJ	Megajoule
MW	Mittelwert
n	Anzahl (number)
N	Stickstoff
NCP	Nicht-Stickstoff-Polysaccharide
NDF	Neutral Detergent Fibre
NE	Nettoenergie
NfE	N-freie Extraktstoffe
NRC	National Research Council
NSP	Nicht-Stärke-Polysaccharide



oS	organische Substanz
R	Korrelationskoeffizient
Ra	Rohasche
Rfa	Rohfaser
Rfe	Rohfett
Rnst	Rohnährstoff(e)
Rp	Rohprotein
SD	Standardabweichung (standard deviation)
St	Stärke
sV	scheinbare Verdaulichkeit
TS	Trockensubstanz
uS	ursprüngliche Substanz
v	verdaulich
wV	wahre Verdaulichkeit
Z	Zucker

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Brennwerte von Zucker und Stärke (STOHMANN 1890, ERTELT 1976, SCHRAG 1999) .....	4
Tabelle 2:	Brennwerte verschiedener Cellulosen nach SCHRAG (1999) in kJ/g organischer Substanz.....	5
Tabelle 3:	Brennwerte von Lignin nach SCHRAG (1999) in kJ/g organischer Substanz.....	6
Tabelle 4:	Brennwerte sonstiger Kohlenhydrate bzw. Nicht-Stärke-Polysaccharid-reicher Einzelfuttermittel nach STOHMANN (1890) und ERTELT (1976) in kJ/g und SCHRAG (1999) in kJ/g oS.....	6
Tabelle 5:	Brennwerte von Protein und N-haltigen Verbindungen (STOHMANN 1890, ERTELT 1976, SCHRAG 1999) .....	8
Tabelle 6:	Brennwerte von Fett nach STOHMANN (1890) und ERTELT (1976) in kJ/g und SCHRAG (1999) in kJ/g oS sowie verschiedener Fettsäuren nach STOHMANN (1890) in kJ/g.....	9
Tabelle 7:	Bruttoenergie (GE) verschiedener Fette in kJ/g einmal aus Fettsäuren berechnet von SCHRAG (1999) im Vergleich zu Brennwerten von STOHMANN (1890) und ERTELT (1976).....	10
Tabelle 8:	Versuchsplan: Die verschiedenen Versuchsgruppen .....	25
Tabelle 9:	Rohnährstoff- und Energiegehalt, Chromoxidgehalt der Futtermittel ..	27
Tabelle 10:	Stärke- und Zuckergehalt der Futtermittel .....	27
Tabelle 11:	Natrium- Kalium- Calcium- und Phosphorgehalt der Futtermittel.....	28
Tabelle 12:	NDF-, ADF-, ADL-, Cellulose- und Hemicellulosegehalte im Futter....	28
Tabelle 13:	Dauer der Anfütterungsphase und der Kotsammelperiode der einzelnen Futtertypen .....	30
Tabelle 14:	Futteraufnahme und Trinkwasseraufnahme während der Versuche pro 100g KM/d (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....	39
Tabelle 15:	Gewichtsveränderungen der Tiere während der 1. 5 Tage der Kotsammelperiode , +=Zunahme, -=Abnahme in g (n=6 Tiere/Gruppe) .....	40
Tabelle 16:	Kotmenge in Gramm TS pro 100g KM/d (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....	41
Tabelle 17:	TS-Gehalt des Kotes in Prozent, (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....	42
Tabelle 18:	Der pH-Wert des Kotes, (n=6Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD).....	43
Tabelle 19:	Scheinbare Verdaulichkeit der TS, der organischen Substanz, der Rohnährstoffe und der Bruttoenergie in Prozent (n=6Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD).....	44
Tabelle 20:	Aufnahme, faecale Ausscheidung von Natrium pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....	45
Tabelle 21:	Aufnahme, faecale Ausscheidung von Kalium pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....	46

Tabelle 22:	Aufnahme, faecale Ausscheidung von Calcium pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....47
Tabelle 23:	Aufnahme, fecale Ausscheidung von Phosphor pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....48
Tabelle 24:	Gruppe Z: Markerwiederfindung sowie scheinbare Verdaulichkeit der Trockensubstanz in % jeweils mittels Kollektionsmethode und Markermethode bestimmt sowie absolute und relative Abweichung ..52
Tabelle 25:	Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt der Trockensubstanz (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit der organischen Substanz (sV oS %) (nach KAMPHUES et al., 1999).....56
Tabelle 26:	Bruttoenergie in MJ/kg Futter-TS experimentell bestimmt, mit den Faktoren für landwirtschaftliche Nutztiere (GfE 1995), den empfohlenen Faktoren für die halbsynthetischen Futter und den Faktoren für Hund und Katze (GfE 2003) berechnet .....68
Tabelle 27:	Bruttoenergie im Kot in MJ/kg TS jeweils experimentell bestimmt und rechnerisch mittels eigener Faktoren bestimmt (n=6Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....69
Tabelle 28:	Bruttoenergie im Kot in MJ/kg TS jeweils experimentell bestimmt und mittels den Faktoren für Nutztiere (GfE 1995) berechnet (n=6Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD).....70
Tabelle 29:	Die verdauliche Energie (DE) experimentell mittels Bombenkalorimetrie bestimmt und anhand der Faktoren für verdaulichen Rohnährstoffe (GfE 1995) berechnet (n=6Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD).....72
Tabelle 30:	Verdauliche Energie (DE) der Haltungsfutter in MJ/kg Futter-TS experimentell bestimmt und mittels errechneten Rohnährstofffaktoren geschätzt (n=6Tiere/Gruppe).....74
Tabelle 31:	Verdauliche Energie (DE) der halbsynthetischen Futter experimentell bestimmt und anhand der Energieverdaulichkeit bestimmt (n=6 Tiere/Gruppe) .....75
Tabelle 32:	Verdauliche Energie (DE) experimentell bestimmt und anhand der scheinbaren Verdaulichkeit der Rohfaser berechnet, einmal mittels Faktoren (GfE 1995) berechneter GE, einmal mit experimentell bestimmter Bruttoenergie (GE).....77
Tabelle 33:	Umsetzbare Energie (ME) der Haltungsfutter durch N-Korrektur der Verdaulichen Energie (DE) ermittelt und anhand Faktoren geschätzt 79
Tabelle 34:	Umsetzbare Energie (ME) der halbsynthetischen Futter mittels N-Korrektur der DE ermittelt und anhand der Energieverdaulichkeit geschätzt .....80
Tabelle 35:	Die umsetzbare Energie (ME) durch N-Korrektur der experimentell bestimmten verdaulichen Energie (DE) ermittelt und basierend auf den Fasergehalt geschätzt .....81
Tabelle 36:	Umsetzbare Energie (ME) anhand der experimentell bestimmten DE mittels N-Korrektur (DE exp N-korr.) und mittels Schätzgleichungen für Schweinefutter bestimmt. Einmal mittels der Faktoren für verdauliche

---

	Rohnährstoffe (GfE 1987) und einmal anhand der Faktoren für Rohnährstoffe, Stärke und Zucker (GfE 1987). (n=6Tiere/Gruppe, MW) .....	84
Tabelle 37:	Scheinbare Verdaulichkeit (sV) der Rohnährstoffe und der Energie in Prozent (n=6 Tiere/Gruppe, MW $\pm$ SD) .....	89
Table 1:	Apparent digestibilities (aD) of nutrients and energy in per cent (n=6 animals/group, mean $\pm$ SD) .....	92
Tabelle 39:	Zusammensetzung des Zuchtfutters laut Deklaration des Herstellers1 .....	104
Tabelle 40:	Zusammensetzung des Haltungsfutters laut Deklaration des Herstellers1 .....	104
Tabelle 41:	Zusammensetzung des rohfaserreichen Futters laut Deklaration des Herstellers 1 .....	105
Tabelle 42:	Zusammensetzung der Purified Diet laut Deklaration des Herstellers 1 .....	105
Tabelle 43:	Zusammensetzung des Haltungsfutters laut Deklaration des Herstellers2 .....	105
Tabelle 44:	Zusammensetzung des rohfaserreichen Futters laut Deklaration des Herstellers 2 .....	106
Tabelle 45:	Zusammensetzung der Purified Diet laut Deklaration des Herstellers 2 .....	106
Tabelle 46:	Zusammensetzung des Haltungsfutters laut Deklaration des Herstellers3 .....	106
Tabelle 47:	Zusammensetzung des rohfaserreichen Futters laut Deklaration des Herstellers 3 .....	107
Tabelle 48:	Zusammensetzung der Purified Diet laut Deklaration des Herstellers 3 .....	107

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Mittlere scheinbare Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS %) der einzelnen Futtermittel und ihre Standardabweichung (n=6 Tiere/Gruppe) .....	53
Abbildung 2: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt der Trockensubstanz (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS %) der Haltungs- und Reduktionsfutter sowie des Zuchtfutters (n=6 Tiere/Gruppe) .....	54
Abbildung 3: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt der Trockensubstanz (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit der organischen Substanz der Haltungs- und Reduktionsfutter, sowie dem Zuchtfutter (n=6 Tiere/Gruppe) .....	55
Abbildung 4: Vergleich der mittleren scheinbaren Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS %) der Haltungsfutter jeweils vor und nach dem Autoklavieren und ihre Standardabweichung (n=6 Tiere/Gruppe) .....	58
Abbildung 5: Vergleich der mittleren scheinbaren Verdaulichkeit von Rohprotein (sV Rp %) der Haltungsfutter jeweils vor und nach dem Autoklavieren und ihre Standardabweichung (*= signifikanter Unterschied) (n=6 Tiere/Gruppe) .....	58
Abbildung 6: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt in der Futter-TS (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit des Rohproteins (sV Rp %) bei den Haltungs- und Reduktionsfuttern, sowie dem Zuchtfutter (n=6 Tiere/Gruppe) .....	59
Abbildung 7: Scheinbare Verdaulichkeit des Rohfettes in Abhängigkeit der Fettaufnahme in mg/100g KM/Tag .....	60
Abbildung 8: Beziehung zwischen der Fettaufnahme und der faecalen Fettausscheidung aller Versuchsgruppen .....	61
Abbildung 9: Beziehung zwischen der mit dem Futter aufgenommenen Rohfasermenge und der faecalen Rohfaserausscheidung .....	63
Abbildung 10: Beziehung zwischen der Calciumaufnahme und der faecalen Calciumausscheidung .....	64
Abbildung 11: Beziehung zwischen der Phosphoraufnahme und der faecalen Phosphorausscheidung .....	65
Abbildung 12: Beziehung zwischen der Ausscheidung von Natrium im Kot und der ausgeschiedenen Menge an Kottrockensubstanz .....	66
Abbildung 13: Beziehung zwischen der Ausscheidung von Kalium im Kot und der ausgeschiedenen Kotmenge .....	66
Abbildung 14: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt in der Futter-TS und der scheinbaren Verdaulichkeit der Bruttoenergie, excl. der halbsynthetischen Futter .....	76

Abbildung 15: Umsetzbare Energie (ME) mittels der Schätzformel für Schweine ermittelt im Vergleich mit der N-korrigierten experimentell bestimmten verdaulichen Energie (DE <sub>exp</sub> N-korr).....	82
Abbildung 16: Umsetzbare Energie auf der Faser basierend und anhand der Gleichung für Schweine geschätzt im Vergleich untereinander und mit der experimentell ermittelten N-korrigierten DE (DE <sub>exp</sub> N-korr.), halbsynthetische Futter ausgeschlossen.....	86
Abbildung 17: Vergleich der auf verschiedene Weise geschätzten umsetzbaren Energie (ME) mit der experimentell ermittelten N-korrigierten DE (DE <sub>exp</sub> N-korr.) aller Futtermittel.....	87

# I. EINLEITUNG

Schon seit langem ist bekannt, dass restriktiv gefütterte Nager im Durchschnitt eine wesentlich längere Lebensdauer aufweisen als solche mit freiem Zugang zum Futter (MC CAY et al., 1935). Neuere Studien an Ratten zeigten, dass die Reduktion der Futtermenge auf 50% bis 80% der ad libitum aufgenommenen Menge der Kontrollgruppen zu durchschnittlich geringerem Körpergewicht, verminderter Tumorrates und verlängerter Lebensdauer führte (CHRISTIAN et al., 1998). Daher ist nach Auffassung von KEENAN et al. (1998) die restriktive Fütterung ein geeignetes Mittel, um die Sensitivität von toxikologischen Studien und Studien in der Krebsforschung zu erhöhen. Das Auftreten von spontanen Nieren- und Herzerkrankungen, endocrinen Erkrankungen sowie von Spontantumoren wird erheblich reduziert. HUBERT et al. (2000) zeigten, dass eine moderate Reduktion um 25% der ad libitum aufgenommenen Futtermenge die Lebensdauer verlängert, ohne jedoch das Wachstum zu beeinträchtigen oder klinische Standardparameter zu beeinflussen.

In toxikologischen und onkologischen Studien ist daher die Restriktion der Energieaufnahme, sei es durch verringerte absolute Futtermengen, durch zeitlich begrenzten Zugang oder durch Reduktion der Energiedichte des Futters eine wesentliche Versuchsbedingung, die genau beschrieben und gegebenenfalls standardisiert werden muss. Zu diesem Zweck ist ein verlässliches Energiebewertungssystem erforderlich. Quantitativ spielt bei der Ratte die Verdaulichkeit der Energie die wichtigste Rolle bei der Energiebewertung. Es lagen im Schrifttum jedoch nur wenige Daten zur Verdaulichkeit von Standardmischfutter für Ratten vor. Daher wurden in der vorliegenden Untersuchung insgesamt 13 Verdauungsversuche mit Haltungs-, Reduktions- und Zuchtfuttern sowie halbsynthetischen Rationen durchgeführt und die Eignung verschiedener Möglichkeiten zur Energiebewertung anhand der Ergebnisse überprüft.

## **II. SCHRIFTTUM**

### **A. ENERGIEBEWERTUNG VON FUTTERMITTELN FÜR RATTEN**

Die Energiebewertung von Futtermitteln kann auf verschiedenen Ebenen vorgenommen werden. Die Bruttoenergie (GE) ist als gesamte chemische Energie, die einem Futtermittel innewohnt, definiert. Um die verfügbare Energie für Erhaltungsfunktionen und tierische Produkte (=Nettoenergie) zu ermitteln, werden über drei Stufen hinweg die energetischen Transformationsverluste von der Bruttoenergie abgezogen. Im ersten Schritt wird von der Bruttoenergie die Energie, die mit dem Kot verloren geht, subtrahiert. Man erhält die verdauliche Energie (DE). Zieht man von dieser verdaulichen Energie die Verluste, die mit der Abgabe von Harn und Gärgasen einhergehen, ab, gelangt man zur umsetzbaren Energie (ME). Im letzten Schritt der Umwandlung in die Nettoenergie (NE) wird der Anteil an nicht nutzbarer thermischer Energie berücksichtigt.

Die Energiebewertung von Futtermitteln für Ratten wird entweder auf der Stufe der verdaulichen Energie (DE) oder der umsetzbaren Energie (ME) vorgenommen (EGGUM et al., 1982; THORBECK et al., 1982; EGGUM et al., 1986; IMAI et al., 1986; LARSEN et al., 1990; SUZUKI et al., 1990; BROWN et al., 1994; KAMPHUES et al., 1999; KEENAN et al., 2000). Da die Bruttoenergie weder die starke futtermittelabhängige Variation in der Verdaulichkeit noch die der Umsetzbarkeit berücksichtigt, scheidet sie als geeigneter Maßstab zur Futterbewertung aus. Sie dient jedoch als Grundlage der Berechnungen aller weiteren Energiestufen und ist somit von großem Interesse.

#### **1. Die Bruttoenergie (GE)**

Die Bruttoenergie kann entweder experimentell im Bombenkalorimeter bestimmt oder aus den mittleren Brennwerten der Rohnährstoffe berechnet werden.

##### **1.1 Experimentelle Bestimmung der GE**

Die Bruttoenergie eines Futtermittels stellt dessen physikalischen Brennwert dar. Er lässt sich durch die komplette Verbrennung dieses Futtermittels in einem



Bombenkalorimeter bestimmen. Hierbei wird die chemische Energie in thermische Energie überführt.

## 1.2 Rechnerische Bestimmung der GE

Eine andere Möglichkeit stellt die Schätzung der Bruttoenergie anhand der Roh Nährstoffgehalte mit Hilfe von Standardbrennwerten für die Roh Nährstoffe dar. Diese Standardbrennwerte basieren auf Brennwertuntersuchungen, die teilweise bereits Ende des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurden.

Bereits 1890 veröffentlichte STOHMANN eine Zusammenstellung zahlreicher Verbrennungswärmen organischer Verbindungen. Beim Vergleich der einzelnen Brennwerte innerhalb einer Stoffgruppe waren die teilweise erheblich unterschiedlichen Werte der einzelnen Verbindungen auffallend. So wurden für Kohlenhydrate Brennwerte zwischen 15,5 und 17,7 kJ/g, für Fette zwischen 38,5 und 39,8 kJ/g und für Proteine zwischen 19,5 und 25,1 kJ/g angegeben. Bei den verschiedenen Fettsäuren (FS) waren die Schwankungen mit 5,7 kJ/g kurzkettiger FS und 40,7 kJ/g langkettiger FS besonders gravierend.

ERTELT (1976) bestimmte den Brennwert von Lebensmitteln durch die Verbrennung einzelner Hauptnährstoffe in der kalorimetrischen Bombe.

SCHRAG (1999) führte Untersuchungen zum Brennwert von Komponenten von Futtermitteln für Hunde und Katzen durch. Auch hier wurde die Verbrennungswärme der einzelnen Verbindungen mittels Bombenkalorimetrie ermittelt.

### u Kohlenhydrate

Die Brennwerte verschiedener Zucker, Stärken und Cellulosen unterscheiden sich kaum voneinander. Wie aus Tabelle 1 abzulesen ist, liegen die Brennwerte der verschiedenen Zucker zwischen 15,4 und 16,8 kJ/g. Stärke zeigt dagegen Werte zwischen 17,1 und 17,7 kJ/g. Mit einer Ausnahme, einer nicht gereinigten Cellulose mit hohem Ligninanteil, liegen sämtliche für Cellulosen ermittelten Brennwerte zwischen 17,0 und 17,6 kJ/g (Tabelle 2). Im Gegensatz dazu weisen die Brennwerte von Lignin einschließlich Ligninsulfonat (Tabelle 3) eine hohe Variation auf, sie reichen von 17,0 bis 29,2 kJ/g. Ähnlich verhält es sich bei den anderen Nicht-Stärke-Polysacchariden (NSP) wie Pektin, Guar und Alginaten (Tabelle 4). Hier schwanken die Brennwerte zwischen 10,0 und 18,2 kJ/g.

Die von der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GfE) festgelegten Standardbrennwerte für die einzelnen Nährstoffgruppen unterscheiden sich je nach Tierart. Für stickstofffreie Extraktstoffe (NfE) wird beim Fleischfresser ein Brennwert von 17,17 kJ/g unterstellt (GfE 2003), bei Pflanzenfressern ein Brennwert von 17,5 kJ/g (GfE 1995). Zucker werden somit in jedem Falle überschätzt. Beim Schwein wird bei der Bewertung von zuckerreichen Futtermitteln eine Korrektur der umsetzbaren Energie (ME) durchgeführt, indem das Produkt durchschnittliche Überschätzung an Energie mal Zuckergehalt ( $1,4 \text{ KJ} \cdot \text{g Zucker}$ ) abgezogen wird (JEROCH et. al. 1999) (s. Kapitel II A 3.3.2). Stärke wird weitgehend richtig bewertet. Die in dieser Fraktion erscheinenden NSP dagegen können zu einer Fehleinschätzung führen. Cellulose, die in der NfE-Fraktion auftaucht, wird korrekt bewertet.

Für Rohfaser wird bei Fleischfressern als Standardbrennwert 17,17 kJ/g (GfE 2003), bei Pflanzenfressern 20,1 kJ/g (GfE 1995) verwendet. Cellulose wird somit nur dann richtig eingeschätzt, wenn die untere Grenze des Standardwertbereichs für Faser zugrunde gelegt wird. Die hohe Variation der Brennwerte von Lignin kann zu erheblicher Fehleinschätzung der Rohfaser führen. Bei Pflanzenfressern spielt Lignin als Fehlerquelle bei der Rohfaserbewertung eine erheblich größere Rolle als bei Fleischfressern, wo kein Lignin im Futter zu erwarten ist.

Tabelle 1: Brennwerte von Zucker und Stärke (STOHMANN 1890, ERTELT 1976, SCHRAG 1999)

Komponente	gemessener Brennwert (kJ/g)
Dextrose	15,5; 15,7; 15,8
Lactose	16,3
Lactose 1xH <sub>2</sub> O	15,7
Saccharose	16,2; 16,6; 16,7
Stärkemehl	17,3; 17,7
Getreidestärke	17,6
Maisstärke, roh	17,3*
Maisstärke, erhitzt	17,2*
Kartoffelstärke	17,6
Kartoffelstärke, roh	17,1*
Kartoffelstärke, erhitzt	17,2*

\* = bezogen auf die organische Substanz (oS) in der Trockensubstanz

Tabelle 2: Brennwerte verschiedener Cellulosen nach SCHRAG (1999) in kJ/g organischer Substanz

Komponente	gemessener Brennwert (kJ/g oS)
Cellulose (STOHMANN 1890)	17,4*; 17,6*
Cellulose 1, Buche/Fichte 3:1	17,4
Cellulose 2, Pulver, hochrein, 700µm	17,2
Cellulose 3, Pulver, hochrein, 200µm	17,3
Cellulose 4, Pulver, hochrein, 60µm	17,2
Cellulose 5, Weizenfaser, 80µm	17,5
Cellulose 6, mikrokristallin	17,3
(Pulp-) Cellulose 7	17,1
Cellulose 8, Buche, Sulfat	17,1
Cellulose 9, Buche-Fichte, Sulfit	17,4
Cellulose 10, Fichte, Sulfit	17,2
Cellulose 11, Fichte, Sulfat	17,3
Cellulose 12, Birke, Sulfat	17,3
Cellulose 13, Eukalyptus	17,3
Cellulose 14, Aspe	17,2
Cellulose 15, nicht gereinigt, hoher Ligninanteil	19,3
Cellulose 16, feinpulverig, Buche, Sulfit	17,3
Cellulose 17, faserig, Buche, Sulfat	17,2
Cellulose 18, feinpulverig, Fichte	17,1
Cellulose 19, feinpulverig, Bambus	17,3
Cellulose 20, faserig, Baumwolle	17,0
Cellulose 21, feinpulverig, Hartholz, Sulfat	17,3
Cellulose 22, langfaserig, Hartholz, Sulfat	17,2

\* = keine Angaben über Aschegehalte

Tabelle 3: Brennwerte von Lignin nach SCHRAG (1999) in kJ/g organischer Substanz

Komponente	gemessener Brennwert (kJ/g oS)
Fichtenholzlignin, Organosolv-Aufschluss	25,9
Ligninsulfonat 1	17,0
Ligninsulfonat 2	28,6
Lignin	24,8
Lignin, hydrolytischer Aufschluss	27,4
Birkenlignin, Ethanol-NaOH-Aufschluss	29,2

Tabelle 4: Brennwerte sonstiger Kohlenhydrate bzw. Nicht-Stärke-Polysaccharid-reicher Einzelfuttermittel nach STOHMANN (1890) und ERTELT (1976) in kJ/g und SCHRAG (1999) in kJ/g oS

Komponente	gemessener Brennwert (kJ/g; kJ/g oS)
Apfelpektin, 72 % verestert	16,3*
Apfelpektin, 41 % verestert	15,6*
Citruspektin, 71 % verestert	16,1*
Citruspektin, 34 % verestert	14,9*
Rübenpektin, 57 % verestert	15,9*
Apfelpektin, 30 % verestert, 19 % amidiert	15,3*
Pektinsäure, 6,4 % verestert	14,0*
Obstpektin	14,0
Carrageen 1, „refined“	16,9*
Carrageen 2, „refined“	16,3*
Carrageen 3, semirefined	17,9*
Carrageen 4, semirefined	16,2*
Carrageen 5, semirefined	16,6*
Carrageen	12,1
Alginat 1, niedrigviskos	17,9*
Alginat 2, niedrigviskos	17,3*
Alginat 3, hochviskos	16,9*
Alginat 4, hochviskos	16,8*
Alginat	10,1
Johannisbrotkernmehl 1, Lebensmittelqualität	17,6*

Komponente	gemessener Brennwert (kJ/g; kJ/g oS)
Johannisbrotkernmehl 2, Futtermittelqualität	18,0*
Johannisbrotkernmehl 3	18,2*
Johannisbrotkernmehl	15,9
Guar Gum 1	17,7*
Guar Gum 2	17,8*
Guarmehl	16,2
Gum Traganth	18,2*
Gum Traganth	16,1
Gum Arabicum	17,4*
Gum Arabicum	17,2
Tara Gum	17,8*
Agar Agar	18,1*
Agar Agar	18,2
Xanthan 1	17,6*
Xanthan 2	17,4*
Inulin 1	17,0*
Inulin 2	17,2*
Inulin	17,0; 17,5
Galactooligosaccharide	16,0*

\* = bezogen auf die organische Substanz in der Trockensubstanz

## u **Proteine**

Bei den Proteinen wurden Brennwerte zwischen 22 und 25 kJ/g ermittelt (Tabelle 5). Als Standardbrennwerte für Rohprotein werden für Fleischfresser 23,85 kJ/g (GfE 2003) und für Pflanzenfresser 23,9 kJ/g (GfE 1995) verwendet. Deutlich niedrigere Werte ergab die Verbrennung von N-haltigen Polysacchariden wie Chitin und Glucosaminen. Enthält die Proteinfraction erhebliche Mengen dieser Substanzen, wird deren Brennwert somit unterschätzt.

Tabelle 5: Brennwerte von Protein und N-haltigen Verbindungen (STOHMANN 1890, ERTELT 1976, SCHRAG 1999)

Komponente	gemessener Brennwert (kJ/g)
Fleischeiweiß	23,7
Tierisches Protein 1, Sehngewebe	22,2*
Tierisches Protein 2, Sehngewebe	22,0*
Tierisches Protein 3, Nackenband/Rind	24,2*
Blutfibrin	23,2
Hämoglobin	24,7
Fischeiweiß	24,1
Milcheiweiß	24,0
Lactalbumin	23,9*
Casein	23,6
Casein	24,6*
Hühnerei-Albumin	23,8
Hühnerei-Albumin	23,6*
Vitellin	24,2
Sojaprotein	24,1*
Kleber (Gluten)	25,1
Getreideeiweiß	24,0
Weizenprotein 1	22,2*
Weizenprotein 2	22,1*
Pflanzenfibrin	24,4
Chitin	20,4*
D+-Glucosamin	14,8*
D-Acetylglucosamin	18,1*

\* = bezogen auf die organische Substanz der Trockensubstanz

## u **Fette**

Für die untersuchten Fette wurden Brennwerte im Bereich zwischen 37 und 40 kJ/g ermittelt (Tabelle 6). Bei der Annahme eines Standardbrennwertes von 39,34 kJ/g (GfE 2003) bzw. von 39,8 kJ/g (GfE 1995) werden die Fette größtenteils korrekt bewertet. Laut PARABUCKI und SCHÜRCH (1967) hängt der Brennwert von Fetten wesentlich von der Kettenlänge und dem Sättigungsgrad der veresterten Fettsäuren

ab, wobei Ersteres den größeren Einfluss ausübt. Aus Tabelle 6 wird ersichtlich, dass mit steigender Kettenlänge der FS ihr Brennwert deutlich ansteigt.

Tabelle 6: Brennwerte von Fett nach STOHMANN (1890) und ERTELT (1976) in kJ/g und SCHRAG (1999) in kJ/g oS sowie verschiedener Fettsäuren nach STOHMANN (1890) in kJ/g

Fette	gemessener Brennwert	Fettsäuren	gemessener Brennwert
Tierfett	39,2; 39,5; 39,8	Ameisensäure	5,7; 8,8
Rindertalg	39,5	Essigsäure	14,6; 14,9
Rindertalg Raffinat	39,6*	Propionsäure	20,8
Rindertalg	39,5*	Buttersäure	23,6; 24,9
Schweineschmalz	38,0	Valeriansäure	27,0; 27,8
Butterfett	38,5; 38,6	Capronsäure	30,0
Butterfett	38,6	Caprylsäure	33,1; 33,2
Fischöl	39,3*	Caprinsäure	35,3; 35,4
Leinöl	39,0	Laurinsäure	36,6; 36,8
Sonnenblumenöl	39,3	Myristinsäure	37,7; 37,9
Sonnenblumenöl	39,6	Palmitinsäure	38,6; 38,8; 39,0
Weizenöl	39,0	Stearinsäure	39,5; 40,7
Sojaöl	39,8		
Sojaöl, gehärtet	39,6		
Olivenöl	39,5		
Olivenöl	39,0; 39,5		
Palmkernöl, raffiniert	38,0*		
Palmkernöl	37,5		
Rüböl	39,7		
Rüböl	40,2		
Nachtkerzenöl	39,5*		

\* = bezogen auf die organische Substanz in der Trockensubstanz

SCHRAG (1999) überprüfte, inwieweit es möglich ist, den Brennwert eines Fettes anhand seines Fettsäuremusters zu berechnen. Die einzelnen Fette enthalten auch einen beträchtlichen Anteil an ungesättigten FS. Es liegen jedoch nur die ermittelten Brennwerte für gesättigte FS vor (STOHMANN, 1890). Um zu den Brennwerten der ungesättigten Fettsäuren zu gelangen, müssen nach PRABUCKI und SCHÜRCH

(1967) für jede Doppelbindung 0,1675 kJ/g vom Brennwert der entsprechenden gesättigten FS abgezogen werden. SCHRAG (1999) verglich ihre so berechneten Brennwerte für verschiedene Fette mit den Werten von STOHMANN (1989) und ERTELT (1976) (Tabelle 7). Dabei zeigte sich bei Rindertalg, Palmkernfett, Sojafett, Butter und Olivenöl eine gute Übereinstimmung der Brennwerte. Beim Schweinefett ermittelte ERTELT (1976) experimentell eine niedrigere Bruttoenergie, der berechnete Brennwert von Leinöl war um 0,6 kJ/g höher als der von STOHMANN (1890) bestimmte Wert.

Tabelle 7: Bruttoenergie (GE) verschiedener Fette in kJ/g einmal aus Fettsäuren berechnet von SCHRAG (1999) im Vergleich zu Brennwerten von STOHMANN (1890) und ERTELT (1976)

	GE berechnet SCHRAG (1999)	GE experimentell STOHMANN (1890)	GE experimentell ERTELT (1976)
Rindertalg	39,583	(Tierfett) 39,209;	39,45
Schweinefett	39,588	39,452; 39,775	37,97
Palmkernfett	37,473	-	37,52
Sojafett	39,713	-	39,83 (Sojaöl) 39,64 (Sojaöl gehärtet)
Butter	38,315	38,485; 38,644	38,61
Olivenöl	39,657	39,045; 39,532	39,53
Leinöl	39,636	39,034	-

- = keine Angaben

## 2. Verdauliche Energie (DE)

### 2.1 Experimentelle Bestimmung der DE

Grundsätzlich wird bei der experimentellen Bestimmung der DE zunächst jeweils die Bruttoenergie (GE) im Futter und im Kot ermittelt und dann die Energie im Kot von der des Futters abgezogen. Dabei kann die GE jeweils entweder mittels Bombenkalorimetrie bestimmt oder durch Multiplikation der ermittelten Gehalte an Nährstoffen mit dem Brennwert berechnet werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die einzelnen Nährstoffgruppen im Futter jeweils anders zusammengesetzt sind als im Kot. Dieser Umstand führt nach KIENZLE et al. (1999) dazu, dass die Verdaulichkeit der Energie in Hunde- und Katzenfutter mit dieser Methode um 2 % überschätzt wird. FEHRLE (1999) bestimmte die verdauliche



Energie in Pferdefutter und verglich die im Verdauungsversuch ermittelten Werte der DE mit der berechneten DE. Dabei stellte sie einen deutlichen Unterschied fest, der zwischen 2 und 18 % lag.

Hinsichtlich der Versuchstechnik und der Analytik sind verschiedene Vorgehensweisen möglich. So gibt es bezüglich der Dauer der Anfütterungsphase und der Kotsammelphase verschiedene Variationen. Des Weiteren kann zwischen zwei Methoden, der Kollektionsmethode und der Markermethode, gewählt werden.

Die Dauer der Anfütterungsphase und der Kotsammelphase richtet sich im Wesentlichen nach der Tierart, aber auch andere Faktoren wie die verwendeten Futtermittel oder die Haltungsbedingungen müssen mit berücksichtigt werden. Die Dauer der Anfütterung muss mindestens so lange gewählt werden wie die einmalige Futterpassage durch den Verdauungskanal plus einer gewissen Sicherheitsspanne. MUAKATA et al. (1995) führten Untersuchungen zur Dauer der Magen-Darm-Passage bei Ratten verschiedenen Alters unter Einsatz von Diäten mit unterschiedlichem Rohfasergehalt durch. Sie ermittelten bei sechzehn Monate alten Ratten mittlere Gesamtpassagezeiten von ungefähr elf Stunden, bei sechzehn Wochen alten Ratten ca. sechs Stunden. Ferner untersuchten BRUNSGAARD et al. (1995) inwieweit bei Ratten die Adaptationszeit an eine Diät deren Verdaulichkeit beeinflusst. Abhängig von der Faserart, welche die Futter enthielten, hatte sich die TS-Verdaulichkeit schon nach wenigen Tagen, spätestens jedoch nach annähernd einer Woche, stabilisiert. Neben einer Dauer der Anfütterungszeit von vier Tagen (BACH KNUDSEN et al., 1983; EGGUM et al., 1986) bevorzugten einige Autoren eine längere Zeit von sechs Tagen (LARSEN et al., 1990) bzw. von sieben Tagen (SHAH et al., 1982; SARWAR und PEACE; 1986).

Die Dauer der Kotsammelphase richtet sich im Allgemeinen nach der Defäkationsfrequenz. Bei kleineren Species, wie z.B. Ratten, muss am Ende der Kotsammelperiode aber auch eine ausreichende Kotmenge für die Analytik angefallen sein. Viele Autoren wählten eine Dauer von fünf Tagen (BACH KNUDSEN et al., 1983; EGGUM et al., 1986; LARSEN et al., 1990), andere sammelten den Kot sieben Tage (SARWAR and PEACE, 1986) oder sogar vierzehn Tage lang (SHAH et al., 1982).

Die Kotsammlung kann nach zwei verschiedenen Methoden vorgenommen werden. Bei der Kollektionsmethode wird der gesamte Kot gesammelt und die Verdaulichkeit über die quantitative Erfassung der Nährstoffmenge im Futter und im Kot bestimmt. Wird nach der Markermethode verfahren, müssen die Faeces nur teilweise gesammelt werden, die Verdaulichkeit wird über die Bestimmung des Markers im Futter und im Kot ermittelt. Zur gegenseitigen Kontrolle können beide Methoden gleichzeitig angewandt werden (KAMPHUES et al. 1999).

## **2.2 Schätzverfahren zur Ermittlung der DE**

Die verdauliche Energie kann geschätzt werden. Hierbei werden unterschiedliche Methoden zur Abschätzung der Verdaulichkeit der Futtermittel angewandt.

### **2.2.1 Verwendung von Tabellenwerten für die Verdaulichkeit**

Prinzipiell kann die verdauliche Energie eines Mischfutters durch Addition der verdaulichen Energie der Einzelfuttermittel abgeschätzt werden. Für einige Tierarten existieren Futterwerttabellen, in welchen auch Daten zur Verdaulichkeit von verschiedenen Futtermitteln aufgeführt sind, z.B. die Tabellenwerke der DLG. Für die Abschätzung der verdaulichen Energie in Rattenfutter stehen bislang zu wenig Werte für Einzelfuttermittel zur Verfügung, um solche Tabellen zu erstellen. Außerdem berücksichtigt die additive Berechnung der verdaulichen Energie weder Interaktionen zwischen Nährstoffen, z.B. mit faserreichen Futtermitteln, noch Effekte des Processings oder des Autoklavierens.

### **2.2.2 Verwendung von Faktoren für die Rohnährstoffe**

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der verdaulichen Energie stellt die Verwendung von Faktoren für die einzelnen Rohnährstoffe dar. Diese Faktoren spiegeln den Brennwert und die mittlere Verdaulichkeit der Rohnährstoffe wieder. Sie werden durch die Auswertung von möglichst vielen Verdauungsversuchen mittels Regressionsanalyse ermittelt. Dabei wird die DE als abhängige Variable und die Rohnährstoffe (außer Rohasche) als unabhängige Variable eingesetzt. Aus offensichtlichen Gründen kann dieser Weg nur dann eine sinnvolle Schätzung ergeben, wenn die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe nur geringe Schwankungen aufweist, da sonst Futtermittel mit überdurchschnittlichen Verdaulichkeiten unter- und solche mit unterdurchschnittlicher Verdaulichkeit überschätzt werden. Dies konnte von KIENZLE et al. (1999) für Hund und Katze demonstriert werden. Auch hierbei

werden Interaktionen nicht oder nur ungenau erfasst. So erhielt in den ermittelten Schätzgleichungen der Wert für die Rohfaser ein negatives Vorzeichen, was als Ausdruck des durch diesen Nährstoff bedingten Rückgangs der Verdaulichkeit interpretiert werden kann (KIENZLE et al., 1999). ZEYNER und KIENZLE (2002) entwickelten und bestätigten eine Schätzgleichung zur Ermittlung des Gehaltes an verdaulicher Energie in Pferdefutter. Sie verglichen die Werte der experimentell bestimmten DE mit denen der berechneten DE und stellten fest, dass die Schätzgleichung nicht bei allen Rationen angewandt werden konnte. Rationen mit erhöhtem Fettgehalt (> 5 %) oder einem hohem Anteil an hochverdaulicher Faser tendierten dazu, unterschätzt zu werden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung lieferte die Anwendung der entwickelten Schätzgleichung jedoch befriedigende Ergebnisse bei der Ermittlung der DE, unabhängig davon, ob es sich um Rationen mit hohem oder niedrigem Energiegehalt handelte.

### **2.2.3 Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand des Fasergehaltes**

Eine Schätzung des Gehaltes an verdaulicher Energie im Futter ist über die scheinbare Verdaulichkeit der Bruttoenergie (GE) möglich:  
$$DE = GE * sV GE / 100$$

KIENZLE et al. (1998a) überprüften bei Hund und Katze den direkten Einfluss der Faser auf die Verdaulichkeit der Energie. Dabei ließen sich Schätzformeln zur Ermittlung der scheinbaren Verdaulichkeit der Bruttoenergie in Abhängigkeit des Fasergehaltes aufstellen. Die verdauliche Energie (DE) wurde dann nach der Formel  $DE = GE * sV GE / 100$  berechnet. Diese Methode war der Berechnung mittels Faktoren für die Rohnährstoffe nur dann überlegen, wenn die Bruttoenergie im Bombenkalorimeter bestimmt wurde.

ZEYNER et al. (1992) ermittelten auf der Basis der Verdaulichkeitsschätzungen Gleichungen zur Berechnung des Gehaltes an verdaulicher Energie in Pferdefutter. Dabei lehnten sie die Verwendung der Rohfaser zur Erstellung von Regressionen zur Ermittlung der scheinbaren Verdaulichkeit der Energie als zu ungenau ab. Sie propagierten die Verwendung des ADL-Gehaltes als Depressor, was mit einem wesentlich geringeren Schätzfehler behaftet war. Damit wurde die Detergentienfaserfraktionierung des Futters als unerlässlich betrachtet. Diese Energiewertschätzung über eine Ermittlung der verdaulichen Energie über den ADL-

Gehalt war jeder Variante einer Schätzung über die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe überlegen.

### **3. Umsetzbare Energie (ME)**

#### **3.1 Experimentelle Bestimmung der ME - Energiewechselmessung**

Zur Messung des Energiewechsels stehen verschiedene Methoden zur Verfügung.

Das Prinzip der direkten Kalorimetrie basiert auf der direkten Messung der vom Tier abgegebenen Wärmemenge, was über Wärmeleiter, welche um die Tierkammer installiert sind, erfolgen kann. Aufgrund des hohen Aufwandes, kommt dieses Verfahren jedoch kaum zum Einsatz.

Bei der indirekten Kalorimetrie wird der Stoffumsatz im Tier gemessen. Die dabei gebildete Wärme als Folge der schrittweise ablaufenden Oxidationsprozesse steht in Beziehung mit dem Sauerstoffverbrauch und der Kohlendioxidproduktion. Kennt man für ein Substrat die bei der Oxidation je Liter Sauerstoff frei werdende Wärmemenge (=Wärmeäquivalent), lässt sich aus dem Sauerstoffverbrauch die auftretende Wärmemenge bestimmen. Aus den oxidierten Mengen an Proteinen, Kohlenhydraten und Fetten ergibt sich somit die gesamte, vom Tier gebildete Wärmemenge. Um zu erfahren, wie viel von diesen Substanzen im Körper abgebaut wurden, bezieht man die N-Ausscheidung und den respiratorischen Quotienten (RQ) in die Überlegungen mit ein. Der bei der Oxidation von Aminosäuren verbleibende Stickstoff wird in Harnstoff überführt und über die Nieren ausgeschieden. Über die im Urin bestimmte Menge an Stickstoff kann somit unmittelbar auf die abgebaute Menge an Protein geschlossen werden. Anschließend kann über das molare Verhältnis von abgegebenem Kohlendioxid zu aufgenommenem Sauerstoff (=RQ) die Menge an umgesetzten Kohlenhydraten und Fetten berechnet werden. Des Weiteren muss bei der Berechnung der Wärmeproduktion die Fermentationswärme berücksichtigt werden, welche über die Methan- und Wasserstoffproduktion charakterisiert ist. Befindet sich das Tier im Equilibrium, entsprechen die Energiewerte von Futter, Kot, Harn und der Gärgase der umsetzbaren Energie.

Um die im Tierkörper angesetzten oder die körpereigenen abgebauten Substrate bestimmen zu können, wird das Verfahren der indirekten Kalorimetrie mit der Kohlenstoff- und Stickstoffbilanz (C-N-Bilanz) kombiniert. Es werden die

aufgenommenen C- und N-Mengen den ermittelten C- und N-Verlusten über Kot, Harn, Kohlendioxid und den Gärgasen gegenübergestellt. Bei der Berechnung des energetischen Ansatzes oder Abbaus wird Protein und Fett jeweils ein durchschnittlicher C- und N-Anteil unterstellt, die Kohlenhydratfraktion bleibt unberücksichtigt. Aus der Differenz der umsetzbaren Energie und der angesetzten Energie kann die Wärmeproduktion im Körper berechnet werden (KIRCHGÄSSNER, 1997; JEROCH et al., 1999).

Es stehen verschiedene Techniken der Gaswechsellmessung zur Verfügung. Das Versuchstier befindet sich in einer sogenannten Respirationsskammer, der Verbrauch an Sauerstoff und die Produktion von Kohlendioxid und Gärgasen wird gemessen. Sowohl im geschlossenen System als auch mit der Methodik des offenen Belüftungssystems ist unter anderem eine ständige Kontrolle der eingeleiteten Luft sowie des in der Kammer bestehenden Druckes notwendig. Dies macht deutlich, dass diese Methode der Messung der umsetzbaren Energie sehr aufwendig ist. Die Bestimmung der ME kann beim Monogastrier mit mäßiger Dickdarmverdauungskapazität dahingehend vereinfacht werden, dass die Produktion von Gärgasen unberücksichtigt bleibt und lediglich die Energie von Kot und Harn von der Bruttoenergie abgezogen wird. Dabei wird die Energie von Futter, Kot und Harn mittels Bombenkalorimetrie bestimmt.

Zur weiteren Vereinfachung der Versuchstechnik kann zunächst die verdauliche Energie bestimmt werden, die Stickstoffverluste mit dem Harn über eine N-Korrektur berücksichtigt und somit der Gehalt an umsetzbarer Energie abgeschätzt werden. (s. Kapitel II A 3.3.1)

## **3.2 Schätzverfahren zur Ermittlung der ME**

### **3.2.1 Verwendung von Faktoren für die Rohnährstoffe**

Der Gehalt an umsetzbarer Energie in Rattenfutter kann mit Hilfe der physiologischen Brennwerte für die Rohnährstoffe berechnet werden. Diese Werte basieren auf mathematischen Berechnungen aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Inhaltsstoffe des Futters. Es wird jeweils der prozentuale Anteil von Protein und Kohlenhydrate, die Rohfaser ausgeschlossen, mit 4 kcal/g multipliziert, der prozentuale Fettanteil mit 9 kcal/g. Diese sogenannten physiologischen Brennwerte wurden jedoch für die Bewertung der menschlichen

Nahrung entwickelt. SUZUKI et al. (1990) führten Untersuchungen zur Schätzung der umsetzbaren Energie in kommerziellen Futter für Laborratten durch. Sie verglichen die Ergebnisse der Abschätzung anhand der physiologischen Brennwerte mit den Werten der stickstoffkorrigierten DE. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Verwendung der physiologische Brennwerte zu einer Überschätzung sowohl der Verdaulichkeit der Nährstoffe als auch der umsetzbaren Energie führt.

### 3.2.2 Verwendung von Faktoren für Rohnährstoffe, Stärke und Zucker

Da das Schwein ebenfalls zu den Omnivoren zählt und eine besser untersuchte Species darstellt als die Ratte, wird im Analogieschluss die Formel zur Schätzung der umsetzbaren Energie (ME) in Mischfutter für Schweine verwendet. Hierfür werden in die von der GfE 1987 empfohlene Gleichung die analysierten Rohnährstoffgehalte sowie Stärke- und Zuckergehalte in g/kg eingesetzt:

$$ME \cdot 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 22,3 R_p + 34,1 R_{fe} + 17,0 \text{ Stärke} + 16,8 \text{ Zucker} + 7,4 oR - 10,9 R_{fa}$$

Rohnährstoffe in g/kg TS

Der organische Rest (oR) ist definiert als die organische Substanz abzüglich der Summe aus Rohprotein, Rohfett, Stärke, Zucker und Rohfaser. Richtige Schätzergebnisse sind allerdings nur zu erwarten, wenn die Anwendung dieser Gleichung bei Schweinefuttern erfolgt, deren Zusammensetzung sich innerhalb folgender Schwankungsbereiche bewegen: 9-35,5% Rohprotein, 1-8% Rohfett, 2,2-14,6% Rohfaser, 36-74% N-freie Extraktstoffe, 10,4-16,3 MJ ME/kg (GfE 1996). Zusätzlich empfiehlt der Ausschuss für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (1996) die oben genannte Gleichung auch für proteinreiche Ergänzungsmittel.

Ob die Anwendung dieser Schätzgleichung bei Ratten prinzipiell möglich ist, muss noch durch Experimente abgeklärt werden. Die Rohnährstoffgehalte in den meisten Futtermitteln für Laborratten dürften jedoch weitgehend innerhalb der oben angegebenen Schwankungsbereiche liegen. Hinsichtlich der ME kann es vor allem bei halbsynthetischen Diäten zu Überschreitungen des oberen Grenzbereiches kommen.

### **3.3 Kombinierte Verfahren zur Ermittlung der ME**

Zur Ermittlung der umsetzbaren Energie (ME) in Futtermitteln stehen auch Verfahren zur Verfügung, die eine Kombination aus experimenteller Bestimmung und Schätzverfahren darstellen.

#### **3.3.1 Bestimmung der DE mit anschließender N-Korrektur**

Eine Möglichkeit, die umsetzbare Energie (ME) abzuschätzen, stellt die Bestimmung der verdaulichen Energie (DE) dar, die durch eine Schätzformel korrigiert wird. Zunächst wird der Energiegehalt des Futtermittels auf der Stufe der DE bestimmt. Um dem Energieverlust, der mit der Ausscheidung von Stickstoff über den Harn einhergeht, Rechnung zu tragen, wird eine N-Korrektur der DE vorgenommen. Da es sich bei den Verlusten hauptsächlich um Proteinabbauprodukte handelt, ist eine Bestimmung anhand des Proteingehaltes im Futter und der Verdaulichkeit des Proteins möglich.

IMAI et al. (1986) zeigten in Untersuchungen mit Ratten, dass der Energiegehalt des Urins proportional zu dessen Stickstoffgehalt ist und berechneten den Energiegehalt des Urins durch Multiplikation des Gehaltes an Stickstoff im Harn mit dem Faktor 7,9 kcal/g N, was einem Faktor von 5,2 kJ/g verdauliches Protein entspricht. Dieser Faktor basiert auf weit zurückliegenden Untersuchungen zur Energiebewertung (RUBNER, 1901, ATWATER, 1902). Sie beobachteten einen auch bei Hunger gleichbleibenden Energieverlust über den Harn von 2,22 KJ pro 100g Körpermasse und Tag. Der Stickstoff, welcher beim Abbau des Futterproteins anfällt, wird wie bei Säugern üblich, als Harnstoff über den Urin ausgeschieden. Es erscheint berechtigt, bei Ratten die umsetzbare Energie nach der Gleichung  $ME = DE - 5,2 \cdot vRp$  (Nährstoff in g/kg TS) zu berechnen.

#### **3.3.2 Ermittlung der ME anhand der verdaulichen Nährstoffe**

Im Analogieschluss zu anderen omnivoren, besser untersuchten Species kann die ME auch anhand einer kombinierten Methode aus experimenteller Bestimmung und Schätzverfahren ermittelt werden. Zunächst erfolgt die experimentelle Bestimmung der Verdaulichkeiten der Rohnährstoffe im Verdauungsversuch. Die ermittelten Werte werden in die Gleichung für die Berechnung der umsetzbaren Energie von Futtermitteln für Schweine (GfE 1987) eingesetzt:

$$\text{ME } 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 21,0 \text{ vRp} + 37,4 \text{ vRfe} + 14,4 \text{ vRfa} + 17,1 \text{ vNfE} - 1,4 \text{ Zucker} - 6,8$$

(BFS-100)

(verdauliche) Nährstoffe in g/kg TS

Die ME wird um den Teil an bakteriell fermentierbarer Substanz (BFS) korrigiert, der den Gehalt von 100 g BSF/kg Futter-TS überschreitet. Die BFS ist definiert als die Summe von verdaulichen N-freien Extraktstoffen und verdaulicher Rohfaser, abzüglich der Gehalte an Stärke und Zucker. Es handelt sich hauptsächlich um Hemicellulosen, Pentosane und Pectine. Diese pflanzlichen Gerüstsubstanzen werden durch Mikroben im Dickdarm des Tieres abgebaut, wobei Gärgase, Gärgaswärme und flüchtige Fettsäuren (FFS) entstehen. Im Vergleich zu den Produkten der Hydrolyse von Stärke und Zucker besitzen diese FFS im Intermediärstoffwechsel eine geringere Effizienz. Die insgesamt hieraus resultierenden Energieverluste werden auf 40 % geschätzt. Der energetische Wert der im Dickdarm fermentierten BFS-Fraktion entspricht damit nur 60 % des Energiewertes der im Dünndarm durch körpereigene Enzyme verdauten und resorbierten Kohlenhydrate. Bei der Berechnung der ME wird diese verminderte Nutzung der Energie durch ein entsprechendes Abzugsglied berücksichtigt ( $6,8 \text{ kJ} \cdot (\text{g BFS} - 100)$ ). Der Korrekturfaktor für den BFS-Abzug resultiert aus dem Energiegehalt der Stärke und der Verminderung der energetischen Verwertung durch die bakterielle Umsetzung im Dickdarm ( $17,1 \text{ kJ} \cdot 0,4 = 6,8 \text{ kJ}$ ) (KIRCHGÄSSNER, 1997, JEROCH et al. 1999).

Bei zuckerreichen Futtermitteln (ab 80 g/kg TS) wird zusätzlich für den gesamten Zuckergehalt eine Korrektur vorgenommen. Da der Bruttoenergiegehalt von Mono- und Disacchariden durchschnittlich um 1,4 kJ/g niedriger liegt als der von Stärke, wird ein entsprechendes Glied von den verdaulichen N-freien Extraktstoffen abgezogen (KAMPHUES et al., 1999).

Es wird somit unterstellt, dass sowohl die Stärke als auch Zucker im Dünndarm zu 100 % verdaulich sind. Für Schweine wurde dies in zahlreichen Verdauungsversuchen mit Stärke aus verschiedenen Quellen wie Weizen, Hafer, Gerste, Mais, Erbsen und Sorghumhirse, in denen die Stärke annähernd vollständig praecaecal verdaut wurde, gezeigt (LIN et al., 1987, KNUDSEN et al., 1993, EVERTS et al., 1996, JAAP et al., 2001). Lediglich bei Corn Cob Mix-Rationen



wurden für die Stärke niedrigere Verdaulichkeiten von minimal 93 % ermittelt (NOLL et al., 1989). Bei der Ratte wurden Gesamtverdaulichkeiten der Stärke von Weizen sowie verschiedenen Bohnen und Linsen von annähernd 100 % ermittelt (FLEMING und VOSE, 1979, LARSEN et al., 1991). BAUER et al. (2003) bestimmten in Finalversuchen mit Ratten die praecaecalen Verdaulichkeiten von Stärke verschiedenen Ursprungs. Am Ende des Ileums waren Maisstärke, Maltodextrin sowie hydrogeniertes Maltodextrin fast vollständig verdaut. Dahingegen wiesen Amylomaistärke und Pullulan, eine Stärke bakteriellen Ursprungs, geringere Verdaulichkeiten auf.

In Futtermitteln für Laborratten liegt der Zuckergehalt meist unter dem angegebenen Wert von 8 % der Trockensubstanz. Dahingegen überschreitet der Anteil an bakteriell fermentierbarer Substanz normalerweise die Grenze von 10 % in der Trockensubstanz, es muss daher ein BFS-Korrektur der ME vorgenommen werden.

## **B. VERDAULICHKEIT VON FUTTERMITTELN BEI RATTEN**

### **1. Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der Proteine**

Bei den in Futtermitteln für Laborratten enthaltenen Proteinen handelt es sich meist um pflanzliche Proteine, wie sie in Getreide, Mais und Soja enthalten sind. Teilweise ist auch tierisches Eiweiß aus Milchprodukten und Fischmehl beigefügt. In halbsynthetischem Futter stellt meist Casein, ein milchspezifisches Polypeptid, die Proteinquelle dar.

#### **1.1 Die Verdauung der Proteine**

Die Verdauung der Proteine beginnt im Magen, wo bereits einige der Peptidbindungen durch Pepsin, welches als Pepsinogen sezerniert und durch die Salzsäure des Magens aktiviert wird, gespalten werden. Im Dünndarm werden die Polypeptide durch die proteolytischen Enzyme des Pankreas und der Darmmucosa weiter zerlegt. Die Endopeptidasen Trypsin, Chymotrypsin und Elastase spalten die Molekülketten der Eiweiße, die Exopeptidasen greifen die Proteine zusätzlich vom Molekülende her an, so dass die Peptide schließlich größtenteils in die einzelnen Aminosäuren zerlegt werden (SENOO 2000). Bei der Ratte findet die Verdauung und Resorption des Futterproteins in den distalen zwei Dritteln des Dünndarms statt (CURTIS et al., 1978).

#### **1.2 Scheinbare Verdaulichkeit von Protein**

Über die Verdaulichkeit von Protein bei Ratten liegen unterschiedliche Angaben vor. So schwankt laut SARWAR und PEACE (1986) die scheinbare Verdaulichkeit von Rohprotein je nach Proteinquelle und Proteingehalt des Futters zwischen 66 % und 94 %. Andere Autoren ermittelten mittlere Proteinverdaulichkeiten von 82 % (THORBECK et al., 1982) und von 84%, beziehungsweise 79% bei Rationen mit höherem Rohfasergehalt (LARSEN et al., 1991). Zuvor hatten NYMAN und ASP (1982) entdeckt, dass erhöhte Rohfasergehalte im Rattenfutter sowohl die scheinbare als auch die wahre Proteinverdaulichkeit senken. SHAH et al. (1982) sahen die Ursache hierfür in einer durch die Faser erhöhten faecale Ausscheidung von endogenem Protein und von Futterprotein.

## **2. Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der Fette**

Üblicherweise sind in Futtermitteln für Laborratten entweder Sojabohnen, Sonnenblumenkerne oder daraus gewonnene Öle zur Fettanreicherung enthalten. Bei den Futterfetten handelt es sich zum größten Teil um Triglyceride, einen geringeren Anteil stellen Cholesterinester, Phospholipide und die fettlöslichen Vitamine A, E, D und K.

### **2.1 Die Verdauung der Fette**

Die eigentliche Fettverdauung beginnt im Duodenum. Die Lipasen, Enzyme die hauptsächlich für die Fettspeisung verantwortlich sind, stammen aus dem Pankreassaft. Sie spalten die Esterbindung 1 und 3 der Triglyceride, als Hauptprodukte entstehen somit freie Fettsäuren und Monoglyceride. Voraussetzung hierfür ist eine großteils mechanische Emulgierung der Fette wie sie am Magenausgang geschieht. Die Lipide und Gallensalze schließen sich spontan zu Micellen zusammen, in deren hydrophoben Zentren sich Monoglyceride, freie Fettsäuren und Cholesterol befinden. Diese Micellenbildung stellt die Voraussetzung für eine normale Lipidabsorption der Mucosa dar, welche zu 95 % im Dünndarm stattfindet. Andere Fette wie Phospholipide, Cholesterinester und Ester der fettlöslichen Vitamine A, D, E, K werden ebenfalls im Dünndarm unter Mitwirkung von Pankreasenzymen wie Phospholipase und Cholesterinesterase angegriffen und die Spaltprodukte vom Dünndarmepithel absorbiert. Die kurzkettigen Fettsäuren gehen direkt ins Blut über. Aus langkettigen Fettsäuren werden in den Mucosazellen wieder Triglyceride gebildet, die zusammen mit Cholesterin, Phospholipiden und fettlöslichen Vitaminen in Chylomikronen eingebaut in die Darmlymphe gelangen (ENGELHARDT und BREVES 2000, SENOO 2000).

### **2.2 Scheinbare Verdaulichkeit der Fette**

THORBECK et al. (1982) ermittelten in Futtermitteln für Ratten mit Fettgehalten bis 4% scheinbare Verdaulichkeiten des Rohfettes zwischen 70 und 77 %. Die von EGGUM et al. (1982) beobachtete Fettverdaulichkeit lag ebenfalls bei knapp 70%, bei Rationen mit erhöhtem Rohfasergehalt nur bei 57,5 %. Dies deckt sich mit den Beobachtungen anderer Autoren, dass Faser im Futter die Fettresorption (MUNAKATA et al., 1995) sowie die Cholesterinresorption (BOREL et al., 1989) senkt.

### **3. Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der Kohlenhydrate**

Bei Rattenfuttern, die aus natürlichen Komponenten bestehen, stammen die verdaulichen Kohlenhydrate hauptsächlich aus Getreide und deren Nebenprodukten. Es handelt sich dabei um Stärke und Glucose. In halbsynthetischen Futtern kann gereinigte Stärke wie Maisstärke oder verschiedene Zucker wie Dextrose oder Sucrose enthalten sein. Außerdem können auch Nicht-Stärke-Polysaccharide vorhanden sein, die zum Teil mikrobiell abbaubar sind.

#### **3.1 Die Verdauung der Kohlenhydrate**

Die Verdauung von Stärke beginnt bei der Ratte bereits in der Mundhöhle. Die im Speichel vorhandene Amylase greift das Polysaccharid an, ihre Aktivität wird jedoch durch das saure Milieu im Magen unterdrückt. Im Dünndarm entstehen unter zusätzlicher Hilfe der Amylase des Pancreassaftes Oligosaccharide, die wiederum von Enzymen der Dünndarmmucosa in Hexosen und Pentosen gespalten werden. Diese Zucker werden schnell und nahezu vollständig von der Dünndarmschleimhaut resorbiert (SENOO 2000).

#### **3.2 Scheinbare Verdaulichkeit der Kohlenhydrate**

Stärke in Rattenfutter zeigt scheinbare Verdaulichkeiten von über 99 %, auch bei einem erhöhten Gehalt an unverdaulicher Faser in der Ration (LARSEN et al., 1991, BRUNSGAARD et al., 1995). THORBECK et al. (1982) ermittelten für die Fraktion der stickstofffreien Extraktstoffe (NfE) scheinbare Verdaulichkeiten von über 89 %. Zum selben Ergebnis kamen auch EGGUM et al. (1982). Bei Rationen mit einem erhöhtem Rohfasergehalt ermittelten sie jedoch niedrigere scheinbare NfE-Verdaulichkeiten von ungefähr 79 %, möglicherweise weil auch Faserbestandteile in der NfE-Fraktion auftauchen (NEHRING und HOFFMANN, 1969).

### **4. Verdauung und scheinbare Verdaulichkeit der pflanzlichen Gerüstsubstanzen**

Die pflanzliche Zellwand besteht aus unverdaulichen Polysacchariden, die nach CUMMINGS (1981) als Nicht-Stärke-Polysaccharide (NSP) bezeichnet werden und Lignin. Die NSP können wiederum in Cellulose und Nicht-Cellulose-Polysaccharide (NCP) aufgeteilt werden (SOUTHGATE et al., 1978). NCP beinhalten Hemicellulosen, Pectin, Speicherpolysaccharide wie Inulin und Guar, gummiartige

Stoffe und Schleimstoffe. Das Vorkommen von Faser ist in Futtermitteln meist eng mit dem von Stärke verbunden, wie zum Beispiel in Getreide. In Futtermitteln für Laborratten erhöhen meist Getreidenebenprodukte wie Weizenkleie aber auch Grünmehl den Fasergehalt. Halbsynthetischem Futter wird oft gereinigte Cellulose zugesetzt.

#### **4.1 Die Verdauung der pflanzlichen Gerüstsubstanzen**

Ratten besitzen keine Enzyme, welche die Verdauung von Faser ermöglichen. Trotzdem beinhalten auch diese Substanzen einen gewissen Nährwert, da sie von verschiedenen Mikroorganismen des Darmtraktes fermentiert werden und die hierdurch entstehenden flüchtigen Fettsäuren vom Körper energetisch genutzt werden können. Dies konnte durch vergleichende Untersuchungen der Faserverdauung von keimfreien und konventionellen Ratten gezeigt werden (ANDRIEUX und SACQUET 1986, JUHR und FRANKE, 1992). Diese Fermentation findet hauptsächlich im Caecum und Colon statt, wobei das Caecum der wichtigste Ort der mikrobiellen Umsetzung der Ratte ist (BACH KNUDSEN et al., 1983). In anderen Untersuchungen konnten im Dünndarm nur sehr wenig cellulosespaltende Bakterien nachgewiesen werden. Dahingegen waren große Mengen dieser Bakterien im Caecum aktiv und setzten die Cellulose um, hier wurde eine hohe Konzentration an flüchtigen Fettsäuren gefunden (MACY et al., 1882).

#### **4.2 Scheinbare Verdaulichkeit der pflanzlichen Gerüstsubstanzen**

Die scheinbare Verdaulichkeit der Faser zeigt sehr unterschiedliche Werte. THORBECK et al. (1982) ermittelten für die Rohfaser scheinbare Verdaulichkeiten zwischen 21 % und 29 %. EGGUM et al. (1982) erhielten in ihren Versuchen Werte von 19 %, bei Rationen mit hohem Rohfasergehalt nur 8 %. Bei der Bestimmung der scheinbaren Verdaulichkeit von anderen Nicht-Stärke-Polysacchariden rangierte der Anteil zwischen 44 % und 86 % (CARRE et al., 1989). Dabei waren die hohen Werte der Verdaulichkeit auf den hohen Gehalt an Pectin in der Ration und auf die Fähigkeit der Ratten, dieses in hohem Maße verdauen zu können, zurückzuführen. NYMAN und ASP (1985) beobachteten keinen offensichtlichen Einfluss der Partikelgröße von Faser auf deren Verdaulichkeit. Dagegen ermittelten HSU und PENNER (1989) für Cellulose sehr große Differenzen der Verdaulichkeit, welche auf die unterschiedliche Struktur der Cellulositypen beruhte. So betrug die scheinbare Verdaulichkeit von mikrokristalliner, mechanisch zerkleinerter und säuregequollener

Cellulose jeweils 8,8, 12,2 und 20,3 %. Die Verdaulichkeit von Cellulose dürfte auch bei der Ratte von dem Ligningehalt des Futters abhängen. Bei verschiedenen anderen Species wurde gezeigt, dass Lignin nahezu unverdaulich ist und die Verdaulichkeit der Cellulose beeinträchtigt (NEHRING und LAUBE, 1955, MÜLLER und BERGNER 1976, FLACHOWSKY und SUNDSTOL 1988).

## **5. Verdaulichkeit und scheinbare Verdaulichkeit der organischen Substanz**

Die organische Substanz (oS) besteht aus den Hauptnährstoffen Proteine, Fette und verdauliche sowie unverdauliche Kohlenhydrate.

THORBECK et al. (1982) ermittelten in Verdaulichkeitsversuchen mit Ratten eine mittlere scheinbare Verdaulichkeit der organischen Substanz von 84 %. Einen ähnlichen Wert von 83 % erhielten in ihren Untersuchungen auch EGGUM et al. (1982), bei Rationen mit einem hohen Rohfasergehalt sank die scheinbare Verdaulichkeit der organischen Substanz jedoch auf 68 %. Für verschiedenste Species vom Huhn bis zum Elefant wurde ein Zusammenhang zwischen dem Rohfasergehalt des Futters und der scheinbaren Verdaulichkeit der organischen Substanz aufgezeigt (KAMPHUES et al., 1999, CLAUSS et al., 2003). Je nach Menge und Art der Rohfaser genügt dieser Zusammenhang allerdings nicht, um eine Energiewertschätzung durchzuführen, da die Verdaulichkeit der Rohfaser und ihr Einfluss auf die Verdaulichkeit anderer Nährstoffe auch von ihrer Zusammensetzung abhängen. So wurde von NEHRING und LAUBE (1955) der Ligningehalt als ausschlaggebender Faktor, der die Verdaulichkeit der organischen Substanz negativ beeinflusst, ermittelt. ARGAWAL und CHAUHAN (1989) erhielten in Verdaulichkeitsversuchen mit Ratten für ligninreiche Futtermittel niedrigere Werte für die Verdaulichkeit der Trockensubstanz als für pectin- und cellulosereiche Futter.

### III. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

#### A. MATERIAL UND METHODEN

##### 1. Versuchsplan

In der vorliegenden Untersuchung sollten grundlegende Daten zur Energiebewertung auf der Stufe der verdaulichen Energie von Futtermitteln für Ratten gesammelt werden. Insbesondere wurde der Einfluss des Fasergehaltes und die Auswirkung des Autoklavierens der Futtermittel auf die Verdaulichkeit geprüft. Außerdem erfolgte ein Vergleich gängiger Haltungsfutter verschiedener Hersteller mit halbsynthetischen Produkten, mit einem Zuchtfutter und energiereduzierten Produkten. Zu diesem Zweck wurden dreizehn Verdauungsversuche mit Laborratten durchgeführt (Tabelle 8). Von drei verschiedenen Herstellern wurde jeweils ein Haltungsfutter autoklaviert und nicht autoklaviert getestet, außerdem eine Diät mit erhöhtem Rohfasergehalt, ebenfalls autoklaviert, und ein halbsynthetisches Experimentalfutter. Zudem wurde eine Versuchsgruppe mit autoklaviertem Zuchtfutter gefüttert.

Tabelle 8: Versuchsplan: Die verschiedenen Versuchsgruppen

	Hersteller 1	Hersteller 2	Hersteller 3
Haltungsfutter	H1	H2	H3
Haltungsfutter nicht autoklaviert	H1n	H2n	H3n
Haltungsfutter rohfaserreich	R1	R2	R3
purified diet	PD1n	PD2n	PD3n
Zuchtfutter	Z		

##### 2. Versuchstiere

Für die Versuche wurden ausschließlich männliche Lewis Ratten verwendet. Die Ratten wurden in dreizehn verschiedene Gruppen zu je sechs Tieren aufgeteilt. Die Tiere waren in der Kotsammelphase sechzehn Wochen alt, ihr durchschnittliches Körpergewicht betrug 335 Gramm, wobei die leichteste 248g und die schwerste 390g

wog. Eine Ausnahme bildeten die Tiere der Gruppe Z, hier waren die Ratten in der Kotsammelphase fünf Wochen alt und ihr Körpergewicht lag zwischen 95g und 99g.

### **3. Versuchsfutter**

Es handelte sich um pelletiertes Alleinfutter, welches den Ratten ad libitum angeboten wurde. Von jedem der drei Hersteller 1 bis 3 (jeweils hinter der Abkürzung der Diät) wurden je ein Haltungsfutter (H), einmal autoklaviert und einmal nicht autoklaviert (n), ein autoklaviertes, rohfaserreiches Futter (Reduktionsdiät R) und eine halbsynthetische Ration (purified diet PD), nicht autoklaviert (n), getestet. Außerdem wurde eine Gruppe mit autoklaviertem Zuchtfutter (Z) versorgt. Der Rohstoff- und Energiegehalt sowie der Chromoxidgehalt der verschiedenen Versuchsfutter ist in Tabelle 9 dargestellt. Zudem wurde der Stärke- und der Zuckergehalt der einzelnen Futtermittel (Tabelle 10), sowie ihr Mineralstoffgehalt (Tabelle 11) bestimmt. Der prozentuale Anteil der Faserfraktionen in den Futtern ist aus Tabelle 12 ersichtlich. Außer der purified diet war jedem Futter Chromoxid als Marker zugesetzt worden. Bei den halbsynthetischen Futtermitteln war dies nicht möglich, da hier die Markereinmischung zu verminderter Haltbarkeit des Futters führte.



Tabelle 9: Rohrnährstoff- und Energiegehalt, Chromoxidgehalt der Futtermittel

Futter	<b>TS (%)</b>	<b>Rp (%/TS)</b>	<b>Rfe (%/TS)</b>	<b>Ra (%/TS)</b>	<b>Rfa (%/TS)</b>	<b>NfE (%/TS)</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%/TS)</b>	<b>GE (MJ/kg TS)</b>
Z	91,5	23,33	4,51	6,7	3,95	62,44	0,28	18,94
H1	91,5	19,84	2,43	7,39	5,01	65,34	0,38	17,64
H2	91,81	20,26	1,34	7,47	6,04	64,89	0,36	18,09
H3	91,79	18,9	2,21	7,06	7,41	64,52	0,39	18,51
H1n	91,52	20,3	3,9	7,28	4,82	63,7	0,39	17,83
H2n	90,27	20,05	1,82	7,54	6,04	64,56	0,38	18,09
H3n	92,22	18,96	2,11	6,93	5,69	66,22	0,39	17,80
R1	93,20	15,16	3,13	7,28	17,45	56,99	0,41	18,75
R2	91,96	18,74	2,03	9,14	11,33	58,7	0,38	18,06
R3	93,62	18,13	2,22	7,38	8,94	63,33	0,41	17,89
PD1n	92,74	18,99	2,55	4,99	3,40	70,06	0,0	18,28
PD2n	88,77	22,21	3,49	5,32	6,54	62,43	0,0	18,02
PD3n	91,95	19,04	7,33	2,75	3,75	67,16	0,0	19,76

Tabelle 10: Stärke- und Zuckergehalt der Futtermittel

Futter	<b>Stärke (%/TS)</b>	<b>Zucker (%/TS)</b>
Z	33,59	4,85
H1	29,19	6,44
H2	34,95	4,40
H3	34,46	3,14
H1n	30,27	7,08
H2n	34,62	4,73
H3n	34,51	4,30
R1	20,76	5,35
R2	27,72	3,81
R3	28,92	4,69
PD1n	48,54	12,03
PD2n	47,44	7,08
PD3n	35,76	4,37

Tabelle 11: Natrium,- Kalium,- Calcium- und Phosphorgehalt der Futtermittel

Futter	Na (g/kg TS)	K (g/kg TS)	Ca (g/kg TS)	P(g/kg TS)
Z	2,50	11,81	9,68	8,75
H1	3,55	12,37	10,02	7,98
H2	2,67	11,19	9,60	7,99
H3	2,27	9,17	11,99	9,60
H1n	3,52	12,31	9,99	8,24
H2n	2,89	11,45	9,59	7,72
H3n	2,21	9,10	11,86	9,42
R1	2,42	15,07	10,35	6,86
R2	2,80	14,97	14,19	6,77
R3	3,50	11,54	10,14	7,50
PD1n	2,93	7,60	9,39	8,87
PD2n	1,31	10,29	8,38	9,67
PD3n	2,50	4,25	5,30	4,55

Tabelle 12: NDF-, ADF-, ADL-, Cellulose- und Hemicellulosegehalte im Futter

Futter	NDF (%/TS)	ADF (%/TS)	ADL (%/TS)	Cellulose (%/TS)	Hemicellulose (%/TS)
Z	19,62	4,29	0,11	4,17	15,34
H1	27,37	5,49	1,13	4,36	21,87
H2	24,84	6,37	0,84	5,52	18,48
H3	32,24	9,62	4,21	5,41	22,62
H1n	19,63	5,17	0,58	4,58	14,46
H2n	20,68	6,49	0,76	5,73	14,19
H3n	25,06	7,16	1,60	5,56	17,90
R1	38,14	17,92	3,33	14,59	20,23
R2	29,06	11,31	2,12	9,18	17,76
R3	34,69	9,92	1,46	8,46	24,77
PD1n	5,77	3,46	0,00	3,46	2,31
PD2n	14,21	7,56	3,45	4,11	6,66
PD3n	6,84	2,89	0,00	2,89	3,95

## **4. Versuchstechnik**

### **4.1 Tierhaltung**

Während des gesamten Versuchszeitraums wurden die Ratten einzeln in Makrolonkäfigen Typ III ohne Einstreu gehalten. Um eine Trennung von Kot und Urin zu gewährleisten, wurden Lochbleche, durch die der Urin abfließen konnte, eingelegt. Die Umgebungstemperatur betrug konstant 22° Celsius (+/-1,5° C) bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 % (+/- 5 %). Täglich wechselten sich vierzehn Stunden künstliche Beleuchtung mit einer Dunkelphase von zehn Stunden ab. Den Ratten wurde das Futter ad libitum angeboten, außerdem hatten sie jederzeit uneingeschränkten Zugang zu vollentsalztem, autoklaviertem Wasser.

### **4.2 Versuchsablauf**

Die Versuchszeit gliederte sich, je nach Versuchsgruppe, in zwei unterschiedlich lange Phasen, in die Anfütterungsphase und in die eigentliche Kotsammelperiode (Tabelle 13).

Während der Anfütterungsphase, in der ausschließlich das zu untersuchende Testfutter angeboten wurde, erfolgte alle zwei bis drei Tage eine Kontrolle des Körpergewichts und der aufgenommenen Futtermenge. Diese Phase diente zur Adaptation an das Testfutter und sollte gewährleisten, dass die Ingesta während der Kotsammelperiode ausschließlich dieses Futter enthielt. Gegen Ende wurde einmalig von jedem Tier der pH-Wert des Kotes bestimmt.

Während der Kotsammelperiode wurde jeden Tag die aufgenommene Futtermenge und Wassermenge registriert. Es wurde täglich der Kot gesammelt, gewogen und tiefgefroren, wobei bei den Versuchsgruppen, die mit markiertem Versuchsfutter gefüttert wurden, mindestens achtzig Prozent des anfallenden Kotes, bei den restlichen Versuchsgruppen der gesamte Kot erfasst wurde. Da hier trotzdem die anfallende Kotmenge sehr gering erschien, wurde die Zeit der Kotsammelperiode bei diesen Gruppen verdoppelt. Auch von den Ratten der Gruppe Z wurde der Kot vollständig gesammelt, um einen Vergleich zwischen der Kollektionsmethode und der Markermethode anstellen zu können. Zudem wurde weiterhin bei allen Tieren die Gewichtsentwicklung kontrolliert.

Tabelle 13: Dauer der Anfütterungsphase und der Kotsammelperiode der einzelnen Futtertypen

	Anfütterungsphase	Kotsammelperiode
Haltungsfutter, autoklaviert	14 Tage	5 Tage
Haltungsfutter, nicht autoklaviert	14 Tage	5 Tage
Haltungsfutter, rohfaserreich	14 Tage	5 Tage
purified diet	14 Tage	10 Tage
Zuchtfutter	6 Tage	5 Tage

## 5. Probennahme

### Futter

Von jedem Futtermittel, das sich im Test befand, wurde auf die gleiche Weise eine Probe gewonnen: Bei jeder neuen Befüllung der Futterraufen wurde aus dem Futtersack eine Futterprobe entnommen. Diese Einzelproben wurden zu einer Sammelprobe vermischt, aus der dann die Endprobe, welche getrocknet und gemahlen den Analysen zugeführt wurde, gezogen wurde.

### Kot

Während der Kotsammelperiode wurde täglich von jedem Tier der Kot separat gesammelt und bis auf zwei Kommastellen grammgenau gewogen. Sofort im Anschluss wurde er bei  $-24^{\circ}$  Celsius eingefroren.

## 6. Prüfparameter

### Futter

- Rohnährstoffe  
(Trockensubstanz (TS), Rohasche (Ra), Rohprotein (Rp), Rohfett (Rfe), N-freie Extraktstoffe (NfE), Rohfaser (Rfa), organische Substanz (oS))
- Stärke und Zucker
- Faseranalyse nach van SOEST  
(Neutral detergent fiber (NDF), Acid detergent fiber (ADF), Acid detergent lignin (ADL))

- Bruttoenergie (GE)
- Mineralstoffe  
(Natrium (Na), Kalium (K), Calcium (Ca), Phosphor (P))
- Chromoxid (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

#### Kot

- Rohnährstoffe  
(Trockensubstanz (TS), Rohasche (Ra), Rohprotein (Rp), Rohfett (Rfe), Rohfaser (Rfa), N-freie Extraktstoffe (NfE), organische Substanz (oS))
- Bruttoenergie (GE)
- Mineralstoffe  
(Natrium (Na), Kalium (K), Calcium (Ca), -Phosphor (P))
- Chromoxid (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- pH-Wert

#### Scheinbare Verdaulichkeit der TS, oS, der Rohnährstoffe, Mineralstoffe und der GE

#### Verdauliche Energie (DE)

### **7. Angewandte Untersuchungsmethoden**

Alle Proben wurden bei 103°C im Trockenschrank getrocknet, fein gemahlen und bis zur weiteren Analyse in gut verschließbaren Plastikbehältern aufbewahrt.

Die Untersuchungen erfolgten im Institut für Physiologie, Physiologische Chemie und Tierernährung der LMU München. Ausnahmen stellen die Faseranalytik dar, welche im Institut für Zoo- und Wildtierforschung (IZW) Berlin durchgeführt wurde sowie die Bestimmung des Stärke- und Zuckergehaltes durch das Institut für Tierernährung der Tierärztlichen Hochschule Hannover.

## 7.1 Bestimmung der Rohnährstoffe in Futter und Kot

Die Bestimmung der Rohnährstoffe in den verschiedenen Futtermitteln und im Kot erfolgte nach den Vorschriften der Weender Futtermittelanalyse nach der von BASSLER et al. (1976) beschriebenen Methode.

### Trockensubstanz(TS)

Alle Proben wurden mindestens vier Stunden im Trockenschrank bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Dies erfolgte nach dem Vermahlen erneut.

### Rohasche(Ra)

Rückstand nach sechsständiger Veraschung im Muffelofen bei 550 °C.

### Rohprotein(Rp)

Bestimmung erfolgte nach dem Kjeldahlverfahren als Doppelbestimmung. Zunächst 50 Minuten Oxidation der Probe mit 95%iger Schwefelsäure bei 410°C im FOSS Digester 2020 unter Zugabe von Kalium- und Kupfersulfattabletten, wobei der Stickstoff in Ammonium überführt wurde. Im FOSS Kjeltac™ 2400 durch Zugabe von 32%iger Natronlauge Freisetzung von Ammoniak, der in vorgelegte Säure überdestilliert und titrimetrisch erfasst wurde. Berechnung des Gehaltes an Rohprotein aus dem Gehalt an Stickstoff (Rohprotein=N\*6,25).

### Rohfett(Rfe)

Zunächst Aufschluss der Probe mit konzentrierter Salzsäure, Filtration und Trocknung, dann achtstündige Extraktion mit Petroläther im Soxhletapparat; Gewichtsbestimmung.

### Rohfaser(Rfa)

Bestimmung erfolgte als Doppelbestimmung im Fibertec® durch jeweils 30-minütiges Kochen in 1,25 %iger Schwefelsäure und 1,25 %iger Natronlauge. Zwischen und nach den Kochungen Filtration und gründliches Waschen mit heißem destilliertem Wasser. Entfettung im Kaltextraktionsgerät mit Aceton. Filter und Rückstand wurden bei 103 °C getrocknet, gewogen und bei 500 °C im Muffelofen verascht. Subtraktion des Aschewertes vom Trockengewicht zur Korrektur auf die Trockensubstanz der vorbereiteten Proben.

### N-freie Extraktstoffe(Nfe)

Rechnerische Ermittlung:  $NfE = TS - (Ra + Rfe + Rfa + Rp)$

### Organische Substanz(oS)

Rechnerische Ermittlung:  $oS = TS - Ra$

## **7.2 Bestimmung der Stärke und Zucker im Futter**

Die Bestimmung von Stärke und Zucker erfolgte jeweils nach der von BASSLER et al. (1976) beschriebenen amtlichen Methode.

### Stärke

Das Prinzip beruht auf einer doppelten Bestimmung. Bei der ersten Bestimmung wird die Probe mit verdünnter Salzsäure versetzt und mittels Wasserbad 15 Minuten lang auf Siedetemperatur erhitzt. Dadurch wird die Stärke in Lösung gebracht und teilweise hydrolysiert. Nach Abkühlung auf 20° Celsius, Klärung und Filtration wird die optische Drehung der Lösung in einem 200-mm-Rohr mit einem Polarimeter oder Saccharimeter gemessen. Bei der zweiten Bestimmung wird die Probe mit 40 %igem Ethanol extrahiert und danach filtriert, das Filtrat wiederum mit Salzsäure erhitzt, geklärt und filtriert. Die Messung der optischen Drehung erfolgt unter gleichen Bedingungen wie die erste Bestimmung, der Unterschied zwischen den beiden Messungen, multipliziert mit einem je nach Stärkeart variierenden Faktor, ergibt den Stärkegehalt der Probe.

### Zucker

Die Zucker werden in 40 %igem Ethanol gelöst und die Lösung geklärt. Bestimmung der reduzierenden Zucker nach dem Verfahren nach LUFF-SCHOORL durch Titration. Bestimmung des Gesamtzuckers nach Inversion durch Erhitzen der Probe mit Salzsäure. Nach Zugabe von Natronlauge wird wiederum der Gehalt an reduzierenden Zuckern nach LUFF-SCHOORL bestimmt.

## **7.3 Bestimmung der Acid Detergent Fibre, Neutral Detergent Fibre und des Acid Detergent Lignin im Futter**

Es wurde die Faseranalyse nach VAN SOEST (1967) durchgeführt. Das Prinzip der Methode ist eine fraktionierte Waschung der Trockensubstanz mit verschiedenen Lösungen. Als erstes werden die Zellwandbestandteile und die Zellinhaltsstoffe voneinander getrennt. Weitere Schritte dienen zur Zellwandanalyse. Für die Trennung dieser Fraktionen (lösliche Bestandteile, Lignocellulose, Hemicellulose) werden ein neutrales und ein saures Detergenz verwendet. Die neutrale

Detergenzlösung lässt die gesamten Zellwandbestandteile (NDF) zurück, während die saure Detergenzlösung die Lignocellulose (ADF) isoliert. Die Behandlung von ADF mit 72%iger Schwefelsäure löst die Cellulose. Durch Veraschen des Rückstandes wird der Ligninanteil einschließlich Cutin bestimmt.

#### 7.4 Bestimmung der Bruttoenergie in Futter und Kot

Die Bruttoenergie wurde experimentell im Bombenkalorimeter bestimmt. Es kamen zwei verschiedene Kalorimeter zum Einsatz:

1. Das IKA-Kalorimeter C4000 adiabatic
2. Das IKA-Kalorimeter C1000.

In allen Fällen wurde die Probe in ein Verbrennungstütchen eingewogen und in dem Aufschlussgefäß, welches mit 30 bar Sauerstoff befüllt wurde, vollständig verbrannt. Aus der hieraus resultierenden Temperaturerhöhung wurde der Brennwert (H) folgendermaßen berechnet:

$$H = \frac{C * \Delta T - Q_F}{m_p}$$

H (J/g) = Brennwert

C (J/K) = Wärmekapazität des Kalorimeters

$\Delta T$  (K) = gemessene Temperaturerhöhung

$Q_F$  (J) = Summe aller Fremdenergien

$m_p$ (g) = Gewicht der zu bestimmenden Substanz

Es wurden jeweils mindestens fünf Einzelbestimmungen durchgeführt und der Mittelwert der Brennwerte berechnet.

#### 7.5 Bestimmung des Chromoxidgehaltes in Futter und Kot

Der Gehalt an Chromoxid ( $Cr_2O_3$ ) wurde mittels Spektralphotometer bestimmt. Der Aufschluss erfolgte durch Kochen der Analyseproben mit dem Oxidationsgemisch, welches Natriummolybdat, konzentrierte Schwefelsäure und Perchlorsäure enthielt. Nach dem Abkühlen nochmaliges Kochen mit 70%iger Perchlorsäure. Fällung der Lösung mit 32%iger Natronlauge. Nach mehrmaligem Zentrifugieren wurde im Überstand der Gehalt an Chromat bei 366 nm photometrisch bestimmt. Die Extinktion war der Chromoxidkonzentration in den Proben direkt proportional.



## 7.6 Bestimmung der Mineralstoffe in Futter und Kot

Zunächst wurden die Proben durch Veraschung in der Mikrowelle mit dem MLS-Ethos 1600 Mikrowellen System vollkommen in Lösung gebracht. Hierbei wurde 0,3 - 0,5 g Probe in einen Quarzeinsatz eingewogen und mit 5 ml 65%iger Salpetersäure unter Druck bei 170°C gekocht. Verbesserung der Aufschlussqualität durch Zufügen von 1 ml Wasserstoffperoxid 30% zur Absorptionslösung. Abschließend wurde die Probenlösung mit destilliertem Wasser auf 10 ml aufgefüllt.

### Natrium, Kalium, Calcium

Die Bestimmung erfolgte mit dem Eppendorf Flammenphotometer EFOX 5053. Die Probenlösung wurde mit Acetylen in eine Flamme gebracht, was zum Aufleuchten der Flamme führte. Durch Messung der Lichtintensität konnte auf die Konzentration eines Elementes in den Proben geschlossen werden.

Die Berechnung erfolgte nach folgender Gleichung:

$$\frac{gX}{kg} = \frac{\text{Atomgewicht } t * \text{Messwert} * 10}{1000 * \text{Einwaage}}$$

### Phosphor

Jede Probe wurde als Doppelbestimmung angesetzt. Es wurden jeweils 0,05 ml Probelösung mit 1ml Trichloressigsäure, 1ml Molybdatlösung und 1ml Vanadatlösung vermischt, wodurch ein orangegelb gefärbter Komplex entstand, dessen Intensität der Phosphorsäuremenge entsprach. Diese Färbung konnte als Extinktion bei 366 nm gemessen werden. Die Bestimmung erfolgte mit dem Spektralphotometer Genesys 10 UV der Firma ThermoSpectronic.

Die Berechnung erfolgte nach folgender Gleichung:

$$\frac{gP}{kg} = \frac{\text{Messwert} * 10,5 * 10}{\text{Standard} * 100 * \text{Einwaage}}$$

## 8. Berechnungsmethoden

### 8.1 Berechnung der scheinbaren Verdaulichkeit

Die scheinbare Verdaulichkeit (sV%) der Rohnährstoffe wurde in den Versuchsgruppen, die nach der Indikatormethode durchgeführt wurden, wie folgt berechnet:

$$sV [\%] = 100 - \left[ \frac{\% \text{ Indikator im Futter}}{\% \text{ Indikator im Kot}} * \frac{\% \text{ Nährstoff im Kot}}{\% \text{ Nährstoff im Futter}} * 100 \right]$$

In den Versuchsgruppen mit unmarkiertem Futter wurde die scheinbare Verdaulichkeit nach folgender Formel berechnet:

$$sV [\%] = \frac{F - K}{F} * 100$$

$F$  = Nährstoffmenge im Futter

$K$  = Nährstoffmenge im Kot

### 8.2 Berechnung der verdaulichen Energie (DE)

Die verdauliche Energie (DE) wurde wie folgt berechnet:

$$DE = \frac{GE * sV \text{ GE } \%}{100}$$

## 9. Statistische Methoden

- Arithmetischer Mittelwert (MW) als Durchschnittsgröße der Einzelwerte einer Stichprobe.
- Standardabweichung (SD) als Maß für die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert.
- t-Test nach Student zur Beurteilung von Mittelwertsdifferenzen bei zwei Mittelwerten. Signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) sind durch \* gekennzeichnet.
- Einfaktorielle Varianzanalyse mit anschließendem Tukey-Test zum Vergleich mehrerer Mittelwerte. In den Tabellen wird jeweils die Grenzdifferenz (GD)

angegeben. Mittelwerte, die sich um mindestens diesen Betrag unterscheiden sind signifikant verschieden ( $p > 0,05$ ).

- Einfache und multiple lineare Regressionsberechnungen zur Darstellung des Zusammenhangs einer abhängigen Variablen und mindestens einer unabhängigen Variablen.

## **B. ERGEBNISSE**

### **1. Gesundheitszustand**

Das Allgemeinbefinden der Tiere war während des gesamten Versuchszeitraumes ungestört. In der Gruppe H2n, in welcher über einen längeren Zeitraum wenig Futter aufgenommen wurde, zeigten fünf Tiere in den letzten Versuchstagen ein gesträubtes Haarkleid und ein auffallend ruhiges Verhalten.

### **2. Futter- und Trinkwasseraufnahme**

Bei den jüngeren Ratten in Gruppe Z wurde bezogen auf die Körpermasse eine deutlich höhere Futtermenge erreicht als in allen anderen Durchgängen (Tabelle 14). Zwischen den Haltungsfuttern traten ebenfalls Unterschiede auf. Bei H1 und H3 beeinflusste das Autoklavieren den Futterverzehr wenig, während er bei H2 im nicht autoklavierten Zustand deutlich niedriger war. Es entstand subjektiv der Eindruck einer geringen Akzeptanz durch die Tiere, die häufig und in sehr kleinen Portionen fraßen. Die Rückwaage des Futters war in diesem Versuchsdurchgang schwierig, es musste häufig Futter vom Käfigboden gesammelt werden. Bei den Reduktionsfuttern tendierte die Futtermenge zu höheren Werten als bei den Haltungsfuttern. Dagegen nahmen die Ratten bei halbsynthetischen Diäten weniger Futter auf. Die Trinkwasseraufnahme folgte im Wesentlichen der TS-Aufnahme.

Tabelle 14: Futtermittelaufnahme und Trinkwasseraufnahme während der Versuche pro 100g KM/d (n=6 Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	Futtermittelaufnahme (g)	TS-Aufnahme (g)	Trinkwasseraufnahme (ml)
Z	14,2 ± 0,29	13,0 ± 0,27	16,9 ± 1,48
H1	6,7 ± 0,15	6,3 ± 0,14	8,3 ± 0,25
H2	6,8 ± 0,32	6,2 ± 0,3	6,7 ± 0,64
H3	7,8 ± 0,28	7,1 ± 0,26	6,7 ± 0,77
H1n	6,9 ± 0,35	6,3 ± 0,32	7,7 ± 0,55
H2n	4,3 ± 0,76*	3,3 ± 0,82	6,3 ± 1,39
H3n	7,6 ± 0,37	7,0 ± 0,34	6,8 ± 0,87
R1	9,6 ± 0,59	8,9 ± 0,55	11,3 ± 0,75
R2	8,2 ± 0,41	7,6 ± 0,38	9,9 ± 1,04
R3	8,4 ± 0,3	7,8 ± 0,28	9,1 ± 0,52
PD1n	5,7 ± 0,32	5,3 ± 0,29	6,5 ± 0,80
PD2n	5,8 ± 0,42	5,1 ± 0,37	5,8 ± 0,77
PD3n	5,3 ± 0,17	4,9 ± 0,15	5,2 ± 0,75

\*= über Marker errechnet

### 3. Gewichtsentwicklung

Bei den jüngeren Tieren der Gruppe Z war mit Abstand die größte Gewichtszunahme zu verzeichnen (Tabelle 15). Deutlich geringere Zunahmen und zudem auffällige Unterschiede zeigten sich zwischen den Gruppen der Haltungsfutter. Während bei H1 und H3 das Autoklavieren keinen nennenswerten Effekt hatte und alle Tiere durchschnittlich zwischen 6 Gramm und 9,8 Gramm zunahmen, nahmen fast alle Ratten der Gruppe H3n ab. Bei den Reduktionsfuttern war gegenüber den Haltungsfuttern tendenziell eine Reduktion der Gewichtszunahme zu verzeichnen, während die Ratten bei halbsynthetischem Futter immer deutlich an Körpergewicht zunahmen.

Tabelle 15: Gewichtsveränderungen der Tiere während der ersten 5 Tage der Kotsammelperiode, + =Zunahme, - =Abnahme in g (n=6 Tiere/Gruppe)

Futter	Gewichtsentwicklung MW ± SD	Minimum	Maximum
Z	+35,3 ± 1,6	+34	+38
H1	+ 6,0 ± 2,7	+ 4	+11
H2	+ 9,1 ± 4,0	+ 4	+15
H3	+ 9,8 ± 9,4	- 7	+21
H1n	+ 7,8 ± 3,5	+ 4	+14
H2n	- 10,0 ± 10,7	- 27	+1
H3n	+ 7,0 ± 7,0	- 4	+12
R1	+ 5,0 ± 4,4	- 1	+11
R2	+ 6,3 ± 2,2	+ 4	+10
R3	+ 7,5 ± 4,0	+ 1	+13
PD1n	+13,0 ± 0,9	+12	+14
PD2n	+14,5 ± 3,3	+10	+18
PD3n	+13,2 ± 4,9	+ 6	+20

## 4. Kot

### 4.1 Kotmenge und Kotbeschaffenheit

Die Kotmenge der Ratten der Gruppe Z war mit durchschnittlich 2,3 Gramm Kot-TS pro 100g Körpermasse und Tag nicht wesentlich höher als die der Haltungsfutter (Tabelle 16). Bei H1 und H3 war kein systematischer Unterschied zwischen den autoklavierten und den nicht autoklavierten Futtern festzustellen. Die Tiere der Gruppe H2n, die weniger Futter aufnahmen, schieden jedoch wesentlich geringere Kotmengen aus. Bei den Reduktionsfuttern fielen die größten Kotmengen an, bei den halbsynthetischen Futtern wurde dagegen auffallend wenig Kot ausgeschieden.

Bei dem Zuchtfutter und den Haltungsfuttern war der Kot während des gesamten Versuchszeitraumes durchweg gut geformt. Dies war ebenfalls bei den halbsynthetischen Diäten der Fall, es war teilweise ein hoher Anteil an aufgenommenen Haaren erkennbar. Bei den Reduktionsfuttern waren meist grob strukturierte Bestandteile zu sehen, die Konsistenz war teils bröckelig, teils matschig.

Tabelle 16: Kotmenge in Gramm TS pro 100g KM/d (n=6 Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	Kot-TS (g)
Z	<b>2,3 ± 0,11</b>
H1	<b>1,7 ± 0,11</b>
H2	<b>1,5 ± 0,1</b>
H3	<b>2,3 ± 0,09</b>
H1n	<b>1,7 ± 0,14</b>
H2n	<b>0,9 ± 0,17</b>
H3n	<b>2,2 ± 0,13</b>
R1	<b>4,2 ± 0,38</b>
R2	<b>2,5 ± 0,14</b>
R3	<b>2,9 ± 0,12</b>
PD1n	<b>0,4 ± 0,04</b>
PD2n	<b>0,4 ± 0,04</b>
PD3n	<b>0,4 ± 0,02</b>

#### 4.2 Trockensubstanzgehalt des Kotes

Der Kot-TS-Gehalt bei der Gruppe Z war mit 77 Prozent im Vergleich zu den Haltungsfuttern relativ hoch (Tabelle 17). Mit Ausnahme der Gruppe H2n, deren Kot im Mittel einen höheren Trockensubstanzgehalt aufwies, bestand kaum ein Unterschied zwischen den autoklavierten und den nicht autoklavierten Futtern. Die beiden anderen Futtertypen stellten sich recht uneinheitlich dar. So schwankten die Kot-TS-Gehalte bei den Reduktionsfuttern zwischen 60 % und 74 %. Bei den halbsynthetischen Diäten war der Trockensubstanzgehalt des Kotes im Mittel im Vergleich zu den Haltungsfuttern deutlich höher, bei der Gruppe PD1n jedoch relativ niedrig.

Tabelle 17: TS-Gehalt des Kotes in Prozent (n=6 Tiere/Gruppe, MW  $\pm$  SD)

Futter	Kot-TS %
Z	<b>77,38 <math>\pm</math> 2,32</b>
H1	<b>62,62 <math>\pm</math> 2,36</b>
H2	<b>67,26 <math>\pm</math> 2,54</b>
H3	<b>68,29 <math>\pm</math> 3,24</b>
H1n	<b>64,34 <math>\pm</math> 2,87</b>
H2n	<b>72,70 <math>\pm</math> 6,03</b>
H3n	<b>67,67 <math>\pm</math> 2,64</b>
R1	<b>65,36 <math>\pm</math> 3,12</b>
R2	<b>60,65 <math>\pm</math> 5,26</b>
R3	<b>74,85 <math>\pm</math> 9,15</b>
PD1n	<b>73,74 <math>\pm</math> 3,90</b>
PD2n	<b>80,59 <math>\pm</math> 2,70</b>
PD3n	<b>88,12 <math>\pm</math> 1,42</b>
GD	<b>8,3</b>



### 4.3 Der pH-Wert des Kotes

Die Kot-pH-Werte schwankten zwischen deutlich sauer bei Gruppe H3n und deutlich alkalisch bei Verfütterung von Z (Tabelle 18).

Tabelle 18: Der pH-Wert des Kotes (n=6Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	Kot-pH
Z	<b>8,67 ± 0,32</b>
H1	<b>6,21 ± 0,35</b>
H2	<b>6,03 ± 0,24</b>
H3	<b>6,18 ± 0,16</b>
H1n	<b>6,21 ± 0,33</b>
H2n	<b>6,19 ± 0,06</b>
H3n	<b>5,89 ± 0,21</b>
R1	<b>6,50 ± 0,13</b>
R2	<b>7,49 ± 0,19</b>
R3	<b>6,40 ± 0,13</b>
PD1n	<b>6,71 ± 0,23</b>
PD2n	<b>7,31 ± 0,22</b>
PD3n	<b>7,10 ± 0,14</b>

## 5. Scheinbare Verdaulichkeit (sV)

Die scheinbare Verdaulichkeit der TS, der organischen Substanz, der Rohnährstoffe und der Bruttoenergie in Prozent sind in Tabelle 19 dargestellt. Auffallend war die allgemein sehr hohe Verdaulichkeit der halbsynthetischen Futter. Auch das Zuchtfutter war im Vergleich zu den Haltungsfuttern höher verdaulich. Dagegen wiesen die Reduktionsfutter eine vergleichsweise niedrige Verdaulichkeit auf. Die Haltungsfutter zeigten vor und nach dem Autoklavieren ähnliche Verdaulichkeiten. Eine Ausnahme stellte die scheinbare Verdaulichkeit des Rohproteins dar, welche bei den nicht autoklavierten Gruppen generell etwas höhere Werte zeigte.

Tabelle 19: Scheinbare Verdaulichkeit der TS, der organischen Substanz, der Rohnährstoffe und der Bruttoenergie in Prozent (n=6Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	sV TS (%)	sV oS (%)	sV Rp (%)	sV Rfe (%)	sV Rfa (%)	sV NfE (%)	sV GE (%)
Z	82,0 ± 0,7	84,2 ± 0,6	80,9 ± 1,1	87,3 ± 1,5	9,8 ± 3,3	90,5 ± 0,7	83,5 ± 0,8
H1	72,6 ± 1,7	75,2 ± 1,5	68,7 ± 1,8	78,3 ± 2,7	20,1 ± 3,5	81,4 ± 1,4	73,7 ± 1,6
H2	75,5 ± 0,9	78,6 ± 1,0	73,8 ± 1,8	57,5 ± 5,9	28,9 ± 1,7	84,6 ± 0,8	77,3 ± 1,1
H3	68,0 ± 0,4	71,1 ± 0,3	66,4 ± 0,7	73,2 ± 2,5	27,1 ± 2,4	78,5 ± 0,6	69,8 ± 0,6
H1n	73,6 ± 1,1	76,6 ± 1,1	73,8 ± 2,8	78,3 ± 1,0	15,8 ± 3,1	82,2 ± 1,1	75,0 ± 1,0
H2n	73,4 ± 2,3	77,9 ± 1,8	75,6 ± 3,5	56,1 ± 5,1	24,1 ± 4,5	84,3 ± 1,1	73,9 ± 2,9
H3n	68,5 ± 1,2	71,6 ± 1,2	69,3 ± 1,3	73,7 ± 5,7	9,5 ± 6,0	77,6 ± 1,2	70,1 ± 1,3
R1	53,5 ± 1,7	54,9 ± 1,6	52,2 ± 2,5	68,8 ± 1,3	7,2 ± 1,9	69,5 ± 1,7	53,3 ± 1,8
R2	67,0 ± 0,8	69,4 ± 0,7	70,1 ± 1,0	76,2 ± 6,7	21,6 ± 3,9	79,0 ± 0,7	68,9 ± 0,7
R3	62,9 ± 0,4	65,2 ± 0,4	61,3 ± 0,8	71,5 ± 7,3	6,7 ± 3,2	74,5 ± 0,8	64,2 ± 0,4
PD1n	92,9 ± 0,8	94,8 ± 0,6	92,9 ± 0,6	88,4 ± 1,5	40,9 ± 11,0	97,4 ± 0,3	94,0 ± 0,6
PD2n	93,8 ± 0,3	95,7 ± 0,3	92,7 ± 0,7	96,9 ± 1,4	65,6 ± 3,3	97,8 ± 0,1	95,2 ± 0,4
PD3n	94,4 ± 0,2	95,3 ± 0,2	92,6 ± 0,3	91,7 ± 2,0	19,2 ± 4,0	98,0 ± 0,2	94,9 ± 0,2
GD	2,2	2,0	3,4	8,2	9,2	1,9	2,5

## 6. Mineralstoffe

### 6.1 Natrium

Die Natriumaufnahme mit dem Futter und dessen Ausscheidung mit dem Kot pro 100g Körpermasse und Tag sowie die scheinbare Verdaulichkeit von Natrium ist in Tabelle 20 dargestellt. Die Aufnahme von Natrium war bei Gruppe Z am höchsten. Es wurde relativ wenig Natrium faecal ausgeschieden, die scheinbare Na-Verdaulichkeit war hoch. Bei den Haltungsfuttern nahmen die Tiere der Gruppe H2n vergleichsweise wenig Natrium auf, sie schieden auch wenig Natrium mit dem Kot aus. Die scheinbare Na-Verdaulichkeit schwankte bei den Haltungsfuttern zwischen 68,4 % und 89,4 %, das Autoklavieren zeigt keinen einheitlichen Effekt. Bei den Reduktionsfuttern lag die Na-Verdaulichkeit im Bereich der Haltungsfutter, lediglich bei R1 etwas niedriger. Die halbsynthetischen Diäten präsentierten sich hinsichtlich der Na-Aufnahme und -Ausscheidung recht heterogen, insgesamt waren diese aber sehr niedrig. Die scheinbare Verdaulichkeit von Natrium war dagegen sehr hoch.

Tabelle 20: Aufnahme, faecale Ausscheidung von Natrium pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	Na-Aufnahme (mg)	Na-Ausscheidung (mg)	sV Na (%)
Z	32,46 ± 0,67	1,74 ± 0,2	94,7 ± 0,62
H1	22,40 ± 0,50	2,84 ± 0,38	87,3 ± 1,54
H2	16,56 ± 0,79	2,26 ± 0,48	86,4 ± 2,37
H3	16,12 ± 0,59	4,23 ± 0,34	73,8 ± 2,13
H1n	22,23 ± 1,12	2,51 ± 0,33	88,8 ± 1,13
H2n	9,51 ± 2,38	0,96 ± 0,22	89,4 ± 3,19
H3n	15,47 ± 0,75	4,90 ± 0,94	68,4 ± 5,90
R1	21,55 ± 1,33	7,24 ± 1,24	66,4 ± 5,28
R2	21,16 ± 1,05	3,44 ± 0,65	83,8 ± 2,43
R3	27,43 ± 0,98	6,51 ± 0,83	76,3 ± 2,37
PD1n	15,36 ± 0,86	1,27 ± 0,29	91,8 ± 1,77
PD2n	6,68 ± 0,49	0,26 ± 0,03	96,1 ± 0,56
PD3n	12,27 ± 0,38	0,20 ± 0,03	98,4 ± 0,26
GD			5,6

## 6.2 Kalium

Die Kaliumaufnahme mit dem Futter und dessen Ausscheidung mit dem Kot pro 100 g Körpermasse und Tag sowie die scheinbare Verdaulichkeit von Kalium ist in Tabelle 21 dargestellt. Sie verhielten sich entsprechend denen von Natrium. Auch hier zeigten die halbsynthetischen Diäten die höchste K-Verdaulichkeit, gefolgt von dem Zuchtfutter. Das Autoklavieren der Haltungsfutter hatte keinen systematischen Effekt auf deren scheinbare K-Verdaulichkeit. Die niedrigste scheinbare Verdaulichkeit von Kalium wies R1 auf.

Tabelle 21: Aufnahme, faecale Ausscheidung von Kalium pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	K-Aufnahme (mg)	K-Ausscheidung (mg)	sV K (%)
Z	153,14 ± 2,89	10,04 ± 1,20	93,4 ± 0,76
H1	78,02 ± 1,73	11,24 ± 1,05	85,6 ± 1,29
H2	69,35 ± 3,31	6,91 ± 1,27	90,1 ± 1,37
H3	65,29 ± 2,40	7,56 ± 0,95	88,4 ± 1,38
H1n	77,68 ± 3,91	8,79 ± 1,94	88,7 ± 2,04
H2n	37,66 ± 9,43	2,33 ± 0,65	93,3 ± 2,96
H3n	63,76 ± 3,08	8,10 ± 1,41	87,3 ± 1,93
R1	134,41 ± 8,30	25,62 ± 4,75	81,0 ± 2,92
R2	113,33 ± 5,64	14,77 ± 4,22	87,1 ± 3,18
R3	90,43 ± 3,22	12,96 ± 1,28	85,7 ± 1,47
PD1n	39,88 ± 2,22	1,59 ± 0,47	96,0 ± 1,15
PD2n	52,62 ± 3,85	0,94 ± 0,14	98,2 ± 0,22
PD3n	20,87 ± 0,65	0,65 ± 0,07	96,9 ± 0,35
GD			3,7

## 6.3 Calcium

Die Calciumaufnahme mit dem Futter und dessen Ausscheidung mit dem Kot pro 100 g Körpermasse und Tag sowie die scheinbare Verdaulichkeit von Calcium ist in Tabelle 22 dargestellt. Bei Z war die Ca-Aufnahme am höchsten, die faecale Ca-Ausscheidung relativ gering. Es war die höchste scheinbare Verdaulichkeit von Calcium zu verzeichnen. Bei den Haltungsfuttern wurden bei H2n die geringsten Ca-

Mengen aufgenommen, die Ca-Ausscheidung mit dem Kot überstieg hier die Aufnahme. Für die scheinbare Verdaulichkeit ergab sich im Mittel ein negativer Wert. Ansonsten zeigte die scheinbare Verdaulichkeit von Calcium der Haltungsfutter Werte zwischen 11,0 % und 23,0 %. Die Ca-Verdaulichkeit der Reduktionsfutter lag im Bereich der Haltungsfutter, mit Ausnahme von R1, bei der die geringste scheinbare Ca-Verdaulichkeit überhaupt zu verzeichnen war (abgesehen von H2n). Die Ca-Aufnahme bei den halbsynthetischen Diäten war ebenso wie die Ca-Ausscheidung relativ niedrig, die scheinbare Verdaulichkeit dagegen hoch.

Tabelle 22: Aufnahme und faecale Ausscheidung von Calcium pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	Ca-Aufnahme (mg)	Ca-Ausscheidung (mg)	sV Ca (%)
Z	125,47 ± 2,37	70,97 ± 5,14	43,4 ± 3,95
H1	63,22 ± 1,40	48,68 ± 6,71	23,0 ± 0,4
H2	59,49 ± 2,84	51,90 ± 1,88	12,7 ± 4,22
H3	85,33 ± 3,13	75,94 ± 2,35	11,0 ± 2,47
H1n	63,06 ± 3,18	51,44 ± 3,30	18,4 ± 3,47
H2n	31,54 ± 7,9	33,76 ± 6,47	- 9,3 ± 15,51
H3n	83,15 ± 4,01	68,92 ± 5,97	16,8 ± 9,78
R1	92,29 ± 5,70	85,36 ± 8,75	7,7 ± 4,63
R2	107,41 ± 5,34	93,73 ± 4,52	12,7 ± 2,09
R3	79,45 ± 2,83	68,63 ± 3,92	13,7 ± 2,55
PD1n	49,27 ± 2,75	33,83 ± 3,36	31,1 ± 8,05
PD2n	42,88 ± 3,14	31,59 ± 1,38	26,1 ± 4,67
PD3n	26,02 ± 0,81	17,77 ± 1,10	31,7 ± 3,17
GD			12,6

#### 6.4 Phosphor

Die Phosphoraufnahme mit dem Futter und dessen Ausscheidung mit dem Kot pro 100 g Körpermasse und Tag sowie die scheinbare Verdaulichkeit von Phosphor ist in Tabelle 23 dargestellt. Die Tiere der Gruppe Z nahmen vergleichsweise viel Phosphor auf, die P-Ausscheidung war relativ gering. Das Zuchtfutter besaß eine hohe scheinbare P-Verdaulichkeit. Mit Ausnahme von H2n wiesen die Haltungsfutter

scheinbare Verdaulichkeiten zwischen 21,9 % und 32,9 % auf. Bei H2n war die P-Aufnahme gering, es wurde relativ viel Phosphor faecal ausgeschieden, die scheinbare Verdaulichkeit war sehr niedrig. Die P-Verdaulichkeit der Reduktionsfutter lag im Bereich der Haltungsfutter, sie war lediglich bei R1 mit 18,6 % etwas niedriger. Bei den halbsynthetischen Diäten war die P-Verdaulichkeit durchweg hoch.

Tabelle 23: Aufnahme und faecale Ausscheidung von Phosphor pro 100g KM/d und dessen scheinbare Verdaulichkeit (n=6 Tiere/Gruppe, MW  $\pm$  SD)

Futter	P-Aufnahme (mg)	P-Ausscheidung (mg)	sV P (%)
Z	113,38 $\pm$ 2,14	51,97 $\pm$ 2,72	54,2 $\pm$ 2,17
H1	50,37 $\pm$ 1,12	33,82 $\pm$ 4,83	32,9 $\pm$ 9,43
H2	49,52 $\pm$ 2,36	34,04 $\pm$ 2,17	31,2 $\pm$ 4,07
H3	68,35 $\pm$ 2,51	52,44 $\pm$ 4,80	24,6 $\pm$ 8,60
H1n	52,03 $\pm$ 2,62	36,75 $\pm$ 3,96	29,5 $\pm$ 4,65
H2n	25,39 $\pm$ 6,36	22,78 $\pm$ 4,37	8,5 $\pm$ 11,37
H3n	65,99 $\pm$ 3,19	51,49 $\pm$ 3,08	21,9 $\pm$ 3,95
R1	61,22 $\pm$ 3,78	49,96 $\pm$ 6,18	18,6 $\pm$ 6,32
R2	51,23 $\pm$ 2,55	37,43 $\pm$ 4,43	27,0 $\pm$ 6,32
R3	58,75 $\pm$ 2,09	41,97 $\pm$ 3,96	28,6 $\pm$ 5,51
PD1n	46,55 $\pm$ 2,56	21,59 $\pm$ 2,17	53,5 $\pm$ 5,42
PD2n	49,45 $\pm$ 3,62	24,55 $\pm$ 1,48	50,3 $\pm$ 1,39
PD3n	22,34 $\pm$ 0,70	9,31 $\pm$ 1,20	58,4 $\pm$ 4,49
GD			12,5

## **IV. DISKUSSION**

### **A. KRITIK DER METHODEN**

#### **1. Das Alter der Ratten**

Die Ratten waren zu Beginn der Kotsammelperiode sechzehn Wochen alt. Eine Ausnahme bildeten die Ratten der Gruppe Z, ihr Alter betrug zu diesem Zeitpunkt fünf Wochen. Es stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse von Ratten verschiedenen Alters miteinander vergleichbar sind.

VIGUARES et al. (1999) führten histologische Untersuchungen zur Entwicklung des Rattendarmes während des ersten Lebensjahres durch. Sie stellten fest, dass sich nach dem 35. Lebenstag die Anzahl und Höhe der Darmzotten und die Anzahl und Tiefe der Lieberkühn-Krypten nur noch wenig veränderte. THORBEEK et al. (1982) untersuchten Wachstum, Stickstoff- und Energiehaushalt bei Ratten im Alter zwischen 40 Tagen und 150 Tagen. Sie beobachteten bei den verschiedenen Altersgruppen keine signifikanten Unterschiede der Verdaulichkeit der einzelnen Nährstoffe und der Energie. Außerdem blieb der Anteil der umsetzbaren Energie an der Gesamtenergie während des gesamten Untersuchungszeitraumes weitgehend konstant. Diese Tatsachen lassen den Schluss zu, dass das Alter der Ratten ab dem Zeitpunkt des Absetzens für Verdauungsversuche keine nennenswerte Bedeutung hat.

#### **2. Der Rattenstamm**

In der vorliegenden Studie wurden ausschließlich Lewis Ratten aus dem Hause Charles River, Sulzfeld eingesetzt. Es handelte sich um einen Inzuchtstamm der in den frühen fünfziger Jahren aus Wistar Elterntieren entwickelt wurde.

Es stellt sich die Frage, inwieweit der verwendete Rattenstamm Einfluss auf die Ergebnisse der Studie nimmt.

Viele Autoren nennen als Versuchstiere in ihren Verdauungsversuchen Wistar Ratten (HOFFMANN, 1970; FÖRSTER und HOOS, 1977; THORBEEK et al., 1982; BACH KNUDSEN et al., 1983; IMAI et al., 1986; CARRE et al., 1989; DAVIES et al., 1991; BRUNSGAARD et al., 1995; LARSEN et al., 1991; VIGUERAS et al., 1999; WISKER

und BACH KNUDSEN, 2003). Es fanden aber auch andere Stämme wie Fischer Ratten (CHRISRIAN et al., 1998) oder Sprague-Dawley Ratten (SHAH et al., 1982; SARWAR und PEACE, 1986; HUBERT et al., 2000; BAUER et al., 2003) Verwendung. Teilweise wird der verwendete Rattenstamm nicht näher angegeben (WILLIAMS und SENIOR; 1981; MUNAKATA et al., 1995). Da die Rattenstämme nicht direkt verglichen werden, kann ein Stammeffekt weder ausgeschlossen noch bestätigt werden. Daher werden zum Vergleich Species mit verschiedenen Rassen herangezogen.

Um einen Rassevergleich bei Hunden anstellen zu können, führten ZENTEK und MEYER (1995) Verdauungsversuche mit Beagles und Doggen durch. Dabei zeigten die Doggen fast immer eine niedrigere Verdaulichkeit der Rohnährstoffe und der Bruttoenergie. Der maximale Unterschied der Trockensubstanzverdaulichkeit betrug 10 %. Die Autoren führten dies darauf zurück, dass Doggen im Vergleich zu kleineren Rassen einen im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht kleineren Verdauungstrakt besitzen. Zudem ist bei dieser Rasse die Zeit der Darmpassage vergleichsweise kurz. ZENTEK et al. (2002) verglichen die Nährstoffverdaulichkeit in drei verschiedenen Hunderassen (Deutscher Schäferhund, Deutsch Kurzhaar und Beagle). Sie stellten nur geringe Unterschiede der scheinbaren Verdaulichkeit der Rohnährstoffe zwischen den Rassen fest. Die Verdaulichkeit der organischen Substanz differierte um höchstens 3 %, die größten Unterschiede waren bei der Verdaulichkeit des Rohproteins festzustellen, wo die Differenz zwischen den Rassen bis zu 7 % betrug. Auch in Bezug auf ihren Energiebedarf wurden verschiedene Hunderassen miteinander verglichen (RAINBIRD und KIENZLE, 1989; BURGER und JOHNSON, 1991; FINKE, 1991). Die hier festgestellten Unterschiede führte man nicht auf die variierende Körpergröße sondern auf den unterschiedlichen Rassetypus (Haarkleid, Oberflächenisolierung, Anteile an Muskulatur und Fett) und das Temperament zurück.

SLADE und HINTZ (1969) verglichen die Verdauung von Pferden und Ponys. Sie ermittelten bei den Ponys geringfügig höhere Verdaulichkeiten, die Unterschiede zu den Pferden waren jedoch nicht signifikant. Hinsichtlich der Energie für die Erhaltung weisen Rennpferde einen erhöhten Bedarf auf, dessen Ursprung einige Autoren in dem lebhaften Temperament dieser Tiere und der auf sie einwirkenden Stressbelastung sehen (GLADE, 1989; ZMIJA, 1991).



Die bei den hier aufgeführten Species ermittelten Unterschiede liegen in einer Größenordnung, die eine gesonderte Energiebewertung für einzelne Rassen nicht nötig machen. Auch bei der Ratte wird keine separate Energiebewertung für die einzelnen Stämme durchgeführt, zumal sich die einzelnen Rattenstämme hinsichtlich Körpergewicht, Typ, Temperament und Haarkleid weniger voneinander unterscheiden als Hunde- und Pferderassen. Daher kann in Verdauungsversuchen mit Ratten von einer weitgehenden Unabhängigkeit der Ergebnisse von dem verwendeten Rattenstamm ausgegangen werden.

### **3. Verdaulichkeitsbestimmung anhand von Kollektions- und Markermethode**

Die Verdaulichkeit wurde in den meisten Gruppen mit der Markermethode bestimmt. Als externer Marker wurde Chromoxid verwendet, welches den verschiedenen Futtern in einer Konzentration von annähernd 0,4 % TS beigefügt wurde. Grundsätzlich besteht bei der Verwendung eines Markers die Gefahr der Entmischung, so dass es zu einer ungleichen Verteilung des Markers in der Ingesta und in Folge dessen zu einer Fehleinschätzung der Verdaulichkeit kommen kann. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb dem Futter das Chromoxid schon während der Herstellung beigemischt und das Futter anschließend pelletiert. In den Gruppen, welche Haltungsfutter oder Reduktionsfutter bekamen, erfolgte die Kotsammlung mit mindestens 80 % der Kotgesamtmenge repräsentativ.

Den halbsynthetischen Futtern wurde kein Marker zugesetzt, hier wurde die Verdaulichkeit mittels Kollektionsmethode bestimmt. Hierfür musste der gesamte Kot vollständig gesammelt werden, was aufgrund des hohen Kot-Trockensubstanz-Gehaltes der PD-Gruppen unproblematisch war.

In der Gruppe Z wurden die Kollektionsmethode und die Markermethode miteinander kombiniert. Dadurch konnte die Markerwiederfindung sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse überprüft werden (Tabelle 24). Das verabreichte Chromoxid konnte im Mittel zu 91 % im Kot nachgewiesen werden. Für die scheinbare Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS) wurden geringfügig unterschiedliche Werte anhand der beiden verschiedenen Methoden ermittelt. Diese Abweichung ist jedoch, obwohl statistisch signifikant, ernährungsphysiologisch irrelevant.

Tabelle 24: Gruppe Z: Markerwiederfindung sowie scheinbare Verdaulichkeit der Trockensubstanz in % jeweils mittels Kollektionsmethode und Markermethode bestimmt sowie absolute und relative Abweichung

	<b>Marker- wieder- findung (%)</b>	<b>sV TS (%) Kollektions- methode</b>	<b>sV TS (%) Marker- methode</b>	<b>Ab- weichung absolut (%)</b>	<b>Abw. relativ (% sV TS)</b>
Ratte1	85,46	83,85	81,11	2,75	3,28
Ratte2	91,87	83,72	82,28	1,44	1,72
Ratte3	92,76	83,24	81,93	1,31	1,57
Ratte4	98,82	83,30	83,10	0,20	0,24
Ratte5	87,34	83,69	81,33	2,36	2,82
Ratte6	91,23	83,85	82,30	1,55	1,85
MW $\pm$ SD	<b>91,25 <math>\pm</math> 4,66</b>	<b>83,61 <math>\pm</math> 0,27</b>	<b>82,01 <math>\pm</math> 0,73</b>	<b>1,60 <math>\pm</math> 0,89</b>	<b>1,91 <math>\pm</math> 1,06</b>

## B. BESPRECHUNG DER ERGEBNISSE

### 1. Verdaulichkeit

Hinsichtlich ihrer Verdaulichkeit unterschieden sich die vier Futtertypen erheblich (Abbildung 1). So wiesen die halbsynthetischen Diäten, gefolgt vom Zuchtfutter insgesamt deutlich höhere Verdaulichkeiten auf als die Haltungsfutter. Faserreiche Futter waren dagegen schlechter verdaulich.

Die hier ermittelten Verdaulichkeiten der Trockensubstanz (sV TS) liegen für die Futtermittel, die aus natürlichen Komponenten bestehen, zwischen 54 und 82 %, wobei die niedrigeren Daten aus den Untersuchungen der Reduktionsdiäten stammen. In anderen Verdauungsexperimenten lagen die Werte ebenfalls in diesem Bereich (EGGUM et al., 1982; LARSEN et al., 1990). Zahlreiche Experimente mit Ratten zeigten, dass ein erhöhter Fasergehalt in der Ration die TS-Verdaulichkeit senkt (EGGUM et al., 1982; JORGENSEN et al., 2003). Die Verdaulichkeit der Trockensubstanz der halbsynthetischen Futter war mit 93 bis 94% höher, was sich ebenfalls mit den Angaben anderer Autoren deckt (FLICKINGER et al., 1998).

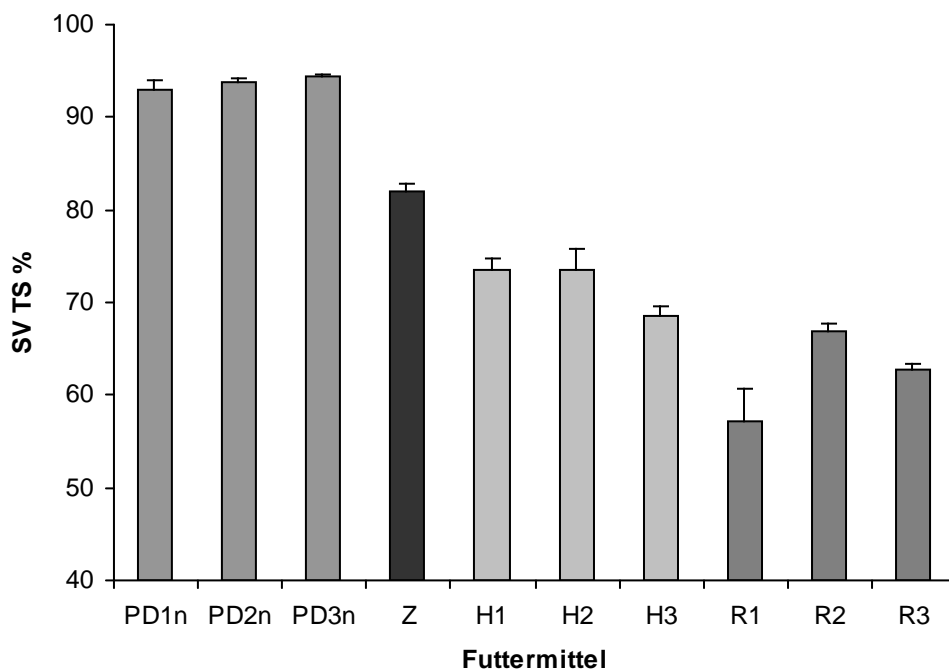


Abbildung 1: Mittlere scheinbare Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS %) der einzelnen Futtermittel und ihre Standardabweichung (n=6 Tiere/Gruppe)

Die halbsynthetischen Futter werden aus einer Kombination natürlicher Zutaten, reiner Chemikalien und Zutaten mit einem unterschiedlichen Reinheitsgrad (als Eiweißquelle Casein) zusammengesetzt. Der Eiweißgehalt ist bei diesen Diäten mit 19 - 22 % im Vergleich zu den anderen Futtermitteln (16 – 20%, excl. Z) eher hoch, zudem stellt Casein eine sehr hochwertige und hochverdauliche Proteinquelle dar (SARWAR und PEACE, 1986). Die halbsynthetischen Futter enthalten viel Zucker und Stärke, welche zum Großteil bereits aufbereitet ist. Dies, kombiniert mit einem meist niedrigem Rohfasergehalt, der zudem nicht mehr an pflanzliche Zellstrukturen gebunden ist, so dass die anderen Nährstoffe nicht durch pflanzliche Gerüststoffe vor einer Verdauung geschützt werden, erklärt die hohe Verdaulichkeit der halbsynthetischen Futter.

Die ebenfalls sehr hohe Verdaulichkeit des Zuchtfutters erklärt sich durch seine Nährstoffzusammensetzung. So liegen, bei einem eher niedrigen Rohfasergehalt, die Gehalte an Rohprotein (23 %), Rohfett (4,5 %) und Stärke (34 %) im oberen Bereich.

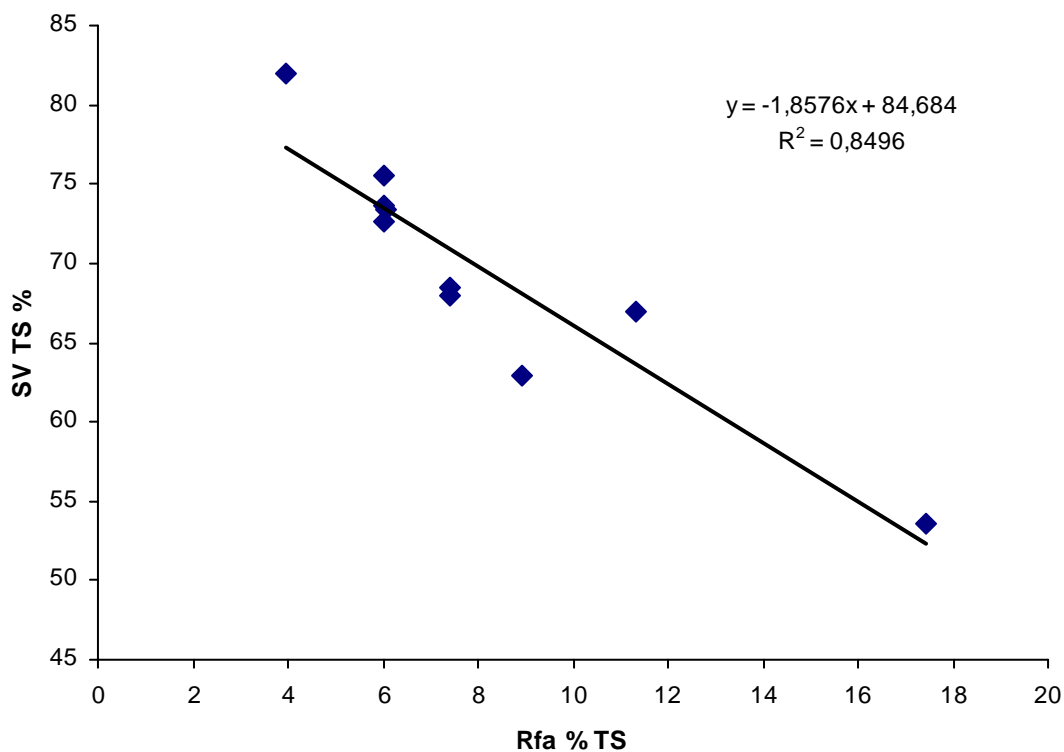


Abbildung 2: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt der Trockensubstanz (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS %) der Haltungs- und Reduktionsfutter sowie des Zuchtfutters (n=6 Tiere/Gruppe)

Zwischen dem Fasergehalt in der Ration und deren Verdaulichkeit besteht eine negative Beziehung. So wurde, unter Ausschluss der halbsynthetischen Futter, für die Verdaulichkeit der Trockensubstanz und den Gehalt an Rohfaser im Futter ein Korrelationskoeffizient von 0,85 ermittelt (Abbildung 2). Es ergab sich folgende Gleichung:

$$sV \text{ TS} = 84,68 - 1,86 \text{ Rfa (\% TS)}$$

Setzte man den Rohfasergehalt der Futter-TS mit der scheinbaren Verdaulichkeit der organischen Substanz in Beziehung, so erhöhte sich der Korrelationskoeffizient auf 0,87 (Abbildung 3). Es ergab sich folgende Gleichung:

$$sV \text{ oS \%} = 88,48 - 1,99 \text{ Rfa (\% TS)}$$

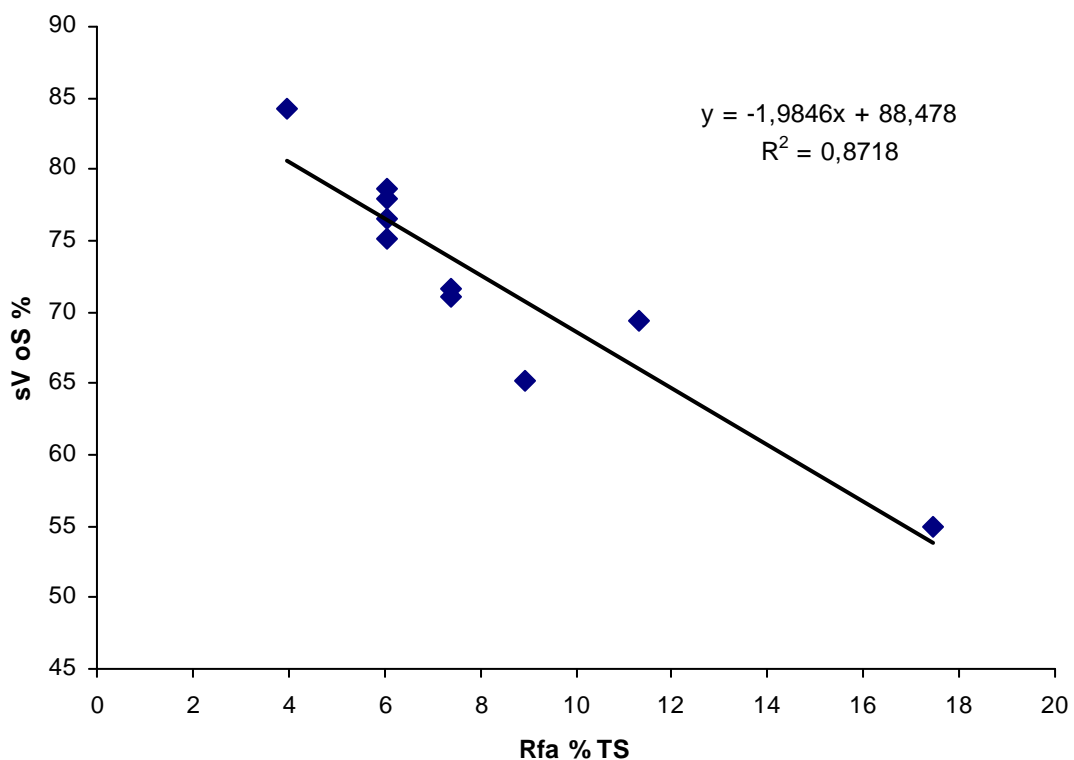


Abbildung 3: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt der Trockensubstanz (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit der organischen Substanz der Haltungs- und Reduktionsfutter sowie dem Zuchtfutter (n=6 Tiere/Gruppe)

Vergleicht man diese ermittelte Regressionsgleichung mit denen anderer Species (Tabelle 25), so wird deutlich, dass der Einfluss der Rohfaser auf die Verdaulichkeit der organischen Substanz (sV oS %) zunimmt, je schlechter die Tierart Faser

verdauen kann bzw. von der Anatomie her weniger auf eine Faserverdauung angelegt ist (KAMPHUES et al., 1999). Andererseits hängen Steigung und absolutes Glied auch von der Art der Faser sowie der Grundration ab. So wurde z.B. von RIKLIN (1973) bei Hunden auf einer hausgemachten Ration mit Zulagen von Holzstoff ein sehr hohes absolutes Glied bei einer gleichzeitig sehr starken Verdauungsdepression durch die Rohfaserzulage beschrieben. In späteren Untersuchungen an kommerziellen Alleinfuttern fand OPITZ (1996) dagegen ein entsprechend niedrigeres absolutes Glied und eine geringere Verdauungsdepression durch Rohfaser.

Die in den eigenen Untersuchungen anhand der konventionellen Futtermittel ermittelte Regressionsgleichung zwischen Rohfasergehalt und Verdaulichkeit der organischen Substanz ähnelt am meisten derjenigen, die beim Schwein diesen Zusammenhang beschreibt. Dies ist nicht weiter überraschend wenn man bedenkt, dass es sich bei beiden Species um omnivore Tiere mit mäßiger Fermentationskapazität handelt, wobei auch davon ausgegangen werden kann, dass ähnliche Futterkomponenten bei der Erarbeitung der Gleichungen eingesetzt wurden.

Tabelle 25: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt der Trockensubstanz (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit der organischen Substanz (sV oS %) (KAMPHUES et al., 1999)

Tierart	Regressionsgleichung
Rind	$sV\ oS = 90 - 0,88\ Rfa$
Pferd	$sV\ oS = 97 - 1,26\ Rfa$
Schwein	$sV\ oS = 92 - 1,68\ Rfa$
Ratte *	$sV\ oS = 89 - 1,99\ Rfa$
Huhn	$sV\ oS = 88 - 2,33\ Rfa$
Hund	$sV\ oS = 90,8 - 1,56\ Rfa$
Katze	$sV\ oS = 89,3 - 1,20\ Rfa$

\* = eigene Untersuchung

### 1.1 Einfluss des Autoklavierens auf die Verdaulichkeit

Vergleicht man die scheinbare Verdaulichkeit der Trockensubstanz der Haltungsfutter vor und nach dem Autoklavieren, so konnten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 1). Das Gleiche galt auch für die Rohnährstoffe, wobei Rohprotein eine Ausnahme darstellte. Dies geht mit den

Aussagen von SCHOEN und HILLER (1971) konform, welche ebenfalls keinen Effekt des Autoklavierens auf die scheinbare Verdaulichkeit von Rohfett und der N-freien Extraktstoffen sahen.

Dagegen kamen sie zu dem Schluss, dass die scheinbare Verdaulichkeit des Rohproteins durch die Dampfsterilisation deutlich herabgesetzt wird. Auch FORD (1976) ermittelte, dass Autoklavieren der Futtermittel die Verdaulichkeit von Protein temperatur- und zeitabhängig senkt. Er nannte als Begründung eine Veränderung des Proteins, was eine verzögerte Freisetzung der Aminosäuren im Darm zur Folge hat. Alternativ nannte er eine Zunahme der „biologisch inaktiven Proteinrückstände“ als Ursache. Die verminderte Proteinverdaulichkeit war auf die verminderte Verfügbarkeit vieler oder sogar aller Aminosäuren, und nicht nur auf eine limitierende Aminosäure zurückzuführen. Heute kann als bekannt vorausgesetzt werden, dass die Verschlechterung der Proteinverdaulichkeit nach Überhitzung auf eine Vielzahl chemischer Reaktionen zurückzuführen ist, wobei sowohl Aminosäuren oxidiert werden, als auch Bindungen zwischen Proteinmolekülen sowie zwischen Proteinen und Kohlenhydraten (sehr gut untersucht ist die Maillardreaktion von Lysin) entstehen (JEROCH et al. 1993).

In den eigenen Untersuchungen wurden vor dem Autoklavieren scheinbare Proteinverdaulichkeiten bestimmt, die zwischen 2 und 5 % höher waren, als danach (Abbildung 5). In zwei Fällen reduzierte die Behandlung die scheinbare Verdaulichkeit des Rohproteins signifikant.

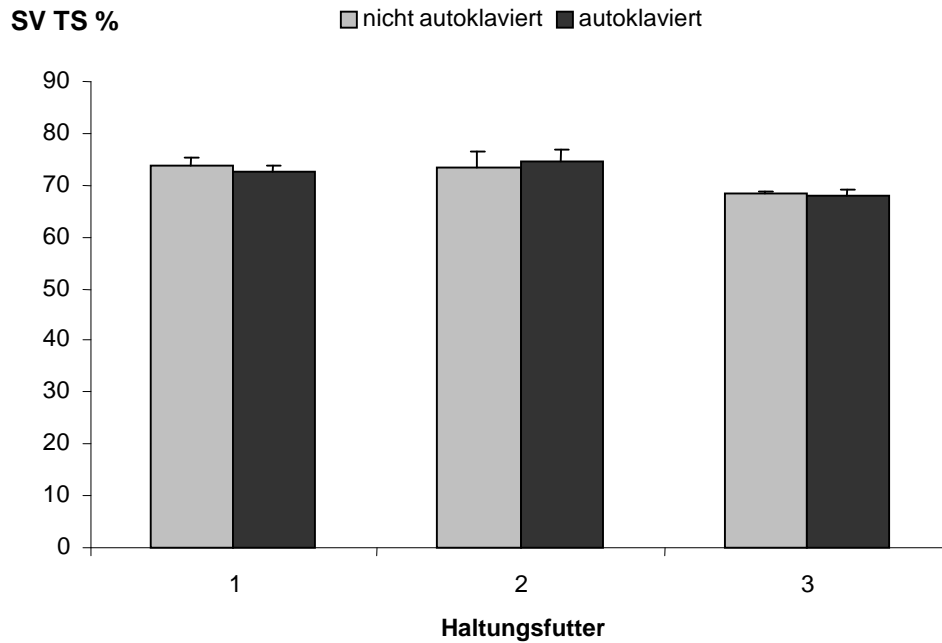


Abbildung 4: Vergleich der mittleren scheinbaren Verdaulichkeit der Trockensubstanz (sV TS %) der Haltungsfutter jeweils vor und nach dem Autoklavieren und ihre Standardabweichung (n=6 Tiere/Gruppe)

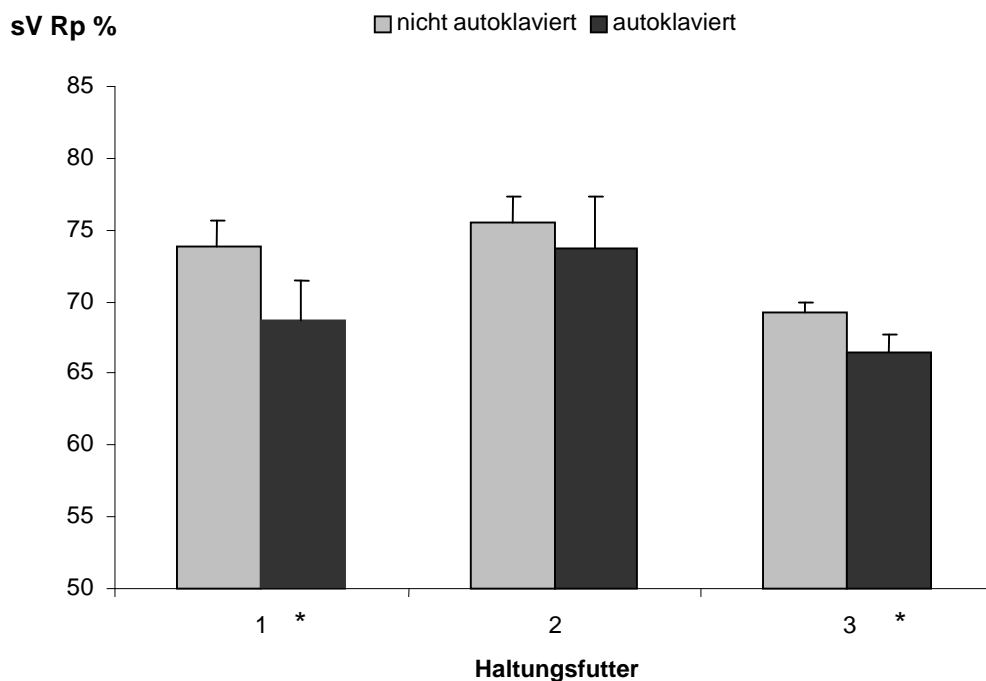


Abbildung 5: Vergleich der mittleren scheinbaren Verdaulichkeit von Rohprotein (sV Rp %) der Haltungsfutter jeweils vor und nach dem Autoklavieren und ihre Standardabweichung (\*= signifikanter Unterschied) (n=6 Tiere/Gruppe)



## 1.2 Scheinbare Verdaulichkeit der Rohnährstoffe

### 1.2.1 Scheinbare Verdaulichkeit der Proteine

Die scheinbare Verdaulichkeit des Rohproteins lag bei den Gruppen, die mit Futtermitteln aus natürlichen Komponenten versorgt wurden, zwischen 52 und 81 %. Dies deckt sich mit Angaben aus dem Schrifttum zu konventionellen Futtermitteln (SARWAR und PEACE; 1986, LARSEN et al., 1991). Wie aus Abbildung 6 zu erkennen ist, bestand innerhalb der konventionellen Rationen eine negative Beziehung zwischen der Verdaulichkeit des Proteins und dem Rohfasergehalt der Ration. Dieser Zusammenhang wurde bereits von anderen Autoren beschrieben (NYMAN und ASP, 1982; BACH KNUDSEN et al., 1983; LARSEN et al, 1991).

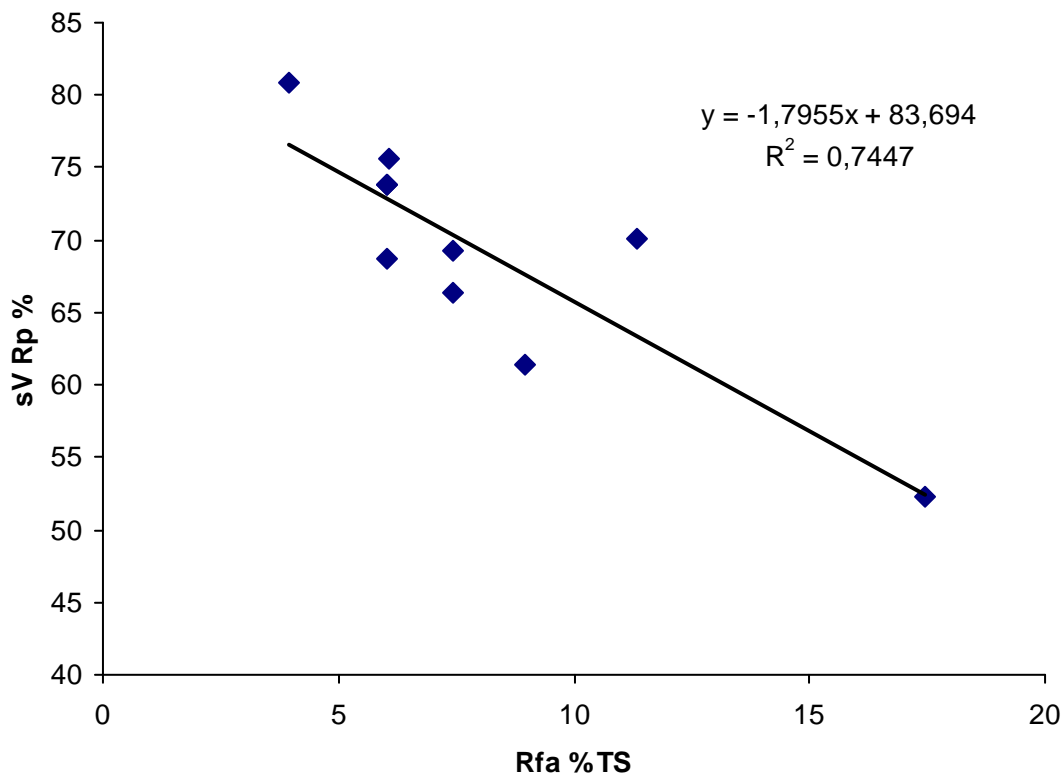


Abbildung 6: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt in der Futter-TS (Rfa % TS) und der scheinbaren Verdaulichkeit des Rohproteins (sV Rp %) bei den Haltungs- und Reduktionsfuttern sowie dem Zuchtfutter (n=6 Tiere/Gruppe)

Die scheinbare Verdaulichkeit von Rohprotein der halbsynthetischen Diäten war mit 93 % deutlich höher. Diese Futter enthielten als Proteinquelle durchweg Casein, welches in höherem Maße verdaulich ist als nicht isoliertes Protein. So ermittelten

SARWAR und PEACE (1986) bei Ratten für Casein scheinbare Verdaulichkeit von 84% bis 94%.

### 1.2.2 Scheinbare Verdaulichkeit der Fette

Die scheinbare Verdaulichkeit des Rohfettes war in den eigenen Untersuchungen eher gering, gleiches wurde von THORBECK et al. (1982) und EGGUM et al. (1982) beschrieben. In den eigenen Untersuchungen zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Rohfettaufnahme und der scheinbaren Fettverdaulichkeit. Bei niedriger Fettaufnahme ging die scheinbare Fettverdaulichkeit zurück (Abbildung 7). Dies kann durch eine relativ zur Aufnahme höhere endogene Fettausscheidung erklärt werden.

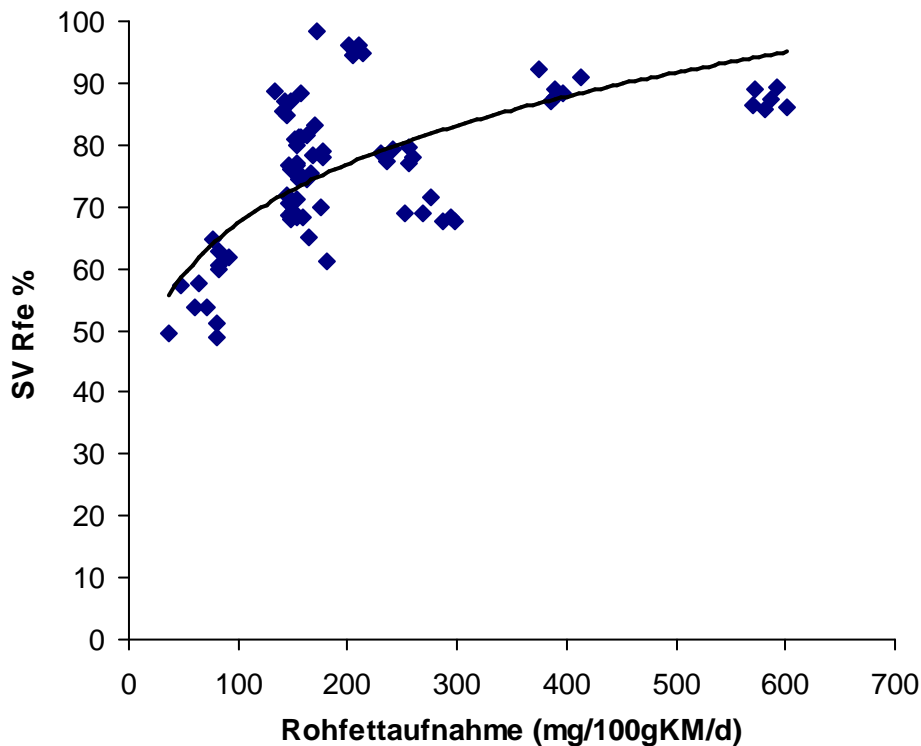


Abbildung 7: Scheinbare Verdaulichkeit des Rohfettes in Abhängigkeit der Fettaufnahme in mg/100g KM/Tag

Diese wurde über Regressionsberechnung zwischen der aufgenommenen Rohfettmengen und der faecalen Fettausscheidung wie folgt geschätzt:

$$Y = 7,88 + 0,23x ; (n = 78, R^2 = 0,67).$$

Das absolute Glied (Fettaufnahme entspricht Null) stellt die endogenen Verluste dar. Diese betragen demnach 7,9 mg/100g KM/Tag (Abbildung 8), was gut mit den bei Pferden mit gleicher Methodik ermittelten Werten übereinstimmt. So erhielt EILMANS (1991) bei ihrer Auswertung der Literatur unter Einbeziehung der eigenen Ergebnisse endogene Fettverluste von 72 mg/kg KM/Tag ( $R=0,57$ ;  $n=32$ ). Auch beim Hund wird ein endogener Fettverlust von 70 mg/kg KM/Tag angegeben (MEYER 1989). Das könnte ein Hinweis dafür sein, dass die Fettverluste bei Säugetieren generell unabhängig vom Ernährungstyp miteinander vergleichbar sind.

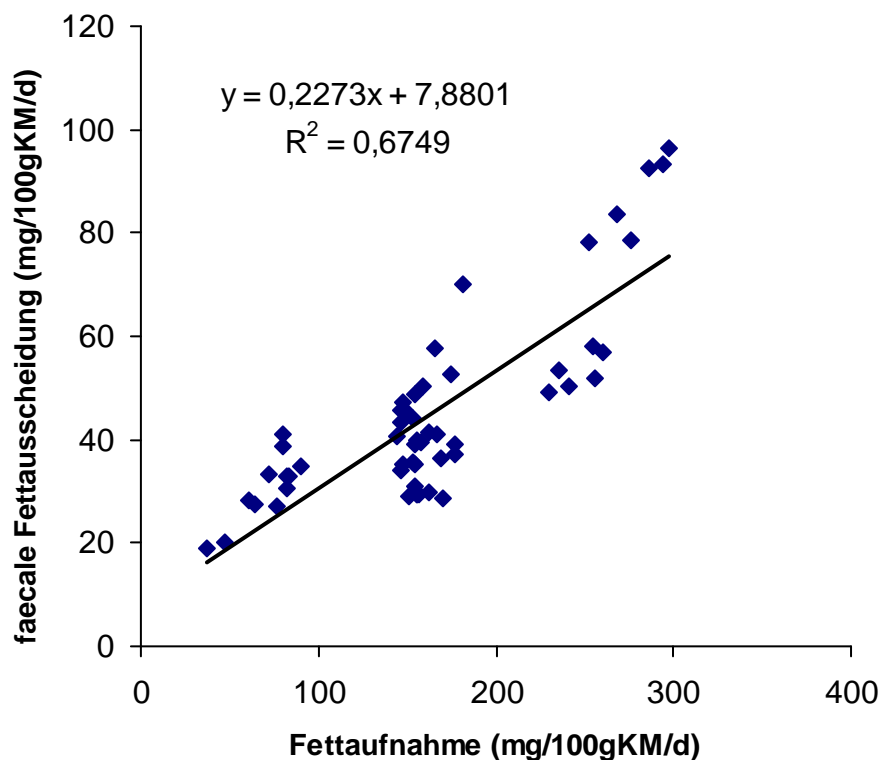


Abbildung 8: Beziehung zwischen der Fettaufnahme und der faecalen Fettausscheidung aller Versuchsgruppen

### 1.2.3 Scheinbare Verdaulichkeit der Kohlenhydrate

Die scheinbare Verdaulichkeit der N-freien Extraktstoffe lag für die konventionellen Futtermittel zwischen 70 und 85 %, wobei die Reduktionsfutter die niedrigste Verdaulichkeit aufwiesen. Aufgrund des relativ niedrigen Stärke- und Zuckergehaltes in den Reduktionsfuttern kann als wahrscheinlich angenommen werden, dass erhebliche Anteile der NfE aus „löslicher“ Faser bestehen, die i.d.R. nicht so hochverdaulich ist wie Stärke und Zucker. Hinzu kommt, dass Rohfaser die

Verdaulichkeit der NfE evtl. sogar stärker beeinträchtigen kann als die der anderen Nährstoffe (KIENZLE et al., 2001).

THORBECK et al. (1982) und EGGUM et al. (1982) ermittelten ebenfalls Werte von über 89 %, wenn viel Stärke enthalten war. Auch bei diesen Autoren war bei rohfaserreichen Futtermitteln die Verdaulichkeit der NfE erheblich reduziert.

Die halbsynthetischen Diäten wiesen eine deutlich höhere Verdaulichkeit der NfE-Fraktion auf, sie lag bei 98 %. Dies erklärt sich durch den hohen Zucker- und Stärkegehalt dieser Futtermittel, da man davon ausgehen kann, dass diese von der Ratte fast vollständig verdaut werden (FLEMING und VOSE, 1979; BAUER et al., 2003), insbesondere bei dem in den halbsynthetischen Diäten zu erwartenden hohen Aufschlussgrad der Stärke.

#### **1.2.4 Scheinbare Verdaulichkeit der Faser**

Die in dieser Untersuchung ermittelten Rohfaserverdaulichkeiten bewegten sich zwischen 10 und 29 %. Bezieht man die halbsynthetischen Diäten mit ein, rangieren die Werte sogar bis 66 %. Auch andere Autoren beschreiben große Schwankungen bei der Verdaulichkeit dieses Rohnährstoffs (THORBECK et al., 1982; EGGUM et al., 1982). Eine Ursache hierfür ist seine nicht-Uniformität, wobei die einzelnen Faserfraktionen, deren Anteile an der Gesamtfaser erheblich schwanken können, sehr unterschiedliche Verdaulichkeiten aufweisen (ZEYNER, 1995).

Die über den Kot ausgeschiedene Menge an Rohfaser war immer etwas niedriger als die aufgenommene Rohfasermenge (Abbildung 9). Die Relation scheint sich nicht zu ändern, was an der Parallelität der resultierenden Regressionsgeraden zur  $y = x$  Geraden zu sehen ist. Dies bedeutet, dass die Verdaulichkeit der Rohfaser innerhalb des überprüften Bereichs unabhängig von der aufgenommenen Rohfasermenge war.

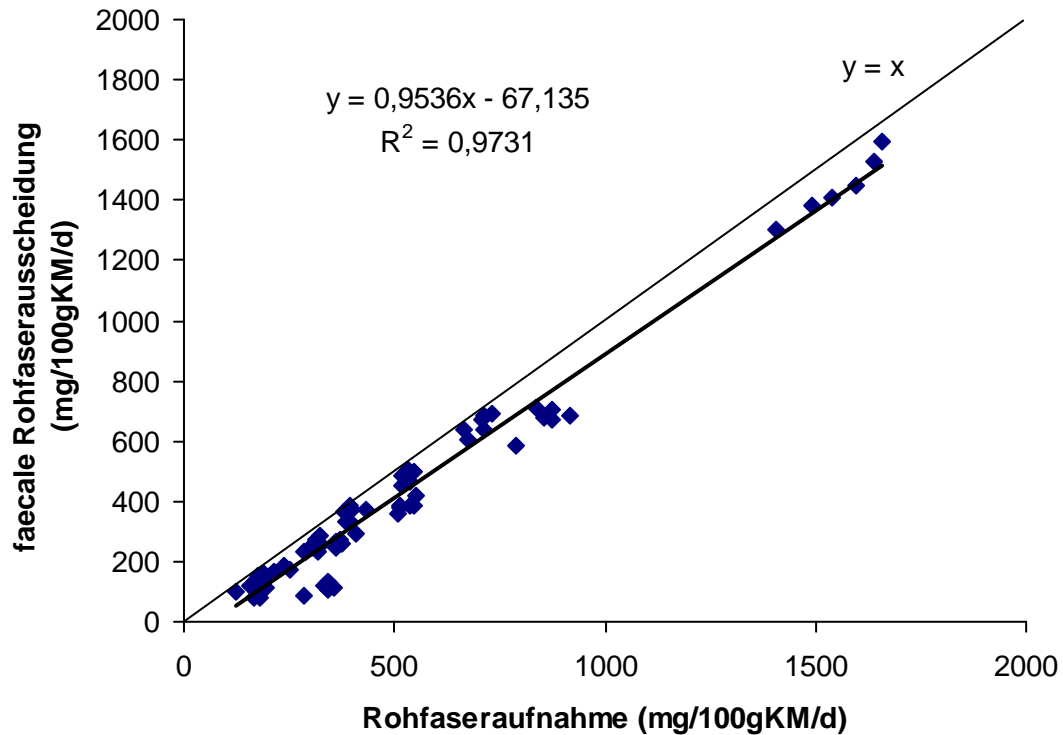


Abbildung 9: Beziehung zwischen der mit dem Futter aufgenommenen Rohfasermenge und der faecalen Rohfaserausscheidung

### 1.3 Scheinbare Verdaulichkeit der Mineralstoffe

Hinsichtlich der scheinbaren Verdaulichkeit in Bezug auf die verschiedenen Futtermitteltypen folgen Natrium, Kalium, Calcium und Phosphor dem gleichen Muster. So war die Verdaulichkeit der Mineralstoffe bei den halbsynthetischen Futtern und dem Zuchtfutter am höchsten, lag bei den Haltungsfuttern im mittleren Bereich und zeigte bei den Reduktionsfuttern die kleinsten Werte.

#### 1.3.1 Calcium und Phosphor

In den eigenen Untersuchungen reichte die Spanne von  $-9,3\%$  bis  $43\%$  für die scheinbare Verdaulichkeit von Calcium und  $8,5 - 58\%$  für die scheinbare Verdaulichkeit von Phosphor. REDDY et al. (1969) untersuchten u. a. die Calcium- und Phosphorverdaulichkeit bei Ratten. Sie erhielten für die scheinbare Verdaulichkeit von Calcium einen Wert von  $25,3\%$ , für Phosphor  $55,2\%$ , wobei beachtet werden muss, dass nur halbsynthetische Futtern verwendet wurden. Mit den Ergebnissen zu diesem Futtern typ besteht demnach eine gute Übereinstimmung.

Die faecale Calciumausscheidung wurde im Wesentlichen durch die Calciumaufnahme bestimmt (Abbildung 10). Die Kot-TS-Menge bzw. der Kotwassergehalt hatten keinen signifikanten Einfluss. Das Ca/P-Verhältnis hat ebenfalls keinen erkennbaren Einfluss auf die faecale Calciumausscheidung bzw. die scheinbare Calciumverdaulichkeit.

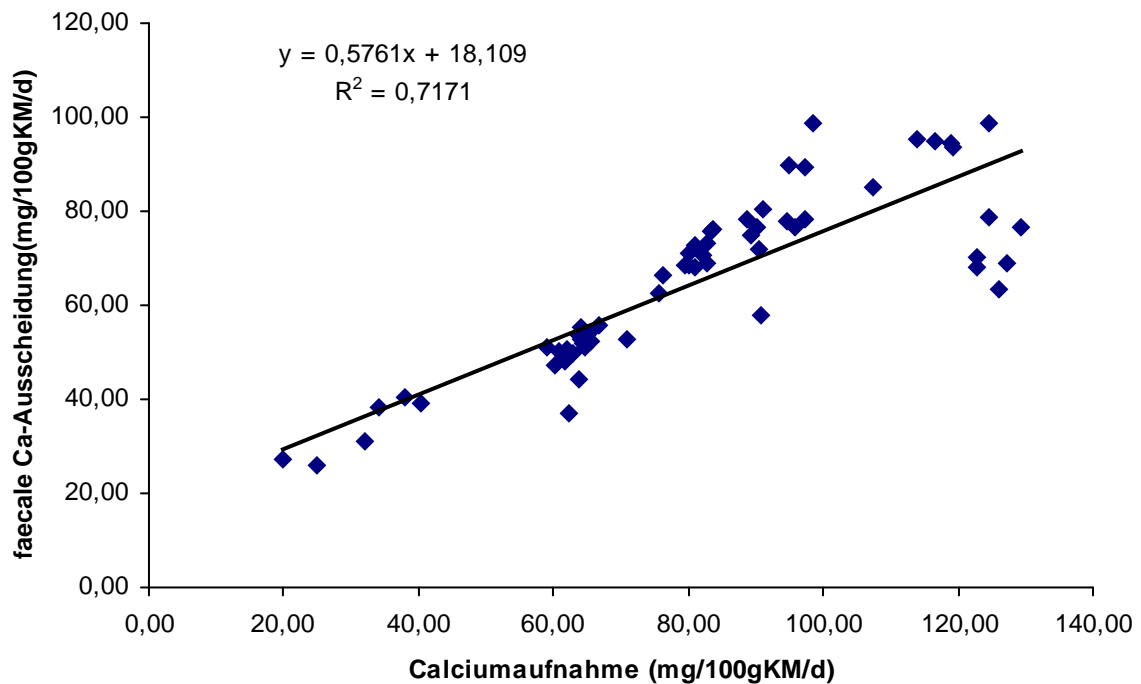


Abbildung 10: Beziehung zwischen der Calciumaufnahme und der faecalen Calciumausscheidung

Beim Phosphor waren die Verhältnisse ähnlich, hier errechnete sich ebenfalls eine deutliche Beziehung zwischen der Aufnahme und faecaler Ausscheidung (Abbildung 11), während alle anderen Parameter keinen eindeutigen Einfluss aufwiesen. Vier Rationen mit engem Ca-Verhältnis wiesen allerdings überdurchschnittliche Phosphorverdaulichkeiten auf. Dabei handelte es sich jedoch um die halbsynthetischen Rationen sowie das Zuchtfutter, von welchen anzunehmen ist, dass die Phosphorverfügbarkeit höher ist, da insbesondere bei den halbsynthetischen Rationen kaum Phytat vorhanden sein dürfte, welches die Phosphorverdaulichkeit beeinträchtigt.

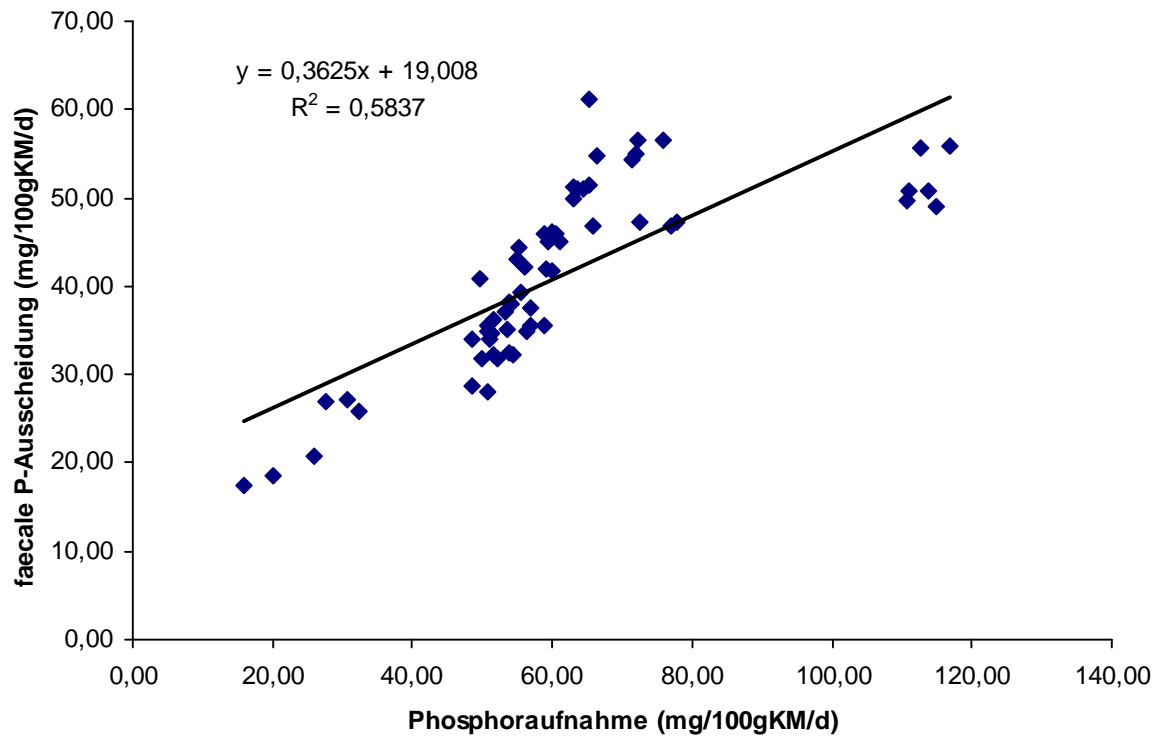


Abbildung 11: Beziehung zwischen der Phosphoraufnahme und der faecalen Phosphorausscheidung

### 1.3.2 Natrium und Kalium

Die scheinbare Verdaulichkeit von Natrium und Kalium war bei hochverdaulichen Rationen deutlich höher als bei weniger verdaulichen. Es gab einen deutlichen Bezug zwischen den Kotmengen und der faecalen Ausscheidung an Natrium und Kalium. Bei Natrium bestand die engste Beziehung zwischen der Kot-TS-Menge (Abbildung 12), während zu Wasserausscheidung und Kotmenge schwächere Beziehungen bestanden. Bei Kalium war dagegen die Kotmenge an sich am engsten mit der faecalen Ausscheidung korreliert. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei anderen Species gemacht z.B. von KIENZLE (1989) bei Katzen und von KIENZLE et al. (2001) an Hunden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass für die Resorption von Natrium und Kalium aus dem Darmlumen vor allem der Konzentrationsgradient zwischen Lumen und den Kompartimenten, in welche resorbiert wird, eine Rolle spielt, weniger aber die absolut vorhandene Menge. Bei allen Rationen, bei welchen die Kotmenge ansteigt, muss daher ein Sicherheitszuschlag bei der Natrium- und Kaliumversorgung eingerechnet werden.

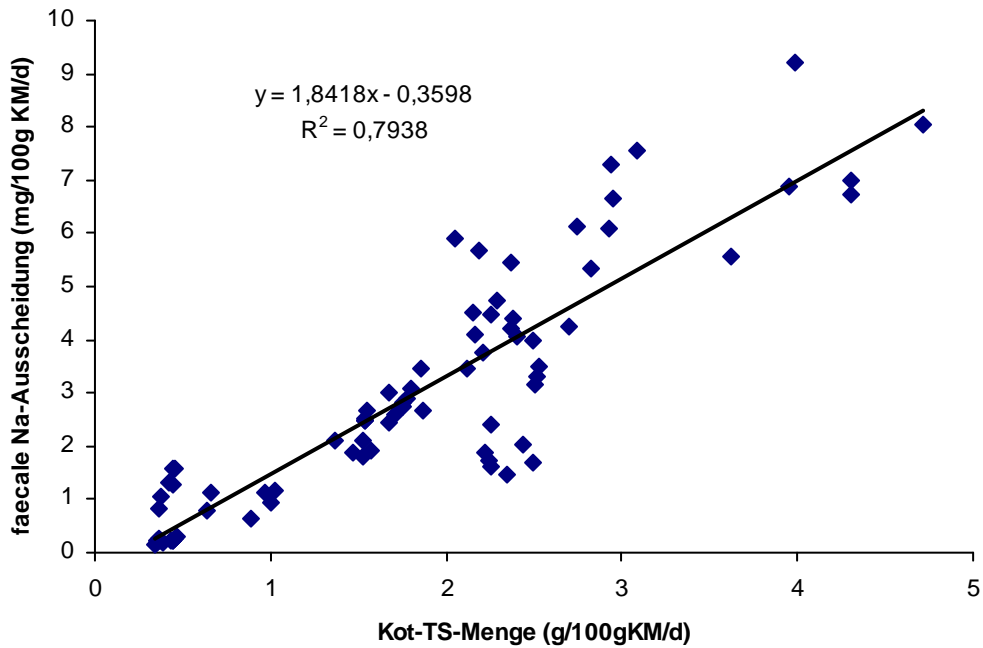


Abbildung 12: Beziehung zwischen der Ausscheidung von Natrium im Kot und der ausgeschiedenen Menge an Kottrockensubstanz

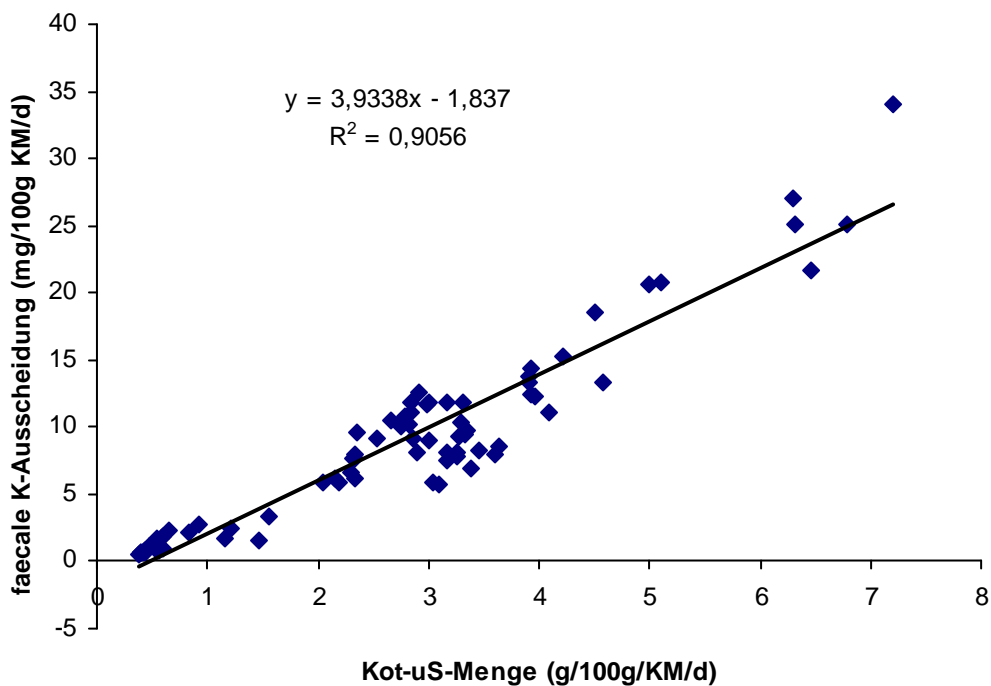


Abbildung 13: Beziehung zwischen der Ausscheidung von Kalium im Kot und der ausgeschiedenen Kotmenge



## 2. Energiebewertung

### 2.1 Bruttoenergiegehalt im Futter

Für die praktische Anwendung der eigenen Arbeiten zu Schätzgleichungen für die Energiebewertung der Ratte stellt sich zuallererst die Frage nach den am besten geeigneten Faktoren für die Berechnung der Bruttoenergie aus den Roh Nährstoffgehalten. Diese könnten durch multiple Regressionsberechnungen mit der GE als abhängiger und den Roh Nährstoffen (Rp, Rfe, Rfa, NfE) als unabhängigen Variablen aus den eigenen Resultaten berechnet werden. Dem steht allerdings entgegen, dass einerseits die Spannweite der Nährstoffgehalte und der Bruttoenergie relativ gering ist, und andererseits nur 13 Beobachtungen für eine Regression mit 4 unabhängigen Variablen zur Verfügung stehen. Es ist daher nicht überraschend, dass sich zum Teil unrealistische Werte ergeben. Daher wurde auf ältere Untersuchungen an Futtermitteln für andere Species zurück gegriffen. Die GfE (1995) empfiehlt, für die Roh Nährstoffe Rp, Rfe, NfE und Rfa bei landwirtschaftlichen Nutztieren die Faktoren 23,9, 39,8, 17,5 und 20,1 in kJ/g einzusetzen. Wurde dies für die eigenen Untersuchungen durchgeführt, so ergab sich kein signifikanter systematischer Unterschied zwischen errechnetem und bestimmtem GE-Wert. Wurden dagegen die Werte 23,85 für Rp, 39,34 für Rfe, 17,17 für NfE und Rfa, die von der GfE 2003 für Fleischfresser empfohlen werden (Roh Nährstoffe stammen hier aus anderen Futtermitteln), verwendet, so ergab sich eine signifikante Unterschätzung (Tabelle 26).

Daher werden für die Ratten im Folgenden die von der GfE für landwirtschaftliche Nutztiere 1995 empfohlenen Brennwerte für die Roh Nährstoffe verwendet. Dies erscheint auch deshalb logisch, da es sich ja bei den Bestandteilen der Alleinfutter im Wesentlichen um ähnliche Einzelfuttermittel handelt, wie sie auch bei den landwirtschaftlichen Nutztieren eingesetzt werden. Eine Ausnahme könnten hier allerdings die halbsynthetischen Rationen bilden. Die Rohfaser in diesen Rationen dürfte kaum Lignin enthalten; die als ADL bestimmten Werte sind vermutlich Artefakte (SCHRAG 1999). Die Bruttoenergie könnte in diesen Futtermitteln daher noch genauer geschätzt werden, wenn für Rohfaser statt 20,1 kJ/g 17 kJ/g eingesetzt werden, da dies nach SCHRAG (1999) dem Brennwert von Rohfaser ohne Lignin am nächsten kommt. Auch bei isolierter Stärke empfiehlt sich ein

Brennwert von 17 kJ/g statt 17,5. Für die halbsynthetischen Rationen werden daher die Faktoren 23,9, 39,8, 17,0 und 17,0 für Rp, Rfe, NfE und Rfa empfohlen.

Tabelle 26: Bruttoenergie in MJ/kg Futter-TS experimentell bestimmt und mit den Faktoren für landwirtschaftliche Nutztiere (GfE 1995), den empfohlenen Faktoren für die halbsynthetischen Futter und den Faktoren für Hund und Katze (GfE 2003) berechnet

Futter	GE (MJ/kg TS) gebombt	GE (MJ/kg TS) berechnet landw. Nutztiere <sup>1)</sup>	GE (MJ/kg TS) berechnet halbsynth. Futter <sup>2)</sup>	GE (MJ/kg TS) berechnet Fleischfresser <sup>3)</sup>
Z	18,94	18,93		18,58
H1	17,64	18,18		17,77
H2	18,09	17,95		17,54
H3	18,51	18,16		17,71
H1n	17,83	18,55		18,14
H2n	18,09	18,03		17,62
H3n	17,80	18,15		17,70
R1	18,75	18,35		17,63
R2	18,06	17,85		17,30
R3	17,89	18,10		17,61
PD1n	18,28		17,93	18,03
PD2n	18,02		18,42	18,51
PD3n	19,76		19,52	19,60

1)  $GE \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 23,9 R_p + 39,8 R_{fe} + 17,5 N_{fE} + 20,1 R_{fa}$

2)  $GE \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 23,9 R_p + 39,8 R_{fe} + 17,0 N_{fE} + 17,0 R_{fa}$

3)  $GE \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 23,85 R_p + 39,34 R_{fe} + 17,17 N_{fE} + 17,17 R_{fa}$

Rohnährstoffe in g/kg TS

## 2.2 Bruttoenergiegehalt im Kot

Bei diesem Parameter lagen in den eigenen Untersuchungen 78 Beobachtungen vor, die Spannweite der Ergebnisse war deutlich größer als beim Futter. Daher konnte hier eine entsprechende Regressionsberechnung vorgenommen werden. Es errechneten sich die folgenden Faktoren für die Rohnährstoffe in kJ/g:

Für Rp 22,34, für Rfe 48,13, für NfE 17,8 und für Rfa 21,35.

In Tabelle 27 ist der durchschnittliche Gehalt an Bruttoenergie (GE) im Kot dargestellt, wie er mittels Bombenkalorimetrie ermittelt bzw. mit Hilfe der eigens ermittelten Faktoren berechnet wurde. Der Unterschied zwischen diesen beiden Werten bei den einzelnen Tiere betrug im Mittel 0,26 MJ/kg Kot-TS (maximal 0,77 MJ/kg) und war somit nicht signifikant.

Tabelle 27: Bruttoenergie im Kot in MJ/kg TS jeweils experimentell bestimmt und rechnerisch mittels eigener Faktoren bestimmt (n=6Tiere/Gruppe, MW  $\pm$  SD)

Futter	GE (MJ/kg TS) gebombt	GE (MJ/kg TS) berechnet <sup>1)</sup>
Z	17,33 $\pm$ 0,24	17,41 $\pm$ 0,16
H1	16,91 $\pm$ 0,08	17,08 $\pm$ 0,10
H2	16,78 $\pm$ 0,25	16,64 $\pm$ 0,16
H3	17,45 $\pm$ 0,21	17,05 $\pm$ 0,14
H1n	16,92 $\pm$ 0,14	17,10 $\pm$ 0,09
H2n	16,30 $\pm$ 0,21	16,06 $\pm$ 0,16
H3n	16,85 $\pm$ 0,14	16,93 $\pm$ 0,22
R1	18,86 $\pm$ 0,11	18,60 $\pm$ 0,04
R2	17,02 $\pm$ 0,24	17,22 $\pm$ 0,09
R3	17,26 $\pm$ 0,09	17,65 $\pm$ 0,16
PD1n	15,54 $\pm$ 0,5	15,30 $\pm$ 0,40
PD2n	13,81 $\pm$ 0,47	13,72 $\pm$ 0,43
PD3n	17,82 $\pm$ 0,58	18,01 $\pm$ 0,34

1)  $GE \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 22,34 R_p + 48,13 R_{fe} + 17,8 N_{fE} + 21,35 R_{fa}$   
Rohnnährstoffe in g/kg TS

Werden die durch Regressionsanalyse berechneten Futter-Faktoren für den Kot verwendet, so kommt es zur systematischen Unterschätzung der Energie im Kot, und damit bei der Berechnung der verdaulichen Energie zur Überschätzung. Dies geht mit der Aussage von SCHRAG (1999) bei Hund und Katze konform, dass es bei Anwendung von Standardbrennwerten für Futter auf Kot zu einer Unterschätzung des Kotbrennwertes kommt.

Wurden in den eigenen Untersuchungen für die Berechnung der Bruttoenergie (GE) im Kot die von der GfE (1995) empfohlenen Faktoren verwendet, kam es im

Vergleich zur experimentell bestimmten Kot-GE zur einer systematischen mittleren Abweichung von 0,36 MJ/kg, der maximale Fehler betrug 1,11 MJ/kg Kot-TS (Tabelle 28). Dieser Unterschied ist, obwohl statistisch signifikant, ernährungsphysiologisch bei der Berechnung der DE irrelevant.

Tabelle 28: Bruttoenergie im Kot in MJ/kg TS jeweils experimentell bestimmt und mittels den Faktoren für Nutztiere (GfE 1995) berechnet (n=6Tiere/Gruppe, MW ± SD)

Futter	GE (MJ/kg TS) gebombt	GE (MJ/kg TS) berechnet <sup>1)</sup>
Z	17,33 ± 0,24	17,16 ± 0,08
H1	16,91 ± 0,08	16,97 ± 0,06
H2	16,78 ± 0,25	16,42 ± 0,15
H3	17,45 ± 0,21	16,91 ± 0,12
H1n	16,92 ± 0,14	16,83 ± 0,13
H2n	16,30 ± 0,21	15,76 ± 0,16
H3n	16,85 ± 0,14	16,72 ± 0,15
R1	18,86 ± 0,11	18,12 ± 0,04
R2	17,02 ± 0,24	16,93 ± 0,05
R3	17,26 ± 0,09	17,40 ± 0,09
PD1n	15,54 ± 0,5	14,83 ± 0,29
PD2n	13,81 ± 0,47	13,55 ± 0,35
PD3n	17,82 ± 0,58	17,43 ± 0,28

1)  $GE \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 23,9 R_p + 39,8 R_{fe} + 17,5 N_{fE} + 20,1 R_{fa}$   
Rohnährstoffe in g/kg TS

In Tabelle 29 ist die verdauliche Energie (DE), einmal experimentell mittels Bombenkalorimetrie ermittelt und einmal anhand der von der GfE (1995) empfohlenen Faktoren für die verdaulichen Rohnährstoffe berechnet, dargestellt. Vergleicht man diese Werte, so erhält man einen Unterschied, der zwischen 0,2 % und 4,6 % liegt. Im Mittel wird somit die DE um 0,23 MJ/kg Futter überschätzt, was aus ernährungsphysiologischer Sicht jedoch keine Rolle spielt. Diese Ergebnisse stimmen mit Beobachtungen an Hunden, Katzen und Pferden überein. So wies die Bruttoenergie (GE) in Hunde- und Katzenkot geringere Werte auf, wenn sie mit Rohnährstoff-Faktoren für Futter bestimmt wurde, als die experimentell ermittelte Kot-GE (SCHÖNMEIER, 2003). FEHRLE (1999) ermittelte den Bruttoenergiegehalt

in Pferdekot und erhielt für die experimentell bestimmte GE höhere Werte (0,66 – 0,96 MJ/kg Kot-TS) als für die mittels Futter-Faktoren berechnete Kot-GE. Setzte sie diese Faktoren zur Berechnung der verdaulichen Energie anhand der verdaulichen Nährstoffe ein, wurde die DE gegenüber der experimentell bestimmten DE um 2 bis 18 % überschätzt. Im Vergleich mit anderen Species sind somit die hier vorliegenden Unterschiede bei der Ratte gering.

Die Nährstoffgruppen haben im Kot offensichtlich eine andere Zusammensetzung als im Futter. Bei der Rohfaser ist dies leicht zu erklären, da das unverdauliche Lignin, das einen hohen Brennwert aufweist, im Kot ansteigen dürfte. Beim Rohfett ist anzunehmen, dass es sich im Kot zumindest teilweise um mikrobiell gebildete Lipide mit anderen Brennwerten handelt. Diese enthalten mehr langkettige, gesättigte Fettsäuren mit höherem Brennwert. KAMPHUES et al. (1999) führten Untersuchungen zur Nährstoffverdaulichkeit an Pankreasgang-ligierten Schweinen durch. Sie kamen zu dem Schluss, dass es sich bei dem faecalem Fett größtenteils um von Mikroorganismen des Dickdarmes synthetisiertes, nicht resorbierbares Fett handelt. Ergebnisse von älteren Studien an Schweinen und Hunden unterstützen diese These (MASON und JUST, 1976; PIDGEON and STORMBECK, 1982).

Tabelle 29: Die verdauliche Energie (DE) experimentell mittels Bombenkalorimetrie bestimmt und anhand der Faktoren für verdaulichen Rohrnährstoffe (GfE 1995) berechnet (n=6Tiere/Gruppe, MW  $\pm$  SD)

Futter	DE (MJ/kg TS) experimentell	DE (MJ/kg TS) berechnet <sup>1)</sup>
Z	15,83 $\pm$ 0,15	15,89
H1	13,01 $\pm$ 0,28	13,42
H2	13,98 $\pm$ 0,21	13,84
H3	12,92 $\pm$ 0,1	12,89
H1n	13,36 $\pm$ 0,19	13,98
H2n	13,36 $\pm$ 0,52	13,84
H3n	12,49 $\pm$ 0,24	12,67
R1	9,99 $\pm$ 0,34	9,93
R2	12,44 $\pm$ 0,12	12,37
R3	11,47 $\pm$ 0,07	11,67
PD1n	17,02 $\pm$ 0,12	17,23
PD2n	16,85 $\pm$ 0,08	17,81
PD3n	18,44 $\pm$ 0,03	18,55

1)  $DE \cdot 10^{-3} \text{ [MJ/kg]} = 23,9 \text{ vRp} + 39,8 \text{ vRfe} + 17,5 \text{ vNfE} + 20,1 \text{ vRfa}$

Verdauliche Rohrnährstoffe in g/kg TS

## 2.3 Verdauliche Energie (DE)

### 2.3.1 Schätzung mittels Faktoren

Auf der Stufe der verdaulichen Energie (DE) lässt sich anhand der vorliegenden unterschiedlichen Energie- und Nährstoffverdaulichkeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit aussagen, dass eine gemeinsame faktorielle Schätzgleichung anhand der Rohrnährstoffe für alle Rattenfutter nicht erstellt werden kann. Die Verdaulichkeit der halbsynthetischen Rationen war so erheblich besser, auch bei vergleichbarem Fasergehalt, dass sie mit Sicherheit mit einer gemeinsamen Schätzgleichung mit Faktoren für die Rohrnährstoffe nicht befriedigend geschätzt werden können. Die halbsynthetischen Rationen müssen separat betrachtet werden.

### 2.3.1.1 Konventionelle Futtermittel: Faktoren für die Rohnährstoffe

Für die übrigen, sogenannten konventionellen Futtermittel muss aufgrund unterschiedlicher Verdaulichkeiten der Rohnährstoffe noch eine weitere Kategorisierung vorgenommen werden. Die Haltungsfutter können – zumindest in der vorliegenden Untersuchung – nicht mit dem Zuchtfutter verglichen werden, und bei den Reduktionsfuttern sind die Unterschiede zu den beiden anderen Gruppen ebenfalls erheblich. Es könnten dann aufgrund der erhobenen Daten lediglich Faktoren für Haltungsfutter vorgeschlagen werden, die sich aus mittlerer Verdaulichkeit der Rohnährstoffe und den von der GfE (1995) festgelegten Bruttobrennwerten ergeben. Die mittleren Verdaulichkeiten in dieser Gruppe betragen für Rfa 20,9 %, für Rohfett 69,5 %, für Rohprotein 71,3 % und für NfE 81,4 %. Es errechnen sich in kJ DE/g Rohnährstoff die Faktoren 4,2 für Rohfaser, 27,0 für Rohfett, 17,0 für Rohprotein und 14,3 für N-freie Extraktstoffe.

Die Ergebnisse der Schätzung stimmen dann zwar gut mit den experimentell bestimmten Daten überein (Tabelle 30) (Mittelwert der Abweichungen 0,45, maximale Abweichung 0,85 MJ/kg TS), die Spannweite der Nährstoffgehalte ist jedoch innerhalb der Gruppe sehr gering, so dass auch hier Einschränkungen für den Gültigkeitsbereich erforderlich sind. Wie die Anwendung der Gleichung auf die Reduktionsfutter zeigt, dürfen insbesondere faserreiche Futter nicht mit dieser Gleichung geschätzt werden. Der Gültigkeitsbereich wird daher auf einen Fasergehalt bis einschließlich 7 % eingeschränkt. Der Protein- und Fettgehalt wird ebenfalls auf einen der Spannweite nahekommenden Bereich eingeschränkt. Es können dieselben Werte übernommen werden wie für die halbsynthetischen Diäten (Rp 15-25 % und Rfe < 7 %).

Tabelle 30: Verdauliche Energie (DE) der Haltungsfutter in MJ/kg Futter-TS experimentell bestimmt und mittels errechneten Rohnährstofffaktoren geschätzt (n=6Tiere/Gruppe)

Futter	DE (MJ/kg TS) experimentell	DE (MJ/kg TS) geschätzt <sup>1)</sup>
H1	13,01	13,48
H2	13,98	13,34
H3	12,92	13,33
H1n	13,36	13,69
H2n	13,36	13,38
H3n	12,49	13,34

1)  $DE \cdot 10^{-3} \text{ [MJ/kg]} = 17,0 R_p + 27,0 R_{fe} + 14,3 N_{fE} + 4,2 R_{fa}$

Rohnährstoffe in g/kg TS

### 2.3.1.2 Halbsynthetische Rationen: Faktor für die Energieverdaulichkeit

Für halbsynthetische Rationen können nur sehr vorläufige Überlegungen angestellt werden, da diese nur auf drei Verdauungsversuchen basieren. Die Energieverdaulichkeit lag zwischen 90,0 und 95,2 % und zeigte somit keine relevanten Unterschiede. Daher bietet es sich an, einfach den Bruttoenergiegehalt ( $GE \cdot 10^{-3} \text{ [MJ/kg]} = 23,9 R_p + 39,8 R_{fe} + 17,0 N_{fE} + 17,0 R_{fa}$ ; Rohnährstoffe in g/kg TS) mit 0,95 zu multiplizieren. Vergleicht man die Werte der experimentell bestimmten verdaulichen Energie (DE) mit denen anhand der Schätzgleichung ermittelten (Tabelle 31), findet man eine gute Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung beträgt 0,23 MJ/kg, die maximale 0,35 MJ/kg TS. Der Unterschied liegt somit zwischen 0,8 und 2,0 %.

Da diese Ergebnisse an Rationen mit bestimmten Nährstoffverhältnissen gewonnen wurden, sollte diese Schätzmöglichkeit allerdings nicht ohne Prüfung auf andersartige Futtermittel übertragen werden. Deshalb wird der Gültigkeitsbereich zunächst auf einen  $R_{fe}$ -Gehalt bis 7 % , einen  $R_p$ -Gehalt von 15-25 % und einen  $R_{fa}$ -Gehalt bis 7 % in der TS limitiert.



Tabelle 31: Verdauliche Energie (DE) der halbsynthetischen Futter experimentell bestimmt und anhand der Energieverdaulichkeit bestimmt (n=6 Tiere/Gruppe)

Futter	DE (MJ/kg TS) experimentell	DE (MJ/kg TS) berechnet <sup>1)</sup>
PD1n	17,17	17,03
PD2n	17,15	17,50
PD3n	18,75	18,54

1) DE [MJ/kg] =GE [MJ/kg]\*0,95

### 2.3.2 Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand des Fasergehaltes

Zwischen dem Gehalt an Rohfaser in der Trockensubstanz und der Verdaulichkeit der Energie bestand eine negative Beziehung (Abbildung 14). Es ist aber deutlich erkennbar, dass die halbsynthetischen Rationen hier gewissermaßen als „Ausreißer“ über der mittels der konventionellen Futter berechneten Regressionslinie liegen. Daher ist eine gemeinsame Bewertung auch auf der Basis der Rohfaser wenig sinnvoll. Dies trifft auch auf die übrigen Faserbestimmungsmethoden zu, sofern sie sich zur Schätzung der Energieverdaulichkeit eignen. Die jeweiligen Korrelationskoeffizienten zwischen dem Fasergehalt als unabhängige und der Energieverdaulichkeit als abhängige Variable betragen für ADF 0,87, für NDF 0,77 und für Rohfaser 0,86. ADL eignete sich dagegen nicht zur Verdaulichkeitsschätzung. Es gab auch keine Beziehung zwischen dem Ligningehalt in der NDF und der Rohfaserverdaulichkeit. Eine mögliche Erklärung ist, dass eventuell einige der Ligninwerte Artefakte sind. Bei hohen Gehalten an Pektin oder Alginaten kann es zur Ausfällung von Pektin- oder Alginsäure kommen, wobei die ausgefällte Säure fälschlicherweise als Lignin gemessen wird (KRIMMEL, 1998).

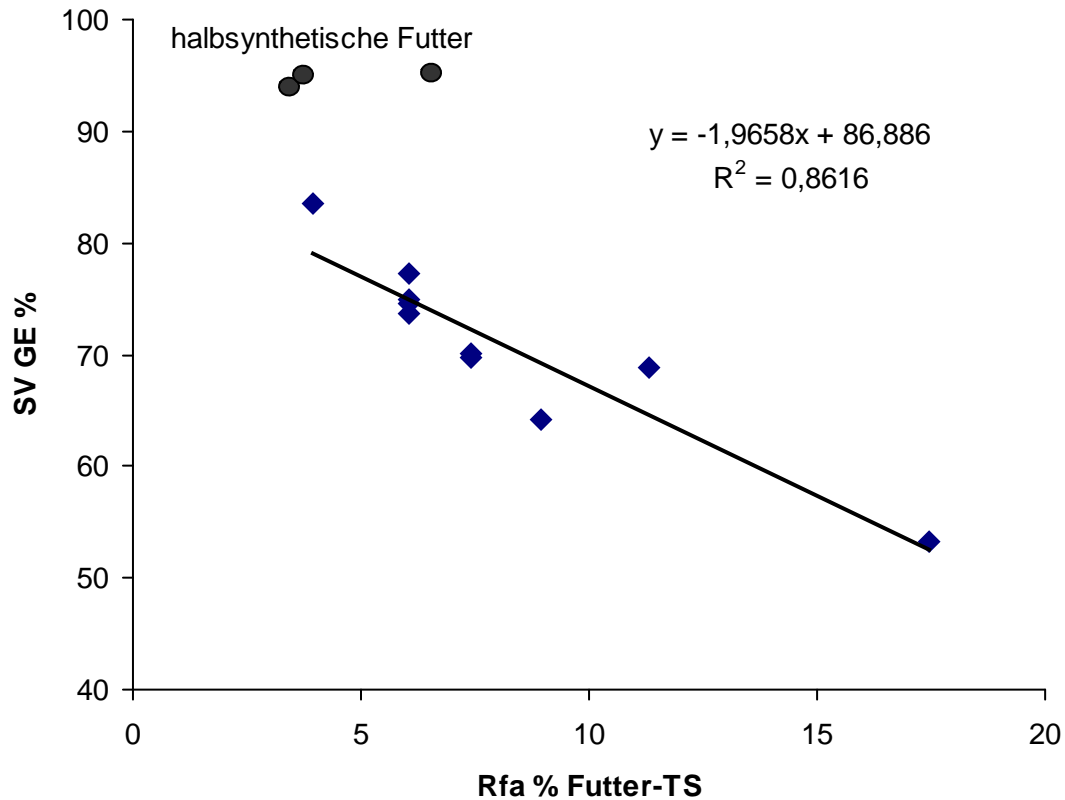


Abbildung 14: Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt in der Futter-TS und der scheinbaren Verdaulichkeit der Bruttoenergie, exkl. der halbsynthetischen Futter

Es erscheint daher sinnvoll, die Schätzung der Energieverdaulichkeit mit der Rohfaser oder mit der ADF vorzunehmen. Verwendet man Rohfaser mit der Schätzgleichung:

$SV\ GE\ [\%] = 86,88 - 1,97\ Rfa\ [\% TS]$ , setzt diese in  $DE = GE * sV\ GE/100$  ein und geht von der mittels der Faktoren der GfE (1995) berechneten Bruttoenergie aus, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit der experimentell ermittelten DE (Tabelle 32). Der mittlere Fehler betrug 0,59 MJ/kg, der maximale 1,07 MJ/kg, wenn die faserreichen Reduktionsfutter und das Zuchtfutter mit einbezogen werden. Für die Haltungsfutter errechnet sich ein mittlerer Fehler von 0,59 MJ/kg und eine maximale Abweichung von 0,64 MJ/kg. Geht man statt von der errechneten von der direkt bestimmten GE aus, so sinkt der mittlere Fehler für alle Futter auf 0,44 MJ/kg (maximale Abweichung 0,92 MJ/kg), für die Haltungsfutter alleine ergibt sich sogar nur noch ein mittlerer Fehler von 0,29 MJ/kg (maximal 0,47 MJ/kg). Für ADF betragen die mittleren Abweichungen bei Verwendung der berechneten Bruttoenergie 0,57 MJ/kg für alle Futtermittel und 0,49 MJ/kg für die Haltungsfutter,

die maximalen Abweichungen waren mit 1,0 MJ/kg in beiden Fällen sogar deutlich größer. Wurde die direkt bestimmte Bruttoenergie verwendet, so errechneten sich mit 0,47 bzw. 0,40 MJ/kg ebenfalls keine geringeren mittleren Abweichungen als für Rohfaser (maximal 0,72 bzw. 0,65 MJ/kg). Es gibt daher nach den bisher vorliegenden Ergebnissen keinen Hinweis, dass sich bei Verwendung der ADF zur Schätzung der Energieverdaulichkeit eine bessere Genauigkeit ergibt als für Rohfaser.

Tabelle 32: Verdauliche Energie (DE) experimentell bestimmt und anhand der scheinbaren Verdaulichkeit der Rohfaser berechnet, einmal mittels Faktoren (GfE 1995) berechneter GE, einmal mit experimentell bestimmter Bruttoenergie (GE)

Futter	DE (MJ/kg TS) Experimentell	DE (MJ/kg TS) anhand Rfa geschätzt/GE berechnet <sup>1)</sup>	DE (MJ/kg TS) anhand Rfa geschätzt/GE experimentell <sup>2)</sup>
Z	15,83	14,98	14,99
H1	13,01	13,63	13,23
H2	13,98	13,45	13,56
H3	12,92	13,13	13,39
H1n	13,36	13,92	13,37
H2n	13,36	13,52	13,57
H3n	12,49	13,13	12,87
R1	9,99	9,65	9,86
R2	12,44	11,53	11,67
R3	11,47	12,54	12,40

1) u. 2)  $DE [MJ/kg] = GE [MJ/kg] \cdot sV \text{ GE}/100$ ,

wobei  $SV \text{ GE} [\%] = 86,88 - 1,97 \text{ Rfa} [\% \text{ TS}]$

Die Schätzung der DE anhand der Energieverdaulichkeit, die wiederum über die Rohfaser geschätzt wird, war damit genauer als die Schätzung mittels Faktoren für die Rohnährstoffe. Außerdem konnten hierbei mit einer Gleichung sowohl die Haltungsfutter als auch die Reduktionsfutter und das Zuchtfutter geschätzt werden. Dieser Weg erscheint daher vielversprechend.

## **2.4 Umsetzbare Energie (ME)**

### **2.4.1 Schätzung mittels Faktoren**

Um die ME zu schätzen, müssen zunächst dieselben Faktoren zugrunde gelegt werden, die für die DE verwendet wurden. Abzüge müssen für Rohprotein und Rohfaser vorgenommen werden. Beim Rohprotein wird für die Ausscheidung energiereicher Endprodukte des N-Stoffwechsels pro Gramm verdauliches Rohprotein 5,2 kJ abgezogen. Bei der Rohfaser könnte im Analogieschluss zu anderen Species geschätzt werden, dass nur 60 % der verdaulichen Energie aus Rohfaser umsetzbar sind, da die Verdauung durch Fermentation erfolgt, bei welcher entsprechende Verluste auftreten (JEROCH et al., 1999). Es können dann die Faktoren für die DE entsprechend korrigiert werden. Bei dieser Vorgehensweise bleiben jedoch eventuell mikrobiell verdaute Bestandteile der NfE wie z.B. Pektin unberücksichtigt, wenn hier die Rohnährstoffe eingesetzt werden.

#### **2.4.1.1 Konventionelle Futtermittel: Faktoren für die Rohnährstoffe**

Bei den Haltungsfuttern kann der Faktor für die GE des Rohproteins um 5,2 kJ/g korrigiert werden. Der Faktor für ME aus Protein wird dann aus diesem Wert mittels der mittleren Proteinverdaulichkeit berechnet. Es ergibt sich ein Wert von 13,3 kJ ME pro Gramm Rohprotein. Der Faktor für die Rohfaser wird mit 0,6 multipliziert, er beträgt dann nur noch 2,5 kJ ME/g Rfa.

Zum Vergleich der Schätzdaten wurde die experimentell bestimmte DE N-korrigiert (S. Kapitel II A 3.3.1), indem pro Gramm vRp 5,2 kJ abgezogen wurden. Der Unterschied zwischen der experimentell bestimmten N-korrigierten DE (DE<sub>expN-korr.</sub>) und den Daten anhand der Schätzgleichung beträgt im Mittel 0,46, maximal 1,27 MJ/kg TS, was einer Abweichung zwischen 1,1 und 9,1 % entspricht (Tabelle 33). Es gilt hier im Wesentlichen das für die DE bei der faktoriellen Schätzmethode bereits Gesagte.

Tabelle 33: Umsetzbare Energie (ME) der Haltungsfutter durch N-Korrektur der Verdaulichen Energie (DE) ermittelt und anhand Faktoren geschätzt

Futter	ME (MJ/kg TS) DEexp N-korr.	ME (MJ/kg TS) geschätzt <sup>1)</sup>
H1	12,94	12,79
H2	13,90	12,63
H3	12,85	12,66
H1n	13,29	13,00
H2n	13,29	12,68
H3n	12,42	12,66

1)  $ME \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 13,3 R_p + 27,0 R_{fe} + 14,3 N_f E + 2,5 R_{fa}$

Rohnährstoffe in g/kg TS

#### 2.4.1.2 Halbsynthetische Rationen: Faktor für die Energieverdaulichkeit

Bei halbsynthetischen Rationen würden bei Unterstellung einer der Energieverdaulichkeit vergleichbaren Rohproteinverdaulichkeit dann 4,9 kJ/g Protein abgezogen, um die N-korrigierte DE zu schätzen. Ein Faktor für Verluste durch fermentierte Rohfaser ist bei diesen drei Rationen nicht zu ermitteln, da die Rohfaserverdaulichkeit zwischen 20 und über 60 % schwankt. Berechnete man allerdings aus der verdaulichen Rohfaser die Verluste, so ergaben sich Werte zwischen 0,06 und 0,3 kJ/g Futter-TS. Im Geltungsbereich der faktoriellen Gleichung von maximal 7 % Rohfaser kann daher die Fermentation dieses Nährstoffs vernachlässigt werden und die geschätzte N-korrigierte DE der ME gleichgesetzt werden.

Die Berechnung der umsetzbaren Energie würde dann für halbsynthetische Diäten wie folgt ausgeführt werden:

$$ME [MJ/kg] = 0,95 GE [MJ/kg] - 0,0049 [MJ/g \text{ Protein}].$$

Werden die auf diese Weise berechneten Werte mit den Daten, die mittels N-Korrektur der experimentell bestimmten DE ermittelt wurden, verglichen, so findet man eine Abweichung, die im Mittel 0,63 und maximal 0,81 MJ/kg TS beträgt (Tabelle 34). Der Unterschied liegt somit zwischen 2 und 4,8 %.

Tabelle 34: Umsetzbare Energie (ME) der halbsynthetischen Futter mittels N-Korrektur der DE ermittelt und anhand der Energieverdaulichkeit geschätzt

Futter	ME (MJ/kg TS) DEexp N-korr.	ME (MJ/kg TS) geschätzt <sup>1)</sup>
PD1n	<b>16,93</b>	<b>16,12</b>
PD2n	<b>16,74</b>	<b>16,41</b>
PD3n	<b>18,35</b>	<b>17,61</b>

1)  $ME [MJ/kg] = 0,95 GE [MJ/kg] - 0,0049 [MJ/g Rp]$

#### 2.4.2 Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand des Fasergehaltes

Auch bei diesem Verfahren kann eine N-Korrektur der DE vorgenommen werden. Ebenso wie die scheinbare Verdaulichkeit der Bruttoenergie kann auch die des Rohproteins mittels Rohfaser geschätzt werden. Die Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt in der Futter-TS und der scheinbaren Verdaulichkeit des Rohproteins wurde bereits in Kapitel IV B 1.2.1 dargestellt. Danach wird die Rohproteinverdaulichkeit nach folgender Gleichung berechnet:

$$sV Rp = 83,7 - 1,8 Rfa [\% TS]$$

Dann kann von der verdaulichen Energie (DE) das mit dem Faktor 5,2 multiplizierte verdauliche Rohprotein subtrahiert werden. Die umsetzbare Energie (ME) wird somit anhand folgender Gleichung geschätzt:

$$ME [MJ/kg] = DE [MJ/kg] - 0,0052 [MJ/g] vRp [g/kg TS] \text{ wobei}$$

$$vRp = Rp * (83,7 - 1,8 Rfa [\% TS]) / 100$$

Die anhand dieser Schätzmethode ermittelten Werte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der experimentell ermittelten N-korrigierten DE (Tabelle 35).

Tabelle 35: Die umsetzbare Energie (ME) durch N-Korrektur der experimentell bestimmten verdaulichen Energie (DE) ermittelt und basierend auf den Fasergehalt geschätzt

Futter	ME (MJ/kg TS) DEexp N-korr	ME (MJ/kg TS) geschätzt <sup>1)</sup>
Z	15,73	14,05
H1	12,94	12,88
H2	13,90	12,69
H3	12,85	12,44
H1n	13,29	13,15
H2n	13,29	12,76
H3n	12,42	12,44
R1	9,95	9,24
R2	12,37	10,91
R3	11,42	11,90

1)ME [MJ/kg]=DE [MJ/kg] – 0,0052 [MJ/g] vRp [g/kg TS],  
wobei vRp=Rp\*(83,7-1,8 Rfa [% TS])/100

### 2.4.3 Verwendung von Schätzformeln für Schweine

#### 2.4.3.1 Gleichung mit Faktoren für die verdaulichen Nährstoffe

Um die umsetzbare Energie (ME) der verwendeten Rattenfutter zu schätzen, wurden die entsprechenden Gehalte an verdaulichen Rohnährstoffen in die von der GfE (1987) empfohlene Gleichung (s. Kapitel II A 3.3.2) eingesetzt (Tabelle 36):

$$ME \cdot 10^{-3} \text{ [MJ/kg TS]} = 21,0 vRp + 37,4 vRfe + 14,4 vRfa + 17,1 vNfe - 1,4 \text{ Zucker} - 6,8$$

(BFS-100)

(verdauliche) Nährstoffe in g/kg TS

Diese Vorgehensweise stellt somit eine Kombination aus experimenteller Bestimmung (der Verdaulichkeiten der Rohnährstoffe) und Schätzgleichung dar, wobei hinzukommt, dass die Schätzgleichung von einer anderen Species stammt.

Es erfolgte ein Vergleich der hierbei ermittelten Werte (ME Fakt verd Rnst) mit der experimentell ermittelten N-korrigierten DE (DEexp N-korr.) (Tabelle 36). Der mittlere

Unterschied betrug 0,94 MJ/kg Futter-TS, der maximale 1,89 MJ/kg. Die Abweichung lag somit zwischen 0,9 und 10,3 %. Dabei tendierte die mittels der Schätzformel für das Schwein anhand der verdaulichen Nährstoffe berechnete ME zu geringfügig niedrigeren Werten als die experimentell bestimmte N-korrigierte DE (Abbildung 15), was sich leicht dadurch erklären lässt, dass bei der ME-Berechnung eine BFS-Korrektur vorgenommen wird. Besonders auffällig war dies bei dem Futter PD3, das einen überdurchschnittlichen Pektingehalt aufwies. Die für das Schwein entwickelte Formel zu Berechnung der ME anhand der verdaulichen Nährstoffe kann nach diesen Ergebnissen auf Rattenfutter einschließlich halbsynthetischer Rationen unbedenklich angewendet werden, es sei denn, es handelt sich um eine sehr unübliche Zusammensetzung.

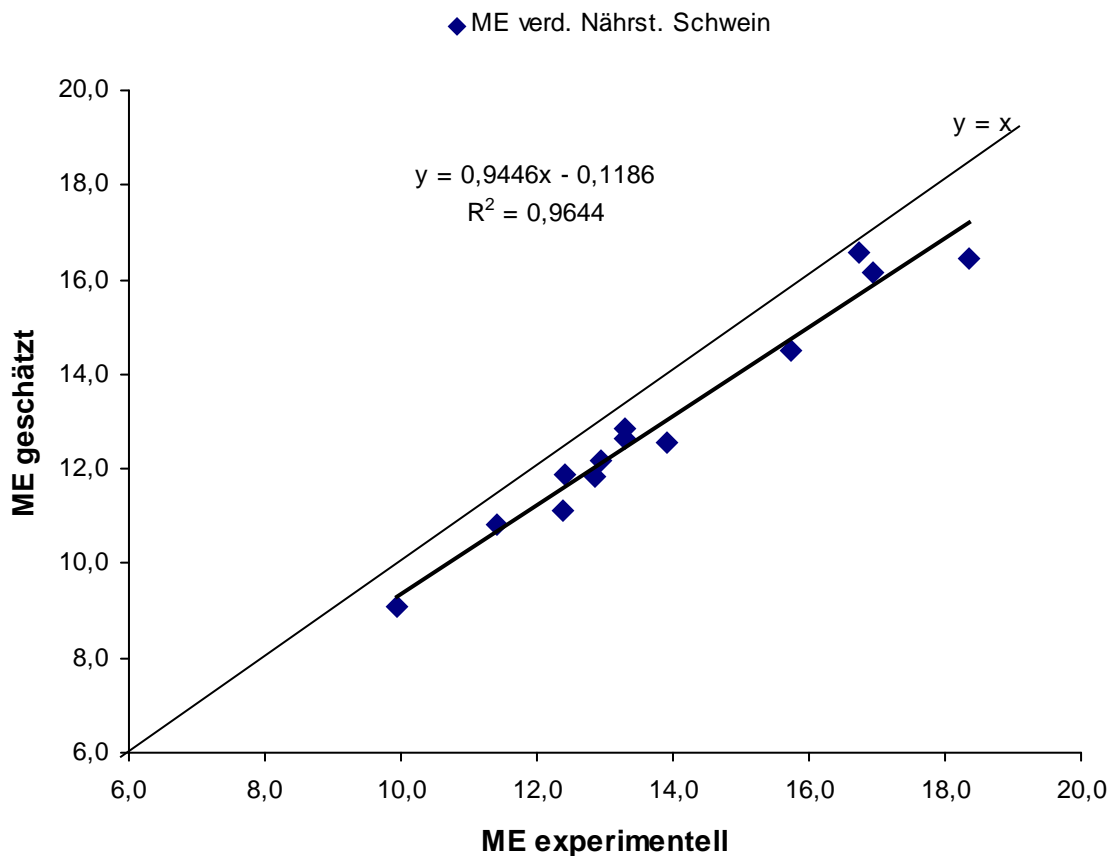


Abbildung 15: Umsetzbare Energie (ME) mittels der Schätzformel für Schweine ermittelt im Vergleich mit der N-korrigierten experimentell bestimmten verdaulichen Energie (DE<sub>exp</sub> N-korr)



#### 2.4.3.2 Gleichung mit Faktoren für Roh Nährstoffe, Stärke und Zucker

Des Weiteren wurden die Roh Nährstoff-, Stärke- und Zuckergehalte in nachstehende, von der GfE (1997) empfohlenen Schätzgleichung (s. Kapitel II A 3.2.2) eingesetzt (Tabelle 36):

$$\text{ME } 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 22,3 \text{ Rp} + 34,1 \text{ Rfe} + 17,0 \text{ Stärke} + 16,8 \text{ Zucker} + 7,4 \text{ oR} \\ - 10,9 \text{ Rfa}$$

wobei  $\text{oR} = \text{oS} - (\text{Rp} + \text{Rfe} + \text{Stärke} + \text{Zucker} + \text{Rfa})$ , Roh Nährstoffe in g/kg TS

Bei der Schätzgleichung für Schweine, in welche lediglich Roh Nährstoffe sowie Stärke und Zucker eingesetzt wurden, gab es einen deutlichen Unterschied zwischen konventionellen und halbsynthetischen Rationen. Während die konventionellen Futtermittel einschließlich der Zucht und Reduktionsfutter damit recht gut geschätzt wurden, ergab sich für die halbsynthetischen FM eine systematische Unterschätzung. Ließ man die halbsynthetischen Futter außer Acht und verwendete die Schätzformel für Schweine nur für die Haltungsfutter, die Reduktionsfutter und das Zuchtfutter, betrug der mittlere Fehler 0,58 MJ/kg, der maximale 1,37 (Abweichung 0,8 – 11,1 %).

Tabelle 36: Umsetzbare Energie (ME) anhand der experimentell bestimmten DE mittels N-Korrektur (DE exp N-korr.) und mittels Schätzgleichungen für Schweinefutter bestimmt. Einmal mittels der Faktoren für verdauliche Rohnährstoffe (GfE 1987) und einmal anhand der Faktoren für Rohnährstoffe, Stärke und Zucker (GfE 1987) (n=6Tiere/Gruppe, MW)

Futter	ME (MJ/kg TS) DEexp N-korr. <sup>1)</sup>	ME (MJ/kg TS) Schwein Fakt verd Rnst <sup>2)</sup>	ME (MJ/kg TS) Schwein Fakt Rnst, St, Z <sup>3)</sup>
Z	15,73	14,49	14,54
H1	12,94	12,16	12,76
H2	13,90	12,57	12,89
H3	12,85	11,84	12,53
H1n	13,29	12,87	13,39
H2n	13,29	12,63	12,98
H3n	12,42	11,87	12,61
R1	9,95	9,10	9,26
R2	12,37	11,13	11,00
R3	11,42	10,80	11,73
PD1n	16,93	16,15	15,64
PD2n	16,74	16,59	15,27
PD3n	18,35	16,46	15,16

1)  $ME [MJ/kg] = DE [MJ/kg] - 0,0052 vRp$

2)  $ME \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 21,0 vRp + 37,4 vRfe + 14,4 vRfa + 17,1 vNfE - 1,4 \text{ Zucker} - 6,8$   
(BFS-100)

3)  $ME \cdot 10^{-3} [MJ/kg] = 22,3 Rp + 34,1 Rfe + 17 \text{ Stärke} + 16,8 \text{ Zucker} + 7,4 oR - 10,9 Rfa$   
wobei  $oR = oS - (Rp + Rfe + St + Z + Rfa)$

alle Angaben in g/kg TS

### 3. Bewertung der angewandten Schätzverfahren

#### 3.1 Konventionelle Futtermittel

Für die konventionellen Futtermittel ergaben sich beim Vergleich mit der N-korrigierten experimentell ermittelten verdaulichen Energie (DEexp N-korr.) zwei nahezu gleichwertige Schätzmethoden für die umsetzbare Energie (ME) und zwar

A) Schätzung anhand des Rohfasergehaltes:

Berechnung der GE:

$$GE \cdot 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 23,9 R_p + 39,8 R_{fe} + 17,5 N_{fE} + 20,1 R_{fa}$$

Schätzung der Verdaulichkeit der Energie anhand der Rohfaser:

$$sV_{GE} [\%] = 86,88 - 1,97 R_{fa} [\% \text{ TS}]$$

Berechnung der DE:

$$DE = GE \cdot sV_{GE} / 100$$

Schätzung der Verdaulichkeit des Rohproteins:

$$sV_{Rp} = 83,7 - 1,8 R_{fa} [\% \text{ TS}]$$

$$vRp = R_p \cdot sV_{Rp} / 100$$

N-Korrektur:

$$ME [\text{MJ/kg}] = DE [\text{MJ/kg}] - 0,0052 vRp$$

Angaben in g/kg TS

und B) Verwendung der Schätzgleichung für Schweinefutter:

$$ME \cdot 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 22,3 R_p + 34,1 R_{fe} + 17,0 \text{ Stärke} + 16,8 \text{ Zucker} + 7,4 oR \\ - 10,9 R_{fa}$$

$$oR = oS - (R_p + R_{fe} + St + Z + R_{fa})$$

Wie Abbildung 16 zeigt, sind beide Schätzmethoden in ihrer Genauigkeit sehr ähnlich, wobei die Schätzformel für das Schweinefutter insbesondere das Zuchtfutter genauer schätzte. Da diese Formel deutlich einfacher anzuwenden ist, wird sie für die Praxis empfohlen. Halbsynthetische Rationen sollten mit beiden Formeln jedoch nicht geschätzt werden.

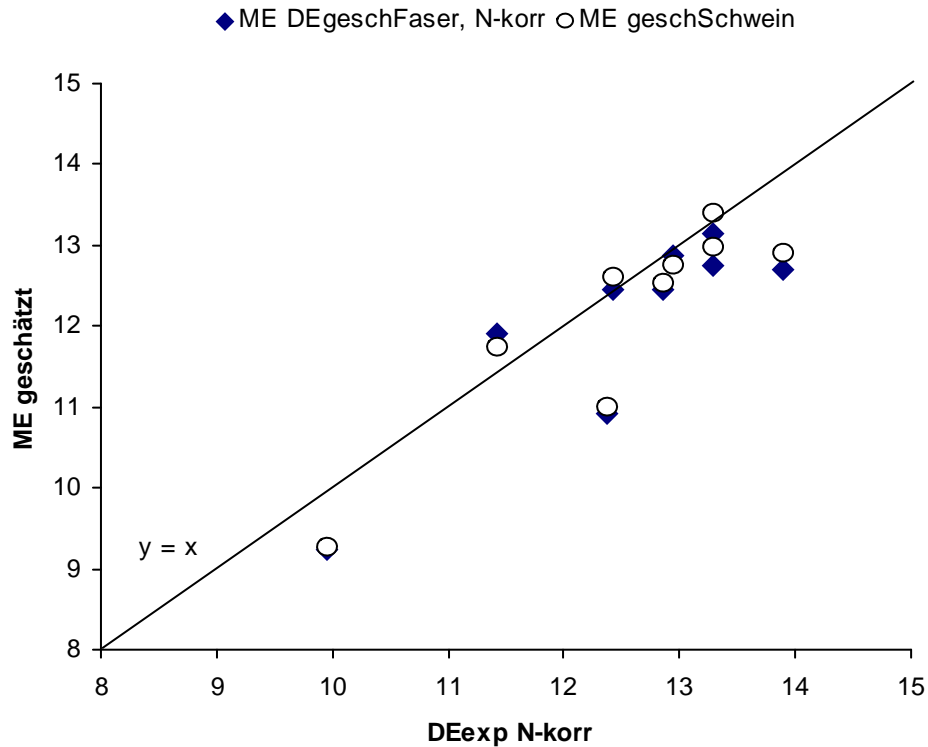


Abbildung 16: Umsetzbare Energie auf der Faser basierend und anhand der Gleichung für Schweine geschätzt im Vergleich untereinander und mit der experimentell ermittelten N-korrigierten DE (DEexp N-korr.), halbsynthetische Futter ausgeschlossen

### 3.2 Halbsynthetische Rationen

Die beste Schätzgenauigkeit für die verdauliche Energie (DE) der halbsynthetischen Rationen lieferte, bei allerdings nur drei Beobachtungen, die Bruttoenergie (GE), berechnet aus

$$GE \cdot 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 23,9 R_p + 39,8 R_{fe} + 17,0 N_{fE} + 17,0 R_{fa}$$

(Rohnährstoffe in g/kg TS)

multipliziert mit dem Faktor 0,95.

Durch die anschließende Proteinkorrektur von 4,9 kJ/g  $R_p$  ergibt sich eine gute Näherung zur ME. Diese Berechnungen lassen sich in folgender Schätzformel zusammenfassen:

$$ME \cdot 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 17,8 R_p + 37,8 R_{fe} + 16,2 (R_{fa} + N_{fE})$$

### 3.3 Schlussbetrachtung

Verwendet man die angegebenen Schätzgleichungen für

konventionelle Rationen:

$$\text{ME } 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 22,3 \text{ Rp} + 34,1 \text{ Rfe} + 17,0 \text{ Stärke} + 16,8 \text{ Zucker} + 7,4 \text{ oR} \\ - 10,9 \text{ Rfa}$$

wobei  $\text{oR} = \text{oS} - (\text{Rp} + \text{Rfe} + \text{St} + \text{Z} + \text{Rfa})$ , Rohnährstoffe in g/kg TS

und halbsynthetische Rationen:

$$\text{ME } 10^{-3} [\text{MJ/kg TS}] = 17,8 \text{ Rp} + 37,8 \text{ Rfe} + 16,2 (\text{Rfa} + \text{NfE})$$

so ergibt sich für alle geprüften Futtermittel eine hervorragende Schätzgenauigkeit. (Abbildung 17).

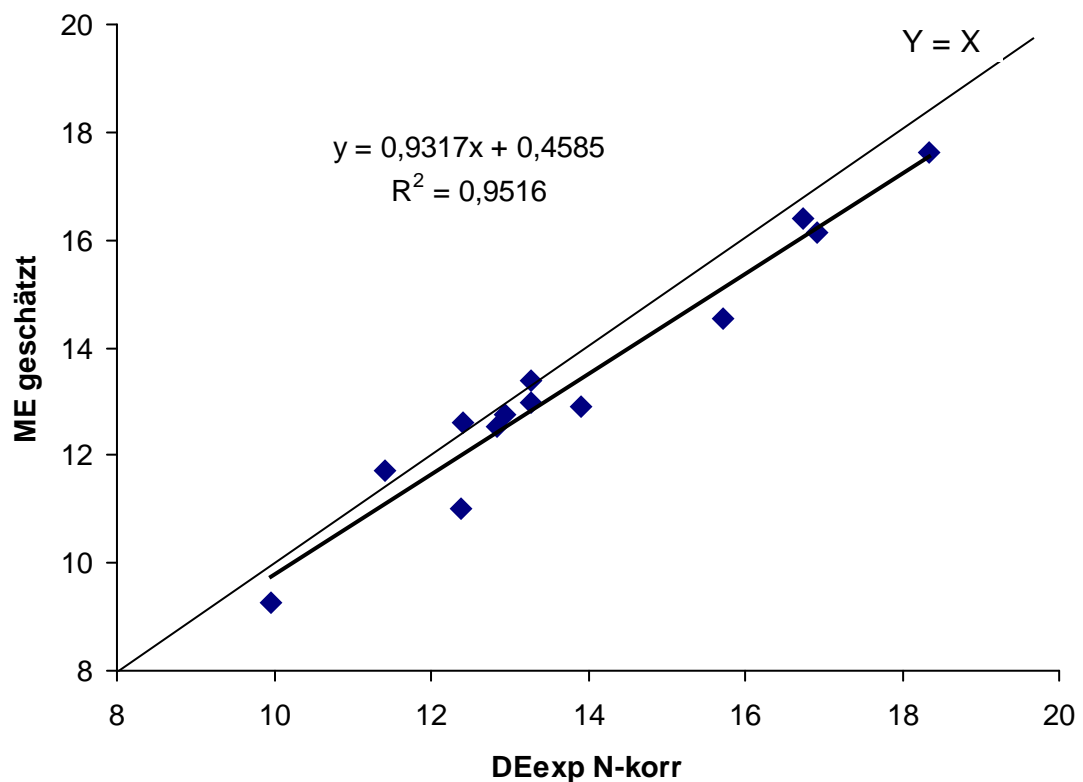


Abbildung 17: Vergleich der auf verschiedene Weise geschätzten umsetzbaren Energie (ME) mit der experimentell ermittelten N-korrigierten DE (DEexp N-korr) aller Futtermittel

## V. ZUSAMMENFASSUNG

Karin Schug: Untersuchungen zur Energiebewertung von Standardmischfuttermitteln für Ratten

In der vorliegenden Arbeit wurden in 13 Verdauungsversuchen an je 6 männlichen Lewisratten (5-16 Wochen alt) grundlegende Daten zur Verdaulichkeit und Energiebewertung erarbeitet. Es wurden drei konventionelle Haltungsfutter zunächst vor dem Autoklavieren (H1n, H2n, H3n) und anschließend in autoklavierter Form (H1, H2, H3) geprüft. Weiterhin erfolgte die Durchführung je eines Verdauungsversuchs mit einem Zuchtfutter (Z), mit je drei faserreicheren sogenannten Reduktionsfuttern (R1, R2, R3) und je drei halbsynthetischen Experimentalfuttern (PD1n, PD2n, PD3n). Im Futter und Kot wurden folgende Parameter bestimmt: Bruttoenergie (bombenkalorimetrisch), Rohnährstoffe (Trockensubstanz, organische Substanz, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, stickstofffreie Extraktstoffe [NfE]), Calcium, Phosphor, Natrium und Kalium. Außerdem erfolgte eine Analyse der Futtermittel auf Zucker und Stärke, Neutral Detergent Fibre [NDF], Acid Detergent Fibre [ADF] und Acid Detergent Ligin. Die folgenden Ergebnisse (Tabelle 37) wurden erzielt:

1. Die halbsynthetischen Futtermittel wiesen eine erheblich höhere Verdaulichkeit von Energie und Rohnährstoffen auf als alle konventionellen Futtermittel. Das Zuchtfutter war besser verdaulich als die Haltungsfutter, während die Verdaulichkeit der rohfaserreichen Reduktionsfutter geringer war.
2. Zwischen dem Rohfasergehalt in der Trockensubstanz und der Verdaulichkeit der Energie bestand bei allen konventionellen Rationen eine signifikante negative Beziehung. Für NDF und ADF bestanden ebenfalls solche Beziehungen, die jedoch nicht straffer waren als zu Rohfaser.
3. Durch Autoklavieren wurde die Verdaulichkeit der Rohproteins, nicht aber der anderen Nährstoffe und der Energie insgesamt reduziert.
4. Die scheinbare Verdaulichkeit des Natriums und des Kaliums war bei den schwerer verdaulichen Futtermitteln niedriger. Zwischen der Kotmengen und der faecalen Ausscheidung dieser Elemente bestanden signifikante Beziehungen.

Dagegen war die faecale Ausscheidung von Calcium und Phosphor vor allem mit der Aufnahme dieser Elemente korreliert.

Tabelle 37: Scheinbare Verdaulichkeit (sV) der Rohnährstoffe und der Energie in Prozent (n=6 Tiere/Gruppe, MW  $\pm$  SD)

Futter	Trocken- substanz	orga- nische Substanz	Roh- protein	Rohfett	Rohfaser	N-freie Extrakt- stoffe	Energie
Z	82,0 $\pm$ 0,7	84,2 $\pm$ 0,6	80,9 $\pm$ 1,1	87,3 $\pm$ 1,5	9,8 $\pm$ 3,3	90,5 $\pm$ 0,7	83,5 $\pm$ 0,8
H1	72,6 $\pm$ 1,7	75,2 $\pm$ 1,5	68,7 $\pm$ 1,8	78,3 $\pm$ 2,7	20,1 $\pm$ 3,5	81,4 $\pm$ 1,4	73,7 $\pm$ 1,6
H2	75,5 $\pm$ 0,9	78,6 $\pm$ 1,0	73,8 $\pm$ 1,8	57,5 $\pm$ 5,9	28,9 $\pm$ 1,7	84,6 $\pm$ 0,8	77,3 $\pm$ 1,1
H3	68,0 $\pm$ 0,4	71,1 $\pm$ 0,3	66,4 $\pm$ 0,7	73,2 $\pm$ 2,5	27,1 $\pm$ 2,4	78,5 $\pm$ 0,6	69,8 $\pm$ 0,6
H1n	73,6 $\pm$ 1,1	76,6 $\pm$ 1,1	73,8 $\pm$ 2,8	78,3 $\pm$ 1,0	15,8 $\pm$ 3,1	82,2 $\pm$ 1,1	75,0 $\pm$ 1,0
H2n	73,4 $\pm$ 2,3	77,9 $\pm$ 1,8	75,6 $\pm$ 3,5	56,1 $\pm$ 5,1	24,1 $\pm$ 4,5	84,3 $\pm$ 1,1	73,9 $\pm$ 2,9
H3n	68,5 $\pm$ 1,2	71,6 $\pm$ 1,2	69,3 $\pm$ 1,3	73,7 $\pm$ 5,7	9,5 $\pm$ 6,0	77,6 $\pm$ 1,2	70,1 $\pm$ 1,3
R1	53,5 $\pm$ 1,7	54,9 $\pm$ 1,6	52,2 $\pm$ 2,5	68,8 $\pm$ 1,3	7,2 $\pm$ 1,9	69,5 $\pm$ 1,7	53,3 $\pm$ 1,8
R2	67,0 $\pm$ 0,8	69,4 $\pm$ 0,7	70,1 $\pm$ 1,0	76,2 $\pm$ 6,7	21,6 $\pm$ 3,9	79,0 $\pm$ 0,7	68,9 $\pm$ 0,7
R3	62,9 $\pm$ 0,4	65,2 $\pm$ 0,4	61,3 $\pm$ 0,8	71,5 $\pm$ 7,3	6,7 $\pm$ 3,2	74,5 $\pm$ 0,8	64,2 $\pm$ 0,4
PD1n	92,9 $\pm$ 0,8	94,8 $\pm$ 0,6	92,9 $\pm$ 0,6	88,4 $\pm$ 1,5	40,9 $\pm$ 11	97,4 $\pm$ 0,3	94,0 $\pm$ 0,6
PD2n	93,8 $\pm$ 0,3	95,7 $\pm$ 0,3	92,7 $\pm$ 0,7	96,9 $\pm$ 1,4	65,6 $\pm$ 3,3	97,8 $\pm$ 0,1	95,2 $\pm$ 0,4
PD3n	94,4 $\pm$ 0,2	95,3 $\pm$ 0,2	92,6 $\pm$ 0,3	91,7 $\pm$ 2,0	19,2 $\pm$ 4,0	98,0 $\pm$ 0,2	94,9 $\pm$ 0,2

Für die Energiebewertung werden folgende Empfehlungen gegeben:

Bei Vorliegen der Verdaulichkeit der Rohnährstoffe kann die Gleichung zur Berechnung der umsetzbaren Energie (ME) für das Schwein für alle Futtermittel verwendet werden:

$$\begin{aligned}
 \text{ME } 10^{-3} \text{ [MJ/kg TS]} = & \quad +21,0 \text{ verdauliches Rohprotein} \\
 & \quad +37,4 \text{ verdauliches Rohfett} \\
 & \quad +14,4 \text{ verdauliche Rohfaser} \\
 & \quad +17,1 \text{ verdauliche N-freie Extraktstoffe} \\
 & \quad -1,4 \text{ Zucker} \\
 & \quad -6,8 \text{ (BFS-100)}
 \end{aligned}$$

Angaben in g/kg TS. Die BFS ist definiert als die Summe von verdaulichen N-freien Extraktstoffen und verdaulicher Rohfaser abzüglich der Gehalte an Stärke und Zucker.

Diese Gleichung ergibt sehr ähnliche Ergebnisse wie die experimentell bestimmte N-korrigierte verdauliche Energie.

Für die Schätzung anhand der Nährstoffzusammensetzung können folgende Gleichungen empfohlen werden:

Konventionelle Futtermittel:

$$\begin{aligned} \text{ME } 10^{-3} \text{ [MJ/kg TS]} = & +22,3 \text{ Rohprotein} \\ & +34,1 \text{ Rohfett} \\ & +17,0 \text{ Stärke} \\ & +16,8 \text{ Zucker} \\ & + 7,4 \text{ organischer Rest} \\ & -10,9 \text{ Rohfaser} \end{aligned}$$

Angaben in g/kg TS. Der organische Rest ist definiert als die organische Substanz, von der die Summe aus Rohprotein, Rohfett, Stärke, Zucker und Rohfaser abgezogen wird.

Halbsynthetische Rationen:

$$\begin{aligned} \text{ME } 10^{-3} \text{ [MJ/kg TS]} = & +17,8 \text{ Rohprotein} \\ & +37,8 \text{ Rohfett} \\ & +16,2 \text{ (Rohfaser + N-freie Extraktstoffe)} \end{aligned}$$

Angaben in g/kg TS.



## VI. SUMMARY

Karin Schug: Investigations on the estimation of available energy in standard mixed feeds for rats

In this study, 13 digestion trials with six male Lewis rats (5-16 weeks of age) per group were performed in order to gain basic data of digestibility coefficients and a base for the estimation of metabolizable energy content. Three conventional maintenance feeds were used prior to heat sterilization (H1n, H2n, H3n) and after heat sterilization (H1, H2, H3). Additionally, a breeder feed (Z), three so-called weight-reduction feeds with high fibre contents (R1, R2, R3) and three semi-synthetic experimental feeds (PD1n, PD2n, PD3n) were used. The following parameters were measured in food and faeces: gross energy (bomb calorimetry), crude nutrients (dry matter, organic matter, crude protein, crude fat, crude fibre, nitrogen-free extracts [NfE]), calcium, phosphorus, sodium and potassium. Additionally, the feeds were analysed for sugar and starch, neutral detergent fibre [NDF], acid detergent fibre [ADF] and acid detergent lignin. The results were as follows:

1. The semi-synthetic feeds had distinctively higher energy and crude nutrient digestibilities than all conventional feeds. The breeder feed had higher digestibilities than the maintenance feeds, whereas the high-fibre weight-reduction feeds were less digestible.
2. There was a significant negative correlation between the crude fibre content (in DM) and the digestible energy (DE) content for all conventional feeds. Similar correlations – but not with higher correlation coefficients - existed for NDF and ADF, respectively.
3. Heat sterilization led to a reduction of crude protein digestibility but did not influence the digestibility of other nutrients or energy.
4. The apparent digestibility of sodium and potassium was lower for the high-fibre feeds. The faecal excretion of these elements was significantly correlated to overall faecal output. In contrast, the faecal excretion of calcium and phosphorus was mainly correlated to the intake of these elements.

Table 38: Apparent digestibilities (aD) of nutrients and energy in per cent (n=6 animals/group, mean  $\pm$  SD)

Feed	Dry matter	Organic matter	Crude protein	Crude fat	Crude fibre	NfE	Gross energy
Z	82.0 $\pm$ 0.7	84.2 $\pm$ 0.6	80.9 $\pm$ 1.1	87.3 $\pm$ 1.5	9.8 $\pm$ 3,3	90.5 $\pm$ 0.7	83.5 $\pm$ 0.8
H1	72.6 $\pm$ 1.7	75.2 $\pm$ 1.5	68.7 $\pm$ 1.8	78.3 $\pm$ 2.7	20.1 $\pm$ 3,5	81.4 $\pm$ 1.4	73.7 $\pm$ 1.6
H2	75.5 $\pm$ 0.9	78.6 $\pm$ 1.0	73.8 $\pm$ 1.8	57.5 $\pm$ 5.9	28.9 $\pm$ 1,7	84.6 $\pm$ 0.8	77.3 $\pm$ 1.1
H3	68.0 $\pm$ 0.4	71.1 $\pm$ 0.3	66.4 $\pm$ 0.7	73.2 $\pm$ 2.5	27.1 $\pm$ 2,4	78.5 $\pm$ 0.6	69.8 $\pm$ 0.6
H1n	73.6 $\pm$ 1.1	76.6 $\pm$ 1.1	73.8 $\pm$ 2.8	78.3 $\pm$ 1.0	15.8 $\pm$ 3,1	82.2 $\pm$ 1.1	75.0 $\pm$ 1.0
H2n	73.4 $\pm$ 2.3	77.9 $\pm$ 1.8	75.6 $\pm$ 3.5	56.1 $\pm$ 5.1	24.1 $\pm$ 4,5	84.3 $\pm$ 1.1	73.9 $\pm$ 2.9
H3n	68.5 $\pm$ 1.2	71.6 $\pm$ 1.2	69.3 $\pm$ 1.3	73.7 $\pm$ 5.7	9.5 $\pm$ 6,0	77.6 $\pm$ 1.2	70.1 $\pm$ 1.3
R1	53.5 $\pm$ 1.7	54.9 $\pm$ 1.6	52.2 $\pm$ 2.5	68.8 $\pm$ 1.3	7.2 $\pm$ 1,9	69.5 $\pm$ 1.7	53.3 $\pm$ 1.8
R2	67.0 $\pm$ 0.8	69.4 $\pm$ 0.7	70.1 $\pm$ 1.0	76.2 $\pm$ 6.7	21.6 $\pm$ 3,9	79.0 $\pm$ 0.7	68.9 $\pm$ 0.7
R3	62.9 $\pm$ 0.4	65.2 $\pm$ 0.4	61.3 $\pm$ 0.8	71.5 $\pm$ 7.3	6.7 $\pm$ 3,2	74.5 $\pm$ 0.8	64.2 $\pm$ 0.4
PD1n	92.9 $\pm$ 0.8	94.8 $\pm$ 0.6	92.9 $\pm$ 0.6	88.4 $\pm$ 1.5	40.9 $\pm$ 11	97.4 $\pm$ 0.3	94.0 $\pm$ 0.6
PD2n	93.8 $\pm$ 0.3	95.7 $\pm$ 0.3	92.7 $\pm$ 0.7	96.9 $\pm$ 1.4	65.6 $\pm$ 3,3	97.8 $\pm$ 0.1	95.2 $\pm$ 0.4
PD3n	94.4 $\pm$ 0.2	95.3 $\pm$ 0.2	92.6 $\pm$ 0.3	91.7 $\pm$ 2.0	19.2 $\pm$ 4,0	98.0 $\pm$ 0.2	94.9 $\pm$ 0.2

For the estimation of energy content, the following recommendation is made:

If the digestibilities of nutrients are known, the equation for the estimation of metabolizable energy (ME) in pigs can be used for all types of feeds:

$$\begin{aligned} \text{ME } 10^{-3} \text{ [MJ/kg DM]} = & +21.0 \text{ digestible crude protein} \\ & +37.4 \text{ digestible crude fat} \\ & +14.4 \text{ digestible crude fibre} \\ & +17.1 \text{ digestible NfE} \\ & - 1.4 \text{ sugar} \\ & - 6.8 \text{ (BFS-100)} \end{aligned}$$

Nutrients in g/kg DM. BFS is defined as the sum of digestible NfE and digestible crude fibre minus the content of sugar and starch.

This equation yields very similar results as the experimentally determined, N-corrected digestible energy.

---

For an estimation using nutrient composition, the following equations can be recommended:

Conventional feeds:

$$\begin{aligned} \text{ME } 10^{-3} \text{ [MJ/kg DM]} = & +22.3 \text{ crude protein} \\ & +34.1 \text{ crude fat} \\ & +17.0 \text{ starch} \\ & +16.8 \text{ sugar} \\ & + 7.4 \text{ organic residual} \\ & -10.9 \text{ crude fibre} \end{aligned}$$

Nutrients in g/kg DM. The organic residual is defined as the organic matter minus the sum of crude protein, crude fat, starch, sugar and crude fibre.

Semi-synthetic feeds:

$$\begin{aligned} \text{ME } 10^{-3} \text{ [MJ/kg DM]} = & +17.8 \text{ crude protein} \\ & +37.8 \text{ crude fat} \\ & +16.2 \text{ (crude fibre + NfE)} \end{aligned}$$

Nutrients in g/kg DM.

## VII. LITERATURVERZEICHNIS

**AGARWAL, V. und B. M. CHAUHAN (1998)**

Effect of feeding some plant foods as source of dietary fibre on biological utilisation of diet in rats

Plant Foods Hum. Nutr., 39(2), 161-167

**ANDRIEUX, C. und E. SACQUET (1986)**

Effects of amylo maize starch on mineral metabolism in the adult rat : role of the microflora

J. Nutr., 116(6), 991-998

**ATWATER, W. O. und A. P. Bryant (1902)**

U. S. Expt. Stas. Bul., 116, 83

**BACH KNUDSEN, K. E., J. WOLSTRUP, B. O. EGGUM (1883)**

The influence of dietary crude fibre and microbial activity in the digestive tract on true protein digestibility and biological value in rats

Z Tierphysiol. Tierernährg u. Futtermittelkde, 49, 173-180

**REDDY, B. S., J. R. PLEASANTS, B. S. WOSTMANN (1969)**

Effect of intestinal microflora on calcium, phosphorus and magnesium metabolism in rats

J. Nutr., 99, 353-362

**BASSLER, R., C. NAUMANN, R. SEIBOLD, C. BARTH (1976)**

Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, in: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Methodenbuch Band III)

VDLUFA-Verlag, Darmstadt

**BAUER, L. L., M. R. MURPHY, B. W. WOLF, G. C. FAHEY (2003)**

Estimates of starch digestion in the rat small intestine differ from those obtained using in vitro time-sensitive starch fractionation assays

J. Nutr., 133, 2256-2261

**BOREL, P., D. LAIRON, M. SENFT, M. CHAUTAN, H. LAFONT (1989)**

Wheat bran and wheat germ : effect on digestion and intestinal absorption of dietary lipids in the rat

Am. J. Clin. Nutr., 49, 1192-1202

**BRUNSGAARD, G., K. E. BACH KNUDSEN, B. O. EGGUM (1995)**

The influence of the period of adaptation on the digestibility of diets containing different types of indigestible polysaccharides in rats

Br. J. Nutr., 74(6), 833-848

**BURGER, I. H. und J. v JOHNSON (1991)**

Dogs large and small: The allometry of energy requirements within a single species

J. Nutr., 121, 18-21

**CARRE, B., L. DEROUET, B. LECLERCQ (1990)**

The digestibility of cell-wall polysaccharides from wheat (bran or whole soybean meal) and white lupin meal in cockerels, mascovy ducks, and rats  
Poult Sci., 69, 623-633

**CHRISTIAN, M. S., A. M. HOBEBMAN, M. D. JOHNSON, W. R. RAY BROWN, T. J. BUCCI (1998)**

Effect of dietary optimization of growth, survival, tumor incidences an clinical pathology. Parameters in CD Sprague-Dawley and Fischer-344 rats: a 104-week study  
Drug Chem. Toxicol., 21(1), 97-117

**CLAUSS, M., W. LOEHLEIN, E. KIENZLE, H. WIESNER (2003)**

Studies on feed digestibilities in captive Asian elephants (*Elephas maximus*)  
J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr., 87, 160-173

**CUMMINGS, J. H. (1981)**

Dietary fibre  
Br. Med. Bull., 37, 65-70

**CURTIS, K. J., Y.S. KIM, J. M. PERDOMO, D. B. A. SILK, J. S. WHITEHEAD (1978)**

Protein digestion and absorption in the rat  
J. Physiol., 274, 409-419

**DAVIES, J. R., J. C. BROWN, G. LIVESEY**

Energy values and energy balance in rats fed on supplements of guar gum or cellulose  
Br. J. Nutr., 65(3), 415-433

**EGGUM, B. O., G. THORBEEK, R. M. BEAMES, A. CHWALIBOG, S. HENCKEL (1982)**

Influence of diet and microbial activity in the digestive tract on digestibility and nitrogen and energy metabolism in rats and pigs  
Br. J. Nutr., 48(1), 161-175

**EGGUM, B. O., R. M. BEAMES, K. E. BACH KNUDSEN, J. WOLFSTRUP (1984)**

The effect of protein quality and fiber level in the diet and microbial activity in the digestive tract on protein utilization and energy digestibility in rats  
Br. J. Nutr., 51(2), 305-314

**EGGUM, B. O., R. M. BEAMES, K. E. BACH KNUDSEN (1986)**

The effect of varying crude protein level and the proportions of fiber in diets containing a mixture of meat-and-bone meal and wheat bran as the only protein source on nitrogen balance inices and energy digestibility in the rat  
Br. J. Nutr., 56(2), 429-438

**EILMANS, I. (1991)**

Fettverdauung beim Pferd sowie die Folgen einer marginalen Fettversorgung  
Diss. vet. med., TiHo Hannover

**ENGELHARDT, W. v. und G. BREVES (HRSG.) (2000)**

Physiologie der Haustiere  
Enke im Hippokrates Verlag GmbH, Stuttgart

**ENGLYST H.N., J.H. CUMMINGS (1988)**

Improved method for measurement of dietary fiber as noch-starch polysaccharids in plant foods  
J. Assoc. off. Anal. Chem., 71, 808-814

**ERTELT, J. (1976)**

Die Bestimmung des Brennwertes von Lebensmitteln durch die Verbrennung in der kalorimetrischen Bombe  
Diss. chem., Hamburg

**EVERTS, H., R. A. DEKKER, B. SMITS, J. W. CONE, Y. v.d. HONING (1996)**

Digestion of maize starch and native pea starch in the small intestine of pigs  
Proc. Soc. Nutr. Physiol., 5, 122

**FINKE, M. D. (1991)**

Evaluation of the energy requirements of adult kennel dogs  
J. Nutr., 121, 22-28

**FLACHOWSKY, G. und F. SUNDSTOL (1988)**

Effect of NaOH and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on the degradability of straw in ruminants  
Arch. Anim. Nutr., 38, 955-964

**FLEMING, S. E. und J. R. VOSE (1979)**

Digestibility of raw and cooked starches from legume seeds using the laboratory rat  
J. Nutr., 109(2), 2067-75

**FLICKINGER, E. A., J. M. CAMPBELL, L. G. SCHMITT, G. C. FAHEY Jr (1998)**

Selected Lignosulfonate Fractions affect growth performance, digestibility and cecal and colonic properties in rats  
J. Anim. Sci., 76, 1626-1635

**FORESTER, H., J. HOSS. (1977)**

Effect of plant gums (swelling materials) on intestinal absorption in experimental animals  
Z. Ernährungswiss., 16, 140-149

**FORD, D. J. (1976)**

The effect of methods of sterilization on the nutritive value of protein in a commercial rat diet  
Br. J. Nutr., 35, 267-276

**GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) (1987)**

Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere, Nr. 4 Schweine  
DLG-Verlag, Frankfurt (Main)

**GfE (Ausschuss für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) (1995)**

Zur Energiebewertung beim Wiederkäuer  
Proc. Soc. Nutr. Physiol., 4, 121-123

**GfE (Ausschuss für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) (1996)**

Anwendung der Schätzformel für die Kontrolle des Energiegehaltes von Mischfutter für Schweine

Proc. Soc. Nutr. Physiol., 5, 157-158

**GfE (Ausschuss für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie) (2003)**

Schätzung des Gehaltes an umsetzbarer Energie (ME) in Alleinfuttermitteln für Hunde und Katzen

Proc. Soc. Nutr. Physiol., 12, 117-122

**GLADE, M. J. (1989)**

Nutrition for the equine athlete. In: Equine sports medicine

JONES, W. E., Verlag Lea & Febiger, 19-33

**HOFFMANN, H. (1970)**

Biologic normal values in Wistar (Jena) Rats of different ages

Z. Versuchstierkd. 12, 347-355

**HSU, J. C. und M. H. PENNER (1989)**

Influence of cellulose structure on its digestibility in the rat

J. Nutr., 119(6), 872-878

**HUBERT, M. F., P. LAROQUE, J. P. GILLET, K. P. KEENAN (2000)**

The effects of diet, ad libitum feeding and moderate and severe dietary restriction on body weight, survival, clinical pathology parameters and cause of death in control Sprague-Dawley rats

Toxicol. Sci., 58(1), 195-207

**IMAI, K., M. OHNAKA, Y. NIIYAMA (1986)**

Effects of dietary level of protein on the maintenance energy requirement and net energetic efficiency for growth of post weaning rats

J. Nutr. Sci. Vitaminol., 32, 513-525

**JEROCH, H., F. FLACHOWSKY, F. WEISSBACH (1993)**

Futtermittelkunde

Gustav-Fischer Verlag, Jena, Stuttgart

**JEROCH, H., W. DROCHNER, O. SIMON (1999)**

Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere

Ulmer- Verlag, Stuttgart

**JORGENSEN, H., X. Q. ZHAO, P. K. THEIL, V. M. GABERT, K. E. BACH KNUDSEN (2003)**

Energy metabolism and protein balance in growing rats fed different levels of dietary fibre and protein

Arch. Tierernähr., 57(2), 83-98

**JUHR, N. C. und J. FRANKE (1992)**

A method for estimating the available energy of incompletely digested carbohydrates in rats

J. Nutr., 122(7), 1425-1433

**KAMPHUES, J., D. SCHNEIDER, J. LEIBETSEDER (1999)**

Supplemente zu Vorlesungen und Übungen in der Tierernährung  
9. Auflage, Verlag M. & H. Schaper, Alfeld-Hannover

**KEENAN, K. P., P. LAROQUE, R. DIXIT (1998)**

Need for dietary control by caloric restriction in rodent toxicology and carcinogenicity studies  
J. Toxic. Env. Health, Part B, 1, 135-148

**KEENAN, K. P., G. C. BALLAM, D. G. HAUGHT, P. LAROQUE (2000)**

Nutrition  
In: The laboratory rat  
KRINKE, G. J., Academic Press, San Diego, California, 57-75

**KENDALL, P. T., S. E. BLAZA, P. M. SMITH (1983)**

Influence of level of intake and dog size on apparent digestibility of dog foods  
Br. Vet. J., 139, 361-362

**KIENZLE, E (1989)**

Untersuchungen zum Intestinal- und Intermediärstoffwechsel von Kohlenhydraten (Stärke verschiedener Herkunft und Aufbereitung, Mono- und Disaccharide) bei der Hauskatze (*Felis catus*)  
Habilitationsschrift, Tierärztliche Hochschule Hannover

**KIENZLE, E., B. OPITZ, I. SCHRAG (1999)**

Energy Evaluation of dog and cat food  
Übers. Tierernährg., 27, 191-220

**KIENZLE, E., B. DOBENECKER, S. EBER (2001)**

Effect of cellulose on the digestibility of high starch versus high fat diets in dogs  
J. Anim. Physil. Anim. Nutr., 85(5-6), 174-185

**KIENZLE, E., I. SCHRAG, R. BUTTERWICK, B. OPITZ (2002)**

Calculation of gross energy in pet foods: do we have the right values for heat of combustion?  
J. Nutr., 132, 1799-1800

**KIRCHGÄSSNER, M. (1997)**

Tierernährung. Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis  
10., neubearbeitete Auflage, DLG Verlag, Frankfurt (Main)

**KLEIBER, M. (1961)**

The fire of life  
Verlag John Wiley and Sons, New York

**KLEIBER, M. (Hrsg) (1967)**

Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier  
Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin

**KNUDSEN, K. E., B. B. JENSEN, I. HANSEN (1993)**

Digestion of polysaccharides and other major components in the small and large intestine of pigs fed on diets consisting of oat fractions rich in beta-D-glucan  
Br. J. Nutr., 70(2), 537-556



**KRAJCOVICOVA-KUDLACKOVA, M., O. DIBAK (1986)**

The relationship between protein retention and energy requirements in rats of different ages

Physiol. Bohemoslov., 35(3), 243-250

**KRIMMEL, J. (1998)**

In: Untersuchungen zur Bruttoenergiebestimmung an isolierten Einzelfuttermitteln sowie an kommerziellen Futtermitteln für Hund und Katze

Schrag, I., Diss. vet. med., LMU München

**KRINKE, G. J. (2000)**

The laboratory rat

Academic Press, San Diego, California, USA

**LARSEN, T., K. OSTERGARD, J. HANSEN, K. E. BACH KNUDSEN, B. O. EGGUM (1991)**

Daily food intake and digestibility in rats

Br. J. Nutr., 56(1), 29-35

**LIN, F. D., D. A. KNABE, T. D. TANKSLEY (1987)**

Apparent digestibility of amino acids, gross energy and starch in corn sorghum, wheat, barley, oat groats and wheat middlings for growing pigs

J. Anim. Sci., 64(6), 1655-1663

**MASON, V. und A. JUST (1976)**

Bacterial activity in the hind-gut of pigs. 1. Its influence on the apparent digestibility of dietary energy and fat

Z. Tierphysiol. Tierernährg. u. Futtermittelkd., 36, 301-310

**MACY, J. M., J. R. FARRAND, L. MONTGOMERY (1982)**

Cellulolytic and non-cellulolytic bacteria in rat gastrointestinal tracts

Appl. Environ. Microbiol., 44(6), 1428-1434

**MC CAY, C., M. CROWELL, L. MAYNARD (1935)**

The effect of retarded growth upon the length of the life span and upon the ultimate size

J. Nutr., 10, 63-79

**MEYER, H. (1989)**

Fette in der Hunde- und Katzenfütterung

Effem-Report, 28, 1-13

**MÜLLER, J und H. BERGNER (1976)**

Untersuchungen zur Charakterisierung von Strohpellets. 8. Mitt.: Veränderung von Strohlignin durch NH<sub>3</sub>-Einwirkung

Arch. Anim. Nutr., 25, 705-715

**MUNAKATA, A., S. JWANE, M. TODATE, S. NAKAGI, K. SUGAWARA (1995)**

Effects of dietary fiber on gastrointestinal transit time, fecal properties and fat absorption in rats

Tohoku J. Exp. Med., 176(4), 227-238

**NEHRING, K. und W. LAUBE (1955)**

Untersuchungen über die Zusammensetzung der pflanzlichen Gerüstsubstanz in Grün- und Raufutterstoffen und ihren Einfluss auf die Verdaulichkeit dieser Futterstoffe

Arch. Tierern., 5, 177-215

**NEHRING, K. und B. HOFFMANN (1969)**

Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Futtermittelanalyse. 1. Mitt.: Die Problematik der Futtermitteluntersuchung.

Arch. Anim. Nutr., 19, 295-319

**NOLL, J., E. SCHULZ, H. J. OSLAGE (1989)**

Untersuchungen zur Kohlenhydratverdaulichkeit in unterschiedlichen Abschnitten des Intestinaltraktes beim Schwein

Poc. Soc. Nutr. Physiol., 48-49

**NRC (National Research Council) (1995)**

Nutrient requirements of the laboratory rat. In: Nutrient Requirements of laboratory animals

4. Auflage, National Academy Press, Washington DC

**NRC (National Research Council) (2003)**

Nutrient requirements of dogs and cats

National Academy Press, Washington DC

**NYMAN, M. und N. G. ASP (1982)**

Fermentation of dietary fibre components in the rat intestinal tract

Br. J. Nutr., 47(3), 357-366

**OPITZ, B. (1996)**

Energiebewertung von Futtermitteln für Hund und Katze

Diss. vet. med., LMU München

**OPITZ, B., P.M. SMITH, E. KIENZLE, K.E. EARLE, I.E. MASKELL (1998)**

Comparison of various methods of fiber analysis in pet foods

J. Nutr., 128, 2795-2797

**PARABUCKI, A. L. und A. SCHÜRCH (1967)**

Zur energetischen Bewertung des Futterfettes

Landw. Forschung, Sonderheft 21, 109-113

**PIDGEON, G. und D. R. STROMBECK (1982)**

Evaluation of treatment for pancreatic exocrine insufficiency in dogs with ligated pancreatic ducts

Anim. J. Vet. Res., 43, 461-464

**RAINBIRD, A. und E. KIENZLE (1990)**

Untersuchungen zum Energiebedarf des Hundes in Abhängigkeit von Rassezugehörigkeit und Alter

Kleintierpraxis, 35, 149-158

**RAO, G. N. (1988)**

Rodent diets for carcinogenesis studies  
J. Nutr., 118, 929-931

**RIKLIN, M. (1973)**

Untersuchungen über den Einfluss von Strukturelementen im Futter auf Verdauung, Peristaltik und Kotkonsistenz beim Hund  
Diss. vet. med., TiHo Hannover

**RUBNER, M. (1885)**

Calorimetrische Untersuchungen  
Z. Biol., 21, 250-334 u. 337-410

**RUBNER, M. (1901)**

Der Energiewert der Kost des Menschen  
Z. Biol., 42, 261-308

**SHAH, N., M. T. ATALLAH, R. R. MAHONEY, P. L. PELLETT (1982)**

Effect of dietary fiber components on fecal nitrogen excretion and protein utilization in growing rats  
J. Nutr., 112(4), 658-666

**SARWAR, G., R.W. PEACE (1986)**

Comparisons between true digestibility of total nitrogen and limiting amino acids in vegetable proteins fed to rats  
J. Nutr., 116, 1172-1184

**SCHOEN, A. und H. H. HILLER (1971)**

Verdaulichkeit einer Ratten- und Mäusezucht-diät nach Gammastrahlen- bzw. Dampfsterilisation bei konventionellen Ratten  
Z. Tierphysiol. Tierernährg. u. Futtermittelkd., 27, 338-343

**SCHÖNMEIER, A. (2003)**

Ein Beitrag zur Entwicklung von Schätzgleichungen für die umsetzbare Energie in Hunde- und Katzenalleinfuttern  
Diss. vet. med., LMU München

**SCHRAG, I. (1999)**

Untersuchungen zur Bruttoenergiebestimmung an isolierten Einzelfuttermitteln sowie an kommerziellen Futtermitteln für Hund und Katze  
Diss. vet. med., LMU München

**SENOO, H. (2000)**

Digestion, metabolism  
In: The laboratory rat  
KRINKE, G. J. (Hrsg.), Academic Press, San Diego, California, 359-383

**SLADE, L. M. und H. F. HINTZ (1969)**

Comparison of digestion in horses, ponies, rabbits and guinea pigs  
J. Anim. Sci., 28(6), 842-843

**SOEST, P. J. van und R. H. WINE (1967)**

Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of cell-wall constituents.

J. Assoc. Off. Anal. Chem., 50, 50-55

**SOUTHGATE, D. A. T., G. J. HUDSON, H. ENGLYST (1978)**

The analysis of dietary fibre: the choices for the analyst

J. Sci. Food Agric., 29, 979-988

**STOHMANN, F. (1890)**

Die Verbrennungswärmen organischer Verbindungen

Z. Phys. Chem. Stöchiom. Verwandt., 6, 334-357

**SUZUKI, T., M. SHIMIZU, T. ISHIBASHI (1990)**

Proper energy evaluation of commercial laboratory animal diets based on digestibility and metabolizable energy values

Jikken Dobutsu., 39(4), 557-564

**TABELING, R., P. GREGORY, J. KAMPHUES (1999)**

Studies on nutrient digestibilities (pre-caecal and total) in pancreatic duct-ligated pigs and the effects of enzyme substitution

J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 82, 251-263

**TECHNICAL BULLETIN (1999)**

Charles River Laboratories, 2. Edition

**THORBECK, G., A. CHWALIBOG, B. O. EGGUM, K. CHRISTENSEN (1982)**

Studies on growth, nitrogen and energy metabolism in rats

Arch. Tierernähr., 32(12), 827-840

**UDES, H. (1971)**

Nutritional requirements of defined laboratory animals

Berl. Munch. tierärztl. Wochenschr., 84, 468-472

**VAN MILGEN, J., J. NOBLET, S. DUBOIS (2001)**

Energetic efficiency of starch, protein and lipid utilization in growing pigs

J. Nutr., 131, 1309-1318

**VIGUERA, R. M., J. ROJAS-CASTANEDA, R. HERNANDEZ, G. REYES, C. ALVAREZ (1999)**

Histological characteristics of the intestinal mucosa of the rat during the first year of life

Lab. Anim., 33(4), 393-400

**WILLIAMS, V. J., W. SENIOR (1981)**

Effects of food restriction and body weight loss on metabolic fecal nitrogen excretion in the rat

J. Nutr., 111(4), 581-585

**WISKER, E. und K. E. BACH KNUDSEN (2003)**

The rat as a model for pigs: comparative values for the digestibility of NSP and other macronutrients

Br. J. Nutr., 90, 373-383

**ZEYNER, A. (1995)**

Ermittlung des Gehalts an verdaulicher Energie im Pferdefutter über die Verdaulichkeitsschätzung  
Übers. Tierernährg., 23, 55-104

**ZEYNER, A, M. HOFFMANN, R. FUCHS (1992)**

Möglichkeiten zur Schätzung des Energiegehaltes in Rationen zur Sportpferdefütterung  
Pferdeheilkunde (Sonderausgabe), 175-178

**ZEYNER, A., E. KIENZLE (2002)**

A method to estimate digestible energy in horse feed  
J. Nutr., 132, 1771-1773

**ZMIJA, G. (1991)**

Fütterungspraxis bei Galopp- und Trabrennpferden  
Diss. vet. med., TiHo Hannover

## VIII. ANHANG

Tabelle 39: Zusammensetzung des Zuchtfutters laut Deklaration des Herstellers<sup>1</sup>

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Sojaschrot, extrahiert	Vitamin A 25000 IE
Weizennachmehl	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Weizen	Vitamin E 125 mg
Mais	Cu 5 mg
Gerste	
Fischmehl	
Süßmolkenpulver	
Sojaöl, roh	
Grünmehl	
Vitaminvormischung	
Dicalciumphosphat	
Kohlensaurer Kalk	
Spurenelementvormischung	
Salz	

Tabelle 40: Zusammensetzung des Haltungsfutters laut Deklaration des Herstellers<sup>1</sup>

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Weizenkleie	Vitamin A 25000 IE
Weizennachmehl	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Weizen	Vitamin E 125 mg
Sojaschrot, extrahiert	Cu 5 mg
Gerste	
Mais	
Fischmehl	
Kohlensaurer Kalk	
Süßmolkenpulver	
Sojaöl, roh	
Grünmehl	
Vitaminvormischung	
Salz	
Spurenelementvormischung	

Tabelle 41: Zusammensetzung des rohfaserreichen Futters laut Deklaration des Herstellers 1

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Weizenkleie	Vitamin A 25000 IE
Grünmehl	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Weizennachmehl	Vitamin E 125 mg
Mais	Cu 5 mg
Weizen	
Cellulosepulver, gereinigt	
Sojaschrot, extrahiert	
Vitaminvormischung	
Sojaöl, roh	
Spurenelementvormischung	
Dicalciumphosphat	
Kohlensaurer Kalk	
Salz	

Tabelle 42: Zusammensetzung der Purified Diet laut Deklaration des Herstellers 1

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Maisstärke, gereinigt	Vitamin A 25000 IE
Casein, gereinigt	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Saccharose, raffiniert	Vitamin E 125 mg
Mineralstoff- und	Cu 5 mg
Spurenelementvormischung	
Sonnenblumenöl, raffiniert	
Cellulosepulver, gereinigt	
Vitaminvormischung mit Saccharose	

Tabelle 43: Zusammensetzung des Haltungsfutters laut Deklaration des Herstellers 2

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Gerste	Vitamin A 25000 IE
Sojaextraktionsschrot	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Weizen	Vitamin E 120 mg
Weizenvollmehl	Cu 5 mg
Weizengrießkleie	
Sojavollbohne	
Mineralstoffe	

Tabelle 44: Zusammensetzung des rohfaserreichen Futters laut Deklaration des Herstellers 2

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Gerste	Vitamin A 15000 IE
Sojaextraktionsschrot	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Weizen	Vitamin E 100 mg
Luzernegrünmehl	Cu 5 mg
Weizenvollmehl	
Weizengrießkleie	
Sojavollbohne	
Mineralstoffe	

Tabelle 45: Zusammensetzung der Purified Diet laut Deklaration des Herstellers 2

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Casein	Vitamin A 15000 IE
Maisstärke	Vitamin D <sub>3</sub> 600 IE
Glucose	Vitamin E 200 mg
Sojaöl	Cu 12 mg
Cellulose	
Mineralstoffe	

Tabelle 46: Zusammensetzung des Haltungsfutters laut Deklaration des Herstellers 3

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Getreide	Vitamin A 18000 IE
Getreideprodukte	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Ölsaatenprodukte	Vitamin E 125 mg
Geflügelmehl	
Mineralstoffe	
Milchprodukte	
Fett	
Proteinprodukte aus Mikroorganismen	
Aminosäuren	
Spurenelemente- Vitaminvormischung	



Tabelle 47: Zusammensetzung des rohfaserreichen Futters laut Deklaration des Herstellers 3

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Getreide	Vitamin A 14000 IE
Getreideprodukte	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Ölsaatenprodukte	Vitamin E 90 mg
Zuckerprodukte	
Rohfaserprodukte	
Trockengrünfutter	
Fischprodukte	
Mineralstoffe	
Knollen und Wurzeln	
Milchprodukte	
Fett	
Spurenelemente-Vitaminvormischung	
Aminosäuren	

Tabelle 48: Zusammensetzung der Purified Diet laut Deklaration des Herstellers 3

Zusammensetzung	Zusatzstoffe je kg Futter
Maisstärke	Vitamin A 14000 IE
Dextrose & Sucrose	Vitamin D <sub>3</sub> 1000 IE
Mineralmix	Vitamin E 100 mg
Cystin-L	Calcium 5,5 g
Caseinat	Phosphor 3,3 g
Cellulose	
Vitaminmix	
Sojaöl	

# DANKSAGUNG

Für die Überlassung des Themas und die gute wissenschaftliche Betreuung möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Prof. Dr. Ellen Kienzle bedanken.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. Heinz Brandstetter, welcher die Arbeit initiiert und mich mit viel Einsatz bei der Durchführung des experimentellen Teils unterstützt hat sowie auch bei den anderen Mitgliedern des Arbeitsausschusses für Ernährung der Gesellschaft für Versuchstierkunde (GV-SOL auch an AS), bedanken.

Der Charles River Deutschland GmbH (Sulzfeld) danke ich vielmals für die Bereitstellung der Versuchstiere. Ebenso geht mein Dank an die Altromin GmbH, an die ssniff Spezialdiäten GmbH sowie an die Provimi Kliba AG für die Anmischung und Bereitstellung der Futtermittel.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. J. Kamphues des Instituts für Tierernährung der Tierärztlichen Hochschule Hannover, der mit seinen Mitarbeitern zusammen durch eine außergewöhnlich rasche Durchführung der Stärke- und Zuckerbestimmung eine termingerechte Fertigstellung dieser Arbeit ermöglichte.

Auch bei Frau Dr. Sylvia Ortmann und Heidrun Barleben vom Institut für Zoo- und Wildtierforschung (IZW) Berlin möchte ich mich herzlich für die bereitwillige Durchführung der Faseranalytik bedanken.

Mein Dank geht außerdem an die Tierpfleger des Max-Planck-Institutes in Martinsried für die große Hilfsbereitschaft und die nette Atmosphäre.

Des Weiteren möchte ich mich ganz besonders bei Frau Stadler und Herrn Hesselbach sowie allen anderen Institutsmitarbeitern und Mitdoktoranden für ihre Hilfsbereitschaft und das stets angenehme Arbeitsklima bedanken.

Dank Herrn Dr. Marcus Clauss für die Unterstützung bei der Vollendung dieser Arbeit.

Da ich meinen Eltern, ohne deren Unterstützung ich diese Arbeit nie hätte anfertigen können, nicht genug danken kann, möchte ich auf diesem Wege nur sagen, dass ich alles, was sie für mich getan haben, sehr zu schätzen weiß.

Natürlich bin ich allen meinen Freunden, die mich teils konstruktiv, teils moralisch unterstützt haben, ebenfalls sehr dankbar. Dies gilt besonders für Frank, der mir nicht nur bei der Fertigstellung dieser Arbeit sehr geholfen, sondern mich auch zu Hause ertragen und oft aufgebaut hat.

Vielen Dank!!

# LEBENS LAUF

**Name** Karin Schug

**Geburtsdatum** 20.04.1976

**Geburtsort** Konstanz

**Familienstand** ledig

## Schule

1983 - 1987 Grundschule Konstanz

1987 - 1993 Mädchenrealschule Zoffingen Konstanz; Mittlere Reife

1993 - 1995 Agrarwissenschaftliches Gymnasium Radolfzell; Abitur

**Ausbildung** August 1995 bis Juli 1997 Ausbildung zur Tierarzhelferin in der Kleintierpraxis von Frau Gabriele Hintz-Sommer in Konstanz

**Studium** November 1997 bis April 2003 Studium der Veterinärmedizin an der LMU München

**Praktika** 7 Wochen Universitätsklinik Zürich Abteilung Grosstiere  
12 Wochen Pferdepraxis Whistlejacket Equine Veterinary Surgery;  
England

**Promotion** Juli 2003 bis Februar 2005 Promotion am Institut für Physiologie, Physiologische Chemie und Tierernährung, Lehrstuhl für Tierernährung und Diätetik, Tierärztliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität