

Aus dem Institut für Landtechnik
der Technischen Universität München-Weihenstephan
Direktor: Professor Dr. H. L. Wenner

FEUERUNGSTECHNISCHE KENNGRÖSSEN VON GETREIDESTROH

von
Eugen Maria HOFSTETTER
geboren am 1. 9. 1950 in Rosenheim

Vollständiger Abdruck der vom Fachbereich Landwirtschaft
und Gartenbau der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr. agr.

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. G. Fischbeck

1. Prüfer: Prof. Dr. H. L. Wenner

2. Prüfer: Prof. Dr. H. G. Kessler

Die Dissertation wurde am 17. 7. 1978 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch
den Fachbereich für Landwirtschaft und Gartenbau am
28. 7. 1978 angenommen.

Tag der Promotion: 31. 7. 1978

Copyright 1978: im Selbstverlag Dr.agr. E.M.Hofstetter

Bezugsquelle : Institut für Landtechnik der
Technischen Universität München
Vöttingerstr. 36
D - 8050 Freising-Weihenstephan

V O R W O R T

Die vorliegende Dissertationsarbeit wurde in den Jahren 1975 bis 1978 am Institut für Landtechnik der Technischen Universität München durchgeführt. Sie entstand im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Bundesministeriums für Forschung und Technologie und der Energiekommission der Europäischen Gemeinschaften, in dem die Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Getreidestroh untersucht werden sollten.

Nach Abschluß der Arbeit gilt mein besonderer Dank Herrn Prof.Dr. H.L.Wenner für die Überlassung des Themas und die wertvollen Hinweise, mit denen er mich unterstützte. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. H.G.Kessler, der freundlicherweise die Aufgaben des 2. Berichtserstatters übernahm.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn LR Dr. A.Strehler für die vielfachen Anregungen und Hinweise, mit denen er zum Gelingen beitrug. Auch die Mitarbeiter der Landtechnik Weihenstephan, insbesondere der Datenverarbeitung und der Meßtechnik, möchte ich in meinen Dank einschließen.

Nicht zuletzt sei auch den maßgeblichen Stellen des Bundesministeriums für Forschung und Technologie und der Europäischen Gemeinschaften für die großzügige finanzielle Unterstützung des Vorhabens gedankt, ohne die die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Weihenstephan, im Juli 1978

Eugen Maria Hofstetter

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Verzeichnis der Abbildungen	7
Verzeichnis der Tabellen	8
Verzeichnis der Anhangstabellen	10
<u>1. EINFÜHRUNG</u>	12
1.1 <u>Die Entwicklung des Getreidestrohanfalles in der Bundesrepublik Deutschland und seine Verwertung in Bayern</u>	12
1.2 <u>Einsatzmöglichkeiten von Getreidestroh als Energieträger</u>	16
1.3 <u>Stand von Wissenschaft und Technik bei der Strohefeuerung</u>	22
1.4 <u>Ziel der Arbeit</u>	28
<u>2. HEIZWERTBESTIMMUNG VON GETREIDESTROH</u>	30
2.1 <u>Methode</u>	30
2.2 <u>Versuchsdurchführung und Methode der Auswertung</u>	34
2.3 <u>Ergebnisse</u>	36
2.3.1 Der Einfluß des Feuchtegehaltes	36
2.3.2 Der Einfluß der Getreidearten und -sorten	38
2.3.3 Der Einfluß der Düngung	45
2.3.4 Der Einfluß der Witterung	46
2.3.5 Der Einfluß des Aufwuchsstandortes	50
2.3.6 Die Heizwertveränderung durch Lagerung	52
2.4 <u>Diskussion der Ergebnisse</u>	54
2.5 <u>Der Heizwert von Stroh im Vergleich mit den Werten anderer Festbrennstoffe</u>	57

	Seite
3. <u>ERMITTLUNG WEITERER VERBRENNUNGSTECHNISCHER KENNGRÖßEN UND DEREN VERGLEICH MIT DEN WERTEN ANDERER FESTBRENNSTOFFE</u>	59
3.1 <u>Die chemische Zusammensetzung</u>	59
3.2 <u>Fraktionierung in Reinkoks und flüchtige Bestandteile</u>	62
3.2.1 <u>Methode</u>	62
3.2.2 <u>Versuchsdurchführung und Ergebnisse</u>	65
3.3 <u>Der spezifische Verbrennungsluftbedarf L</u>	67
3.3.1 <u>Methode</u>	67
3.3.2 <u>Ergebnisse</u>	70
3.4 <u>Das spezifische Rauchgasvolumen V_f</u>	73
3.4.1 <u>Methode</u>	73
3.4.2 <u>Ergebnisse</u>	74
4. <u>GESETZLICHE VORSCHRIFTEN ÜBER DEN BAU UND DEN BETRIEB VON FEUERUNGSANLAGEN</u>	78
4.1 <u>Mindestabbranddauer</u>	78
4.2 <u>Regelbarkeit und höchst zulässige Schwachlastleistung</u>	79
4.3 <u>Der Wirkungsgrad</u>	79
4.4 <u>Vorschriften zur Reinhaltung der Luft</u>	80
5. <u>AUS DEN VERBRENNUNGSTECHNISCHEN KENNGRÖßEN UND DEN GESETZLICHEN VORSCHRIFTEN ABGELEITETE ANFORDERUNGEN AN STROHFUERUNGSANLAGEN</u>	81
6. <u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	85
7. <u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	89
8. <u>TABELLENANHANG</u>	93

Verzeichnis der Abbildungen

Nr.		Seite
1	Die Entwicklung des Korn- und Strohertrags in der BRD	13
2	Die Strohverwertung in Bayern 1974/75	15
3	Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Getreidestroh	19
4	Durchbrandkessel für Hochdruckballen und Scheitholz	24
5	Unterbrandkessel für Hochdruckballen	26
6	Großballenkessel mit Unterbrand und Nachverbrennung	27
7	Bombenkalorimeter zur Heizwertbestimmung nach DIN 51 900	33
8	Abhängigkeit des Heizwertes H_U vom Feuchtegehalt U eines Brennstoffs	37
9	Zusammensetzung fester Brennstoffe	62
10	Versuchsanordnung zur Bestimmung flüchtiger Bestandteile	63

Verzeichnis der Tabellen

Nr.		Seite
1	Gesamtjahresenergieverbrauch eines landwirtschaftlichen Modellbetriebes (Innenwirtschaft)	18
2	Heizwerte von Stroh mit unterschiedlichem Feuchtegehalt $H_{u(wf)}$ und unterschiedlichem Heizwert der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$	36
3	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ der 1976 untersuchten Getreidearten	39
4	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Wintergerstenstroh der Ernte 1976	40
5	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Sommergerstenstroh der Ernte 1976	41
6	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Winterweizenstroh der Ernte 1976	42
7	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Sommerweizenstroh der Ernte 1976	43
8	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Winterroggenstroh der Ernte 1976	43
9	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Haferstrohsorten der Ernte 1976	44
10	Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ verschieden gedüngter Strohart	45
11	Heizwerte einiger Strohsorten im Jahresvergleich zwischen 1976 und 1977	49
12	Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Stroh verschiedener Standorte	51
13	Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Getreidestroh ausländischer Herkunft	52
14	Abnahme des Heizwertes der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ durch Zunahme des mikrobiellen Abbaus	53
15	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ der einzelnen Getreidearten, gebildet aus sämtlichen 1976 und 1977 durchgeführten Untersuchungen	57
16	Durchschnittliche Heizwerte verschiedener Festbrennstoffe	58
17	Chemische Analysen von Getreidestroh	59
18	Chemische Zusammensetzung von Getreidestroh in Gewichtsprozent	60

Nr.		Seite
19	Elementgehalte verschiedener Festbrennstoffe	61
20	Bestimmung der flüchtigen Bestandteile von Getreidestroh	66
21	Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen verschiedener Festbrennstoffe	67
22	Durchschnittlicher spezifischer Verbrennungsluftbedarf L verschiedener Festbrennstoffe bei stöchiometrischer Verbrennung	70
23	Stündlicher Verbrennungsluftbedarf L' bei stöchiometrischer Verbrennung für verschiedene Feuerungsanlagen	72
24	Spezifisches Rauchgasvolumen V_f verschiedener Festbrennstoffe und maximaler CO_2 -Gehalt des Rauchgases	75
25	Stündliches Rauchgasvolumen V_f' verschiedener Festbrennstoffe bei einer Feuerungsleistung von 400 000 kJ/h	76

Verzeichnis der Anhangstabellen

Nr.		Seite
1	Ausdruck des EDV-Programms KALORI	93
2	Durchschnittliche Feuchtegehalte der 1976 untersuchten Getreidestrohsorten	94
3	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Getreidestrohart</u> en auf signifikante Unterschiede	96
4	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Wintergersten</u> auf signifikante Unterschiede	97
5	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Sommergersten</u> auf signifikante Unterschiede	98
6	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Winterweizen</u> auf signifikante Unterschiede	99
7	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Sommerweizen</u> auf signifikante Unterschiede	100
8	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Winterroggen</u> auf signifikante Unterschiede	101
9	Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener <u>Hafer</u> sorten	102
10	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz sämtlicher Strohproben	103
11	Witterungsdaten zur Heizwertbestimmung mit 5° C Temperaturuntergrenze	106
12	Witterungsdaten zur Heizwertbestimmung mit 7° C Temperaturuntergrenze	107
13	Witterungsdaten zur Heizwertbestimmung mit 10° C Temperaturuntergrenze	108
14.1	Zusammensetzung der Rohsubstanz fester Brennstoffe	109
14.2	Zusammensetzung der wasserfreien Substanz fester Brennstoffe	110
14.3	Zusammensetzung der wasser- und aschefreien Substanz fester Brennstoffe	111

Nr.		Seite
15	Umrechnung von Energie- und Leistungseinheiten	112
16	Verordnungen über die Beseitigung von pflanzlichen Abfällen (Stroh) außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen in den einzelnen Bundesländern	113

1. EINFÜHRUNG

1.1 Die Entwicklung des Getreidestrohanfalles in der Bundesrepublik Deutschland und seine Verwertung in Bayern

Die Änderung der Produktionsmethoden in der Landwirtschaft während der letzten 25 Jahre führte unter anderem auch dazu, daß der jährliche Strohanfall in der Bundesrepublik Deutschland erheblich zunahm. So wurde von PERWANGER (29) im Zeitraum von 1950 bis 1975 ein Anstieg des jährlichen Strohertrages von 18 Mio. t auf 26 Mio. t errechnet. Als Hauptursache hierfür wird der Anstieg des Getreideertrages von 21,3 dt/ha auf 40,2 dt/ha angesehen, der auch eine Zunahme des Strohertrages mit sich brachte. Hingegen schlug die Abnahme der Gesamtackerfläche nicht zu Buche, da sich gleichzeitig der Getreideanteil in der Fruchtfolge von 55 auf 70 v.H.erhöhte und damit die Getreideanbaufläche mit ca. 5 Mio. ha konstant blieb. Auch eine Abnahme des Korn : Strohverhältnisses durch züchterische Fortschritte in derselben Zeit von 1 : 1,7 auf 1 : 1,2 führte nicht zu einer Senkung des Strohertrages.

Diese Zusammenhänge gehen aus Abbildung 1 hervor, die den Verlauf des Strohertrages in der Bundesrepublik Deutschland veranschaulicht. Dabei wurde der Strohertrag ab 1960 aus dem Korn : Strohverhältnis und dem Kornertrag rechnerisch bestimmt, da ab 1960 in den Landesortenversuchen keine Strohertragsbestimmungen mehr durchgeführt wurden, und deshalb entsprechende Daten über den Strohertrag nicht mehr zur Verfügung standen. Anhand der so errechneten Strohertragssteigerung geht PERWANGER (29) davon aus, daß 1985 mit einem jährlichen Strohertrag von 30 Mio. t zu rechnen ist.

Die produktionstechnischen Veränderungen in der Landwirtschaft hatten jedoch nicht nur eine Zunahme des Strohertrages zur Folge, sondern bewirkten auch, daß die herkömmliche Strohverwertung als Stallmistkomponente immer mehr an Bedeutung verlor. Diese Entwicklung wurde dadurch verursacht, daß der gesamte landwirtschaftliche Nutz-

Entwicklung des Korn- und Strohertrages in der BRD

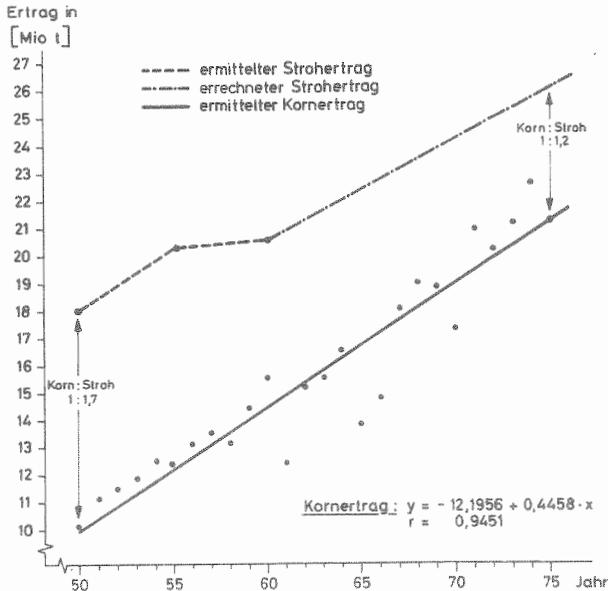


Abbildung 1 (Perwanger, Mitterleitner)

viehbestand in der Bundesrepublik Deutschland von 1950 - 1973 von 15 Mio. auf 12 Mio. Großvieheinheiten abnahm (9) und die Zahl der viehhaltenden Betriebe (ohne Geflügelhalter) sich drastisch von 1,7 Mio. auf 856 000 verringerte (9). Mit dieser Abnahme der viehhaltenden Betriebe ging eine ständige Vergrößerung der einzelnen Viehbestände einher, die bewirkte, daß die Viehhalter vielfach arbeitsextensivere Haltungsformen wählten, wobei auch verstärkt einstreulose Stallsysteme zur Anwendung kamen. Diese Betriebe und viehlos wirtschaftende Landwirte begannen damit, das Stroh, für das die herkömmliche Verwertung weggefallen war, in den Boden einzuarbeiten

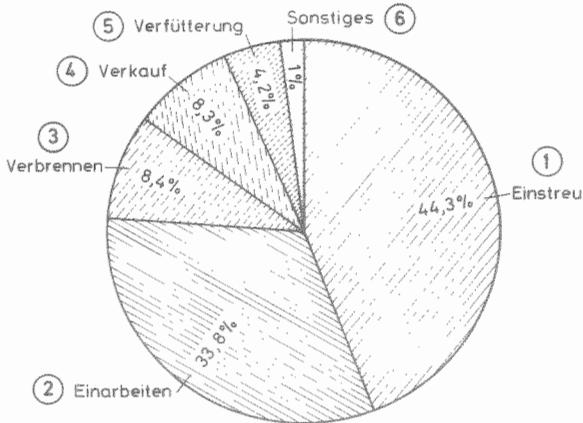
oder am Feld zu verbrennen, sofern es nicht verkauft werden konnte. Zwar wirkt sich in vielen Fällen eine Stroheinarbeitung in den Boden positiv auf die Bodenfruchtbarkeit aus, unter besonderen Klima- und Bodenverhältnissen kann eine intensive Strohdüngung aber auch Ertragsdepressionen zur Folge haben. So berichten BACHTHALER und WAGNER 1973 (2) von Ertragsabnahmen durch längjährige Strohdüngung auf schweren Böden in Trockenlagen und auf schluffreichen Böden mit einem schlechten Luft : Wasserverhältnis im Porenvolumen. VETTER (37) stellte 1959 Schwierigkeiten der Strohzersetzung auch bei guter Nährstoffversorgung in Trockenlagen, auf sauren, sehr schweren und sehr leichten Böden fest.

Der Strohverbrennung auf dem Feld sind ebenfalls Grenzen gesetzt, da dies zunehmend durch behördliche Auflagen erschwert wird (21). So muß in allen Bundesländern die Strohverbrennung bei den zuständigen Behörden beantragt werden, die dann unter Umständen - vor allem bei zu geringer Entfernung von Straßen, Waldbeständen, Krankenhäusern und anderen Gebäuden - die Genehmigung auch verweigern können. Auch im Fall der Genehmigung werden Vorschriften über den Zeitpunkt des Abbrandes, die Größe der Brandfläche und die vorgeschriebene Anzahl der Aufsichtspersonen gemacht. Diese Auflagen sind im einzelnen in Anhangstabelle 16 aufgeführt.

Die Steigerung des Strohertrages und die Abnahme des Einstreubedarfes haben zur Folge, daß von den stroherzeugenden Landwirten eine breite Palette von verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten angewandt wird. Die derzeitige Verwertung von Stroh wurde für das Bundesland Bayern näher untersucht (BAYER. STAT. LANDESAMT zit. in 29). Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 2 wiedergegeben. Danach finden 44,3v.H. der jährlichen Erzeugung als Einstreu Verwendung, während 33,8v.H. in den Boden eingearbeitet werden. Nach dieser Erhebung werden derzeit 8,4 v.H.-dies entspricht einer Menge von 400 000 t/a - ohne weiteren Nutzen zu ziehen, auf dem Feld verbrannt. Ein

ähnlich hoher Anteil, insgesamt 8,3 v.H., kann von den Landwirten verkauft werden. Bei den Käufern dürfte es sich vor allem um kleinere Betriebe mit absolutem Grünland handeln, die das Stroh als Einstreu benötigen.

Strohverwertung in Bayern 1974 / 75 *



	①	②	③	④	⑤	⑥
Oberbayern	37,6	41,8	2,5	12,8	3,5	1,8
Niederbayern	41,4	36,9	4,1	12,9	4,4	0,3
Oberpfalz	44,8	25,0	17,4	7,4	5,1	0,3
Oberfranken	47,5	31,4	10,9	3,3	5,5	1,4
Mittelfranken	55,3	28,3	5,9	6,0	3,9	0,6
Unterfranken	39,2	36,5	15,4	3,9	4,3	0,7
Schwaben	49,0	30,4	1,8	15,4	1,7	1,7

* Erhebung bei 1350 Betrieben durch das Bayerische Statistische Landesamt München

Abbildung 2 (Schulz)

Nur eine unbedeutende Rolle spielt die Strohverfütterung, über die lediglich 4,2 v.H. verwertet werden. Eine Ausnahme bildete hierin allerdings das extrem trockene Jahr 1976, in dem aus Futtermangel wesentlich größere Mengen als Rohfuttermittelersatz verfüttert wurden.

Für das gesamte Bundesgebiet wird die derzeit nicht sinnvoll verwertbare Strohmenge von HERZOG et al. (17) auf 5 bis 6 Mio. t/a geschätzt. Daraus können zwar Bauplatten, Isoliermatten, Dränagerohrverkleidungen, Papier und Nährböden für Champignonkulturen hergestellt und chemische Rohstoffe wie verschiedene Kohlenwasserstoffe und Aktivkohle gewonnen werden (17; 28), die Nachfrage an Stroh ist jedoch hierfür mengenmäßig und regional begrenzt. Auch in näherer Zukunft ist keine erhebliche Steigerung der Absatzchancen von Stroh für die industrielle Verwertung zu erwarten, da die Errichtung geeigneter Anlagen sehr teuer ist. Dagegen bestehen Möglichkeiten, Überschußstroh auf dem landwirtschaftlichen Betrieb sinnvoll zu verwerten, wie beispielsweise die Nutzung der im Stroh gebundenen Energie zur Beheizung von Wohngebäuden, Ställen und Trocknungsanlagen; hierfür sind jedoch die Ermittlung feuerungstechnischer Kenngrößen von Stroh und die Schaffung geeigneter Anlagen zur Energienutzung nötig.

1.2 Einsatzmöglichkeiten von Getreidestroh als Energieträger

Neben der Notwendigkeit, für Stroh eine neue Verwertungsmöglichkeit zu finden, besteht in letzter Zeit auch das verstärkte Bemühen, teure Erdölimporte durch andere einheimische Energiequellen so weit als möglich zu ersetzen. Auch aus diesem Grund bietet es sich an, nach Möglichkeiten zu suchen, um Stroh als Brennstoff einsetzen zu können. Wenn für Stroh ein Heizwert von 14 000 kJ/kg angenommen wird (21)(Umrechnungstabelle für verschiedene Energie- und Leistungseinheiten, siehe Anhangstabelle 15), so entspricht dies bei einer Menge von 5 Mio. t/a überschüssigem Stroh einem verfügbaren Energiepotential von $7 \cdot 10^{10}$ MJ. Dies ist gleich der Energiemenge von 1,6 Mio. t Heizöl.

Nicht nur volkswirtschaftlich gesehen würde die Verheizung von Stroh Vorteile mit sich bringen, auch für den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieb, dem Stroh kostengünstig zur Verfügung steht, ist es lohnenswert, diesen pflanzlichen Reststoff als Energieträger zu

nutzen. Einsatzmöglichkeiten bestehen in der Heizung von Wohn- und Stallgebäuden sowie in der Trocknung von Welkheu und Körnerfrüchten, Bereiche, die einen nicht unerheblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch der landwirtschaftlichen Betriebe ausmachen. Um dies zu verdeutlichen, ist in Tabelle 1 der Energieverbrauch eines Modellbetriebes in der Innenwirtschaft aufgeführt. Hierbei ist eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 70 ha unterstellt, die aus 50 ha Ackerland und 20 ha Grünland besteht. Als Viehbestand sind 40 Milchkühe ohne Nachzucht angenommen. Die Energieverbrauchszahlen sind den Literaturstellen AYIK (1), PATOW (26) und WENNER et al. (39) entnommen, und zur Vergleichbarkeit in kWh umgerechnet.

In Spalte 1 sind die einzelnen Energieverbrauchstellen aufgetragen, Spalte 2 gibt den Jahresenergieverbrauch in kWh/a der Verbrauchsstellen wieder. In Spalte 3 ist angegeben, in welcher Form die Energie angeliefert wird und Spalte 4 gibt die Bedingungen wieder, unter denen der in Spalte 2 aufgeführte Energieverbrauch zu erwarten ist. In der Berechnung ist der Energiebedarf für die Außenwirtschaft, also Treibstoff für Schlepper, Mähdrescher und andere Maschinen nicht aufgeführt. Im unteren Teil der Tabelle sind die Energieaufwendungen an Strom und Heizöl in kWh/a, in DM/a und in v.H. des Gesamtenergiebedarfes bzw. in v.H. der Gesamtenergiekosten angegeben.

Der in der Kostenberechnung unterstellte Preis für Heizöl EL wurde von der Firma Kriechbaum, Freising im Juli 1977 genannt, der Preis für Strom von den Stadtwerken Freising ebenfalls im Juli 1977 als durchschnittlich von der Landwirtschaft bezahlter Preis angegeben. Diese 0,24 DM/kWh resultieren aus Arbeitspreisen von 0,135 DM/kWh Tagstrom und 0,078 DM/kWh Nachtstrom, der von Betrieb zu Betrieb variierenden Grundgebühr sowie 4,5 v.H. Ausgleichsabgabe und 11 v.H. Mehrwertsteuer. Der im Vergleich zu Heizöl sehr hohe Strompreis ist dafür ausschlaggebend, daß die Stromkosten 63 v.H. der Gesamtenergiekosten betragen, obwohl die als Strom benötigte Energie lediglich 18 v.H. des Gesamtenergiebedarfes beträgt.

Tabelle 1: Gesamtjahresenergieverbrauch eines landwirtschaftlichen Modellbetriebes (Innenwirtschaft)

Spalte 1	2	3	4
Verbrauchsstelle	Verbrauch in kWh/a	Energie-träger	unterstellte Bedingungen
Haushaltsgeräte	7 000	Strom	4-köpfige Familie
Wohnhaus u. Warmwasserbereitung	65 000	Heizöl	4-köpfige Familie
Viehhaltung	19 000	Strom	40 Milchkühe o. Nachzucht, Flüssigmist, Anbindestall
Heutrocknung	51 000	Heizöl	20 ha Mähweide, 0-malige Nutzung, 15 ha Gesamttrocknungsfläche, Anfangsfeuchte 40 v.H., 60 dt Heu/ha u. Nutzung
Getreidetrocknung	15 700	Heizöl	50 ha Ackerfläche, 25 ha Getreidetrocknung, Anfangsfeuchte 20 v.H., 50 dt/ha Trockengu!
Gebläse	1 700	Strom	
			Kosten in DM/a (Stand Juli 1977)
Summe Strom	28 700	6 888	Strompreis inkl. Grundgebühr, 4,5 v.H. Ausgleichsabgabe, 11 v.H. Mwst. = 0,24 DM/kWh
Summe Heizöl	131 700	4 083	Heizölpreis bei 10 000 l Abnahme inkl. 11 v.H. Mwst. 0,31 DM/l = 0,031 DM/kWh
Gesamtenergieverbrauch	160 400	10 971	
	v.H. der Energiemenge	v.H. der Kosten	
Strom	18	63	
Heizöl	82	37	

Der relativ hohe Aufwand für Energie von 10 971 DM/a in diesem Modell kann durchaus als realistisch angesehen werden, da 1975 von den landwirtschaftlichen Betrieben der Bundesrepublik Deutschland fast 3 Mrd. DM für Energie in Form von Strom, Brennstoffen und Kraftstoffen ausgegeben wurden. Diese Summe entspricht 11,7 v.H. der Gesamtausgaben der Landwirtschaft für Produktionsmittel (9). Dieser hohe Betrag und die großen Mengen an überschüssigem Stroh lassen es gerechtfertigt erscheinen, nach Möglichkeiten zu suchen, um billiges Stroh als Energieträger zu nutzen.

Die im Stroh gebundene Energie kann entweder als Wärme freigesetzt oder zur Krafterzeugung genutzt werden. Hierzu bieten sich die in Abbildung 3 schematisch dargestellten technischen Möglichkeiten an.

Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Getreidestroh

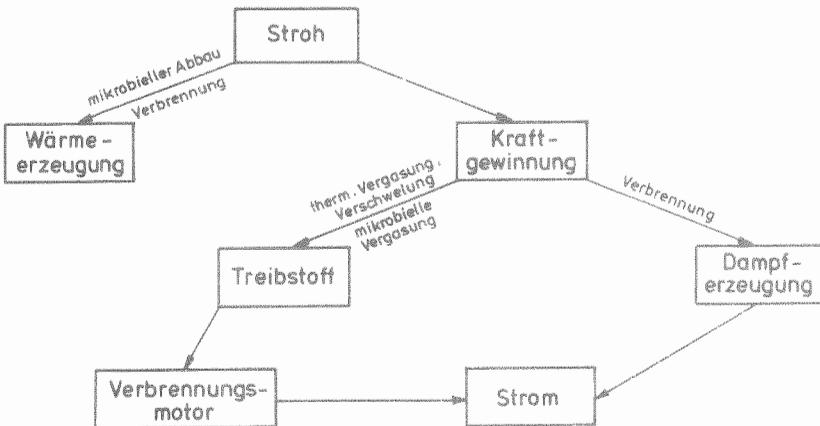


Abbildung 3

Aus Stroh kann entweder durch mikrobiellen Abbau oder durch Verbrennung Wärme gewonnen werden.

Für die Kraftgewinnung läßt sich aus Stroh brennbares Gas herstel-

len, das als Treibstoff in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Stroh als Brennstoff in Dampferzeugern zu verbrennen und Kolbendampfmaschinen oder Dampfturbinen anzutreiben. Diese Dampfmaschinen können ebenso wie Verbrennungsmotoren Generatoren zur Stromerzeugung antreiben. Für die Gasgewinnung aus Stroh bieten sich die Verfahren der thermischen Vergasung, der Verschwelung und die Vergasung durch mikrobiellen Abbau an. Das Prinzip der thermischen Vergasung besteht darin, daß das Stroh unter Sauerstoffmangel erhitzt wird, wodurch die organischen Verbindungen in Kohlenmonoxyd (CO), Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4) sowie verschiedene andere Kohlenwasserstoffe ($\text{C}_m \text{H}_n$) und einige nicht brennbare Nebenprodukte wie CO_2 , N_2 und Asche zerfallen (16). Von dieser Methode unterscheidet sich die Verschwelung dadurch, daß nicht der gesamte Brennstoff in brennbares Gas überführt wird, sondern ein brennstoffabhängiger Anteil an Kohlenstoff, der sogenannte Koks zurückbleibt. Mit der Verschwelung wurde bereits Anfangs des 20. Jahrhunderts in Rußland Stroh verarbeitet (14). Eine weitere Verbreitung dieses Verfahrens dürfte jedoch nicht zuletzt am hohen Arbeits- und Kapitalaufwand gescheitert sein.

Die mikrobielle Vergasung von Stroh ist bereits seit Jahrzehnten unter dem Namen "Biovergasung" bekannt. Das System beruht auf der Lagerung von Stroh zusammen mit tierischen Exkrementen in gasdichten Behältern, in denen unter Sauerstoffabschluß das Stroh und die tierischen Abfälle von Methanbakterien aufgeschlossen werden. Das freiwerdende Gas besteht zu 60 v.H. aus Methan und 40 v.H. Kohlendioxyd. Dieses Gasgemisch wird aus dem Faulbehälter abgesaugt, komprimiert in Druckbehältern gelagert und kann als Schleppertreibstoff oder Heizgas mit einem Heizwert von $21\,000 \text{ kJ/m}_n^3$ bis $30\,000 \text{ kJ/m}_n^3$ Verwendung finden. Der ausgefaulte Rest wird als organischer Dünger verwertet (35;30;31). Eine weitere Verbreitung des Verfahrens scheiterte bisher an den hohen Kapitalkosten und dem geringen Wirkungsgrad im Winter, in dem ein Großteil der erzeugten Energie dem System

als Prozeßwärme wieder zugeführt werden muß, um die notwendigen Faultemperaturen von ca. 30° C aufrechtzuerhalten (4). Außerdem kann das Verfahren von viehlos wirtschaftenden Landwirten zur Strohverwertung ohnehin nicht angewandt werden, da diesen Betrieben der notwendige tierische Abfall fehlt.

Eine Stromgewinnung aus Stroh über die Dampferzeugung durch Strohverbrennung wurde bisher noch nicht durchgeführt, wäre jedoch theoretisch möglich. Hierzu fehlen derzeit noch die notwendigen Kleindampfkraftanlagen, die in ihrer Größe dem Strombedarf landwirtschaftlicher Betriebe angepaßt sind. Der Bau hofeigener Anlagen wird sich auch als sehr kostenaufwendig erweisen, während bei einer Verfeuerung in Großkraftanlagen das geringe Raumgewicht von Stroh in der gesamten Logistik vom Antransport bis zur Beschickung Probleme aufwirft.

Zur Wärmegewinnung aus Stroh bieten sich zwei Möglichkeiten an. Eine besteht in der Nutzung von Wärme, die beim Abbau organischer Substanz durch Mikroorganismen frei wird. Die Erscheinung der Wärmeentwicklung bei der Zersetzung organischer Substanz durch thermophile Bakterien ist unter anderem aus der Heulagerung bekannt. Hier können durch Einlagerung von zu feuchtem Material sogar so hohe Temperaturen auftreten, daß es zur Selbstentzündung des Heustocks kommt. Zur Wärmegewinnung mit diesen Bakterien müßte Stroh wärmeisoliert gelagert sein und die entstehende Wärme über einen in der Lagerstätte befindlichen Wärmetauscher zur Nutzung abgeführt werden. Nachteilig an diesem System ist die Tatsache, daß Stroh wegen des weiten C : N - Verhältnisses von 80 : 1 vor allem im trockenen Zustand nur sehr schwer von Mikroorganismen umgesetzt werden kann (22), und außerdem ein nicht unerheblicher Anteil bei der Verrottung übrigbleibt, der wieder verwertet werden muß. Die Entnahme aus der Lagerstätte kann dabei nur schwierig mechanisiert werden, da sich im Lager der Wärmetauscher befindet, der vor mechanischen Beanspruchungen bei der Umlagerung des Materials möglichst geschützt werden muß.

Die andere Möglichkeit der Wärmegegewinnung aus Stroh besteht in der Verbrennung in geeigneten Strohfeuerungsanlagen. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Wärmegegewinnung durch mikrobiellen Abbau besteht unter anderem darin, daß mit Ausnahme eines geringen Anteils an Asche keine weiteren Nebenprodukte entstehen, die einer Nachbehandlung bedürfen. Außerdem kann die Wärmeentwicklung durch ein Unterlassen des Nachschürens bzw. durch Regelung des Luftzutritts gesteuert werden.

Für die Energiegewinnung aus Stroh durch Verbrennung spricht weiterhin, daß jeder landwirtschaftliche Betrieb Wärme braucht, die bislang meist durch Zukauf von Heizöl gedeckt wird. Gegenüber der Kraftgewinnung hat die Heizung mit Stroh den Vorteil, daß nach dem bisherigen Stand der Technik die Installation von 1 kW Wärmeleistung weniger Investitionsaufwand erfordert als der Einbau einer Kraftanlage mit derselben Leistung, so daß die Strohverfeuerung auch für kleinere landwirtschaftliche Betriebe von Interesse ist. Daher sind Bemühungen notwendig, sinnvolle Lösungen für die Strohverbrennung zu Heizungs- und Trocknungszwecken zu erarbeiten.

1.3 Stand von Wissenschaft und Technik bei der Strohfeuerung

An den Grundlagen der Verbrennungstechnik fester Brennstoffe, speziell von Kohle wurde bereits seit Beginn des Industriezeitalters intensiv gearbeitet, so daß schon vor dem 1. Weltkrieg Kohlefeuerungsanlagen ein hohes Maß an Betriebssicherheit und technischer Vollkommenheit erreichten. Besonders in Krisenzeiten, in denen Energie knapp wurde, erhielt die Forschung zur Energieverwertung immer wieder neue Impulse. Einen umfassenden Überblick über den Stand der Verbrennungstechnik in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts geben die Arbeiten von GRAHL, G. de (14;15) wieder. Noch heute gebräuchliche Konstruktionen wie Wandröste und Kaskadenröste waren bereits damals verbreitet. Mit der Verwendung von Stroh als Brennstoff befaßte man sich jedoch auch zu dieser Zeit nicht, weil dieses Material als Brennstoff

nicht zur Verfügung stand, sondern von der Landwirtschaft für andere Zwecke verbraucht wurde. Eine Ausnahme bildete lediglich die in Abschnitt 1.2 erwähnte Strohvergasung in Rußland. Intensivere Überlegungen zur Strohverbrennung wurden erst mit Beginn der 70er Jahre angestellt, als Strohüberschuß auftrat. So entwickelte LOTTMANN (21) eine fahrbare Anlage zur Strohverbrennung auf dem Feld, um das gefährliche und umweltbelastende flächenmäßige Strohabbrennen zu vermeiden. An eine Nutzung der dabei freiwerdenden Wärme war nicht gedacht.

Überlegungen zur Energiegewinnung durch Strohverbrennung wurden von ORTH et al. (23) angestellt. Sie konstruierten einen Versuchsofen, in dem der Einfluß des Verpressungsgrades und damit der spezifischen Oberfläche auf den Verbrennungsvorgang untersucht werden sollte. Die Konstruktion dieser Feuerungsanlage basierte auf dem Prinzip eines Durchbrandofens. Zur Verbrennung kamen bei annähernd gleicher Einwaage von 23 - 25 kg loses Häckselgut mit einem Schüttgewicht von ungefähr 50 kg/m^3 , Hochdruckballen mit 80 kg/m^3 und Briketts mit 500 kg/m^3 bei annähernd gleichem Verbrennungsluftdurchsatz von $400 - 500 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Verfasser stellten fest, daß die Verbrennung umso vollständiger verlief, und die Verluste durch unvollständige Verbrennung umso geringer waren, je dichter das Material gepreßt war. Bei der Verbrennung von losem Material kam es sogar zu einer explosionsartigen Reaktion. Als Ursache hierfür wird von den Autoren die sehr große reaktionsfähige Oberfläche von nicht verdichtetem Material angesehen, die bewirkt, daß nach der Zündung eine rasche Freisetzung der flüchtigen Gase erfolgt, zu deren vollständiger Verbrennung die zugeführte Verbrennungsluft nicht mehr ausreicht.

Erste praxisreife Strohheizkessel wurden von einer dänischen Firma Anfang der 70er Jahre hergestellt. Diese Anlagen werden heute in Leistungsklassen von 21, 44, 75 und 116 kW angeboten. Mit Ausnahme des kleinsten Typs, der nur zur Holzfeuerung geeignet ist, ermöglichen sie es, Stroh in Form von Hochdruckballen zu verheizen. Ihr Aufbau ist in

Abbildung 4 schematisch dargestellt.

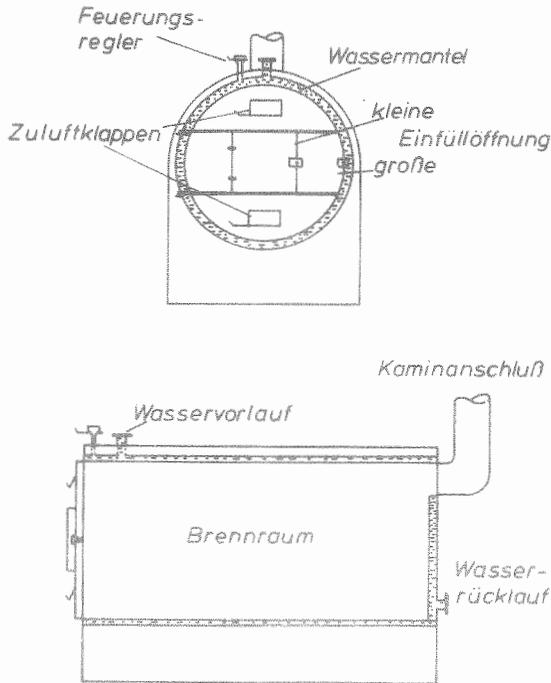


Abbildung 4: Durchbrandkessel für Hochdruckballen und Scheitholz

Die Heizkessel bestehen aus einem liegenden zylindrischen Brennraum, der über eine an der Vorderseite befindliche Feuerungstüre mit Hochdruckballen und Holz in Form von Meterscheiten beschickt werden kann. Um den Brennraum ist ein Wassermantel angeordnet, der mit 2 Anschlüssen mit dem Kreislauf einer Zentralheizungsanlage oder dem Wärmetauscher einer Trocknungsanlage verbunden ist. Über zwei in der Feuer-türe befindliche Zuluftklappen, die von einem Thermostat gesteuert werden, wird die Verbrennungsluft durch den Kaminzug angesaugt. Da bei diesem System der gesamte im Brennraum befindliche Brennstoff gleichzeitig in Glut kommt, werden solche Kessel als Durchbrandkessel bezeichnet. Ähnliche Anlagen werden mittlerweile auch von einem Her-

steller in Bayern gefertigt. Diese Kessel unterscheiden sich von dem in Abbildung 4 dargestellten lediglich dadurch, daß der untere Teil des Wassermantels als wassergekühlter Rost ausgebildet ist, durch den die Asche in einen darunter angeordneten Behälter fällt.

Bei ersten eigenen Untersuchungen mit derartigen Heizkesseln wurde festgestellt, daß sich dieses Verbrennungssystem für Stroh nur bedingt eignet. Vor allem beim Anheizen war eine starke Raumentwicklung zusammen mit großen Verlusten durch unvollständige Verbrennung entstanden. Auch wurden die im Bundesimmissionsschutzgesetz (BimSchG) verankerten Höchstwerte an Staub, Ruß und Teer im Rauchgas häufig überschritten. Bei großer Leistungsabnahme muß außerdem häufig nachgeheizt werden.

Eine weiterentwickelte Form von Strohheizkesseln stellen sogenannte Unterbrandkessel dar, wie sie bereits als Prototypen für die Verheizung von Hochdruckballen und Großrundballen hergestellt wurden. Abbildung 5 zeigt die schematische Darstellung eines solchen Kessels für die Verheizung von Hochdruckballen.

Nach BUDERUS (7) unterscheiden sich Unterbrandkessel von Durchbrandkesseln dadurch, daß nur die Unterschicht des im Füllraum gelagerten Brennstoffs in Glut geraten kann. Der darüberliegende Brennstoff bleibt von der Verbrennung weitgehend unberührt und rutscht lediglich beim Ausbrennen der Unterschicht langsam nach. Gegenüber dem Durchbrandprinzip beruht der Vorteil dieser Bauart darin, daß damit ein länger anhaltender Dauerbrand mit besser dosierbarer Leistungsabgabe und guter Verbrennungsqualität erreicht werden kann.

Der in Abbildung 5 dargestellte Kessel besitzt zwei Füllschächte, die von oben mit Hochdruckballen beschickt werden. Im unteren Teil der Füllräume wird die Primärverbrennungsluft zugeführt. Die Rauchgase treten nach dem Verlassen der Primärverbrennungszone in einen zwischen den Füllschächten befindlichen Nachverbrennungsraum, der zur vollständigen Verbrennung mit Sekundärverbrennungsluft gespeist wird. Ein Ge-

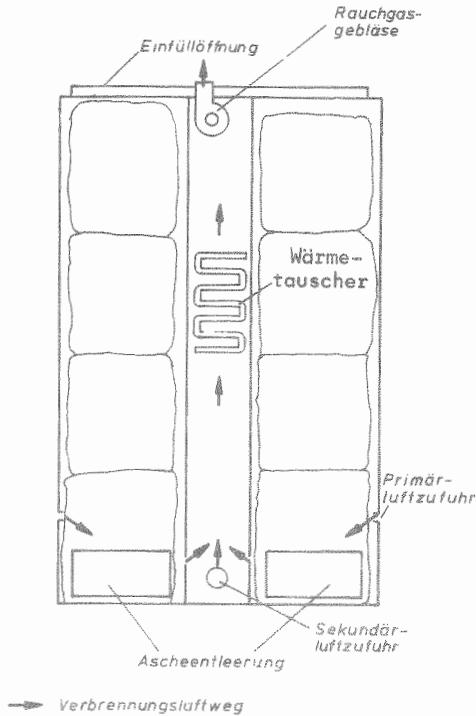


Abbildung 5: Unterbrandkessel für Hochdruckballen

bläse saugt dann die Rauchgase über einen Wärmetauscher ab.

Zwar konnte mit diesen Unterbrandkesseln ein etwas besserer Wirkungsgrad als mit Durchbrandkesseln erzielt werden, jedoch wiesen auch diese Prototypen noch erhebliche Mängel auf. So war die Materialverarbeitung sehr schlecht und die Abstrahlungsverluste waren infolge ungenügender Isolierung hoch. Außerdem war der Wärmetauscher zu klein dimensioniert und zur Reinigung nicht erreichbar und eine Leistungsregelung kaum möglich.

Ähnlich ungünstig ist die Situation bei dem in Abbildung 6 dargestellten Großballenkessel, der ebenfalls mit Unterbrand und Nachverbrennung arbeitet.

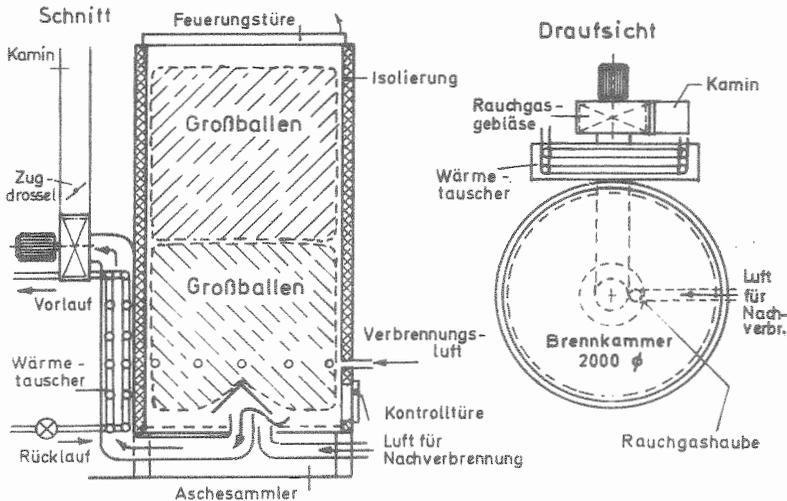


Abbildung 6: Großballenkessel mit Unterbrand und Nachverbrennung

Die Beschickung des Feuerraumes erfolgt mittels einer Greifzange von oben, was sich in dieser Form als sehr ungünstig erwiesen hat. Der Beschickungsvorgang dauert zu lange, und ein Großballen kann bereits während des Nachfüllens Feuer fangen. Im Gegensatz zu den Hochdruckballenkesseln ist hier der Wärmetauscher nicht zwischen den Brennkammern, sondern außerhalb der Anlage angeordnet. Auch bei diesen Prototypen erwies sich die Verarbeitung und Materialqualität als sehr ungenügend. Ebenso war es unmöglich, die Anlage im Schwachlastbereich zu fahren.

Außer in den eingangs erwähnten Arbeiten von LOTTMANN (21) und ORTH (23) werden in der Literatur keine weiteren Angaben über die Verfeuerung von Stroh gemacht, so daß noch genauere Daten über verbrennungstechnische Eigenschaften von Stroh fehlen. Dies dürfte nicht zuletzt der Grund dafür sein, daß die bereits bestehenden Strohfeuerungsanlagen in vielen Punkten noch unbefriedigend arbeiten.

1.4 Ziel der Arbeit

Der einschlägigen Fachliteratur (16; 5; 6) ist zu entnehmen, daß für die Konstruktion und den Betrieb von Feuerungsanlagen die Beschaffenheit des verwendeten Brennstoffs eine große Rolle spielt. So ist zur Ermittlung des stündlichen Brennstoffdurchsatzes bei einer bestimmten Feuerungsleistung der Heizwert des Brennstoffs notwendig und zur ausreichenden Dimensionierung der Verbrennungsluftzufuhr die Kenntnis des spezifischen Verbrennungsluftbedarfes Voraussetzung. Ebenso ist die notwendige Größe der Rauchgasabführung und der Wärmetauschflächen nur über das spezifische Rauchgasvolumen zu bestimmen. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen (Brennstoffanteil, der bei Temperatureinwirkung unter Sauerstoffabschluß in die gasförmige Phase übergeht) bestimmt unter anderem, ob der Einbau von Nachverbrennungseinrichtungen notwendig ist.

Die Problematik der Strohfeuerung liegt darin, daß diese Daten von Stroh nicht bekannt sind und deshalb auch keine Aussage gemacht werden kann, worin sich Stroh von anderen Festbrennstoffen unterscheidet. Solange diese Erkenntnisse jedoch fehlen, erscheint es nicht möglich, Feuerungsanlagen zu konzipieren, die es erlauben, Stroh unter Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften zum Schutz des Betreibers der Anlage und zur Reinhaltung der Luft als Brennstoff zu verwenden. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, folgende Kenngrößen von Getreidestroh zu ermitteln:

- Heizwert H_u des Brennstoffs
- Anteil an flüchtigen Bestandteilen, Koks, Wasser und Asche
- spezifischer Verbrennungsluftbedarf L je kg Brennstoff
- spezifisches Rauchgasvolumen V je kg Brennstoff

Weiterhin soll festgestellt werden, ob diese Werte durch Strohart, Strohsorte, Aufwuchs- und Lagerungsbedingungen im wesentlichen Ausmaß beeinflußt werden können. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Daten anderer Festbrennstoffe soll darlegen, welche speziellen Anfor-

derungen an eine Strohfeuerungsanlage zu stellen sind. In den folgenden Abschnitten werden die hierzu angewandten Methoden und die mit ihnen erzielten Ergebnisse dargestellt.

2. HEIZWERTBESTIMMUNG VON GETREIDESTROH

2.1 Methode

Eine der wichtigsten verbrennungstechnischen Kenngrößen ist der Heizwert. Zu seiner exakten Bestimmung wurde vom Deutschen Normenausschuß die DIN 51 900 herausgegeben (10). Nach dieser Norm gibt der Heizwert H_U diejenige Wärmemenge an, "die 1 kg Brennstoff bei vollständiger Verbrennung entwickelt. Dabei wird unterstellt, daß die Verbrennungsprodukte auf Ausgangstemperatur abgekühlt werden, die kondensierbaren Bestandteile aber in dampfförmigem Zustand bleiben". Dieser Wert kann nicht unmittelbar gemessen werden, sondern ergibt sich rechnerisch aus dem mit dem Bombenkalorimeter bestimmten Brennwert H_O (früher oberer Heizwert) und dem Wassergehalt der Verbrennungsgase.

Zur Bestimmung des Brennwertes wird eine genau abgewogene Brennstoffmenge zusammen mit einer Zündvorrichtung in ein Druckgefäß gebracht. Weiterhin wird in dieses Gefäß Sauerstoff mit 25 bar Überdruck eingelassen, um eine sichere und vollständige Verbrennung zu erreichen. Das Druckgefäß wird in ein wärmeisoliertes Wasserbad gegeben. Nach der Zündung erhöht sich die Temperatur dieses Wasserbades. Die Entwicklung der Temperaturerhöhung wird über längere Zeit mit einem Beckmann-Thermometer verfolgt, das Ablesungen mit einer Genauigkeit von 0,001 K erlaubt. Aus der Temperaturerhöhung, dem Gewicht der Brennstoffeinwaage, der Wärmekapazität des gesamten Systems (Wasserbad und Druckgefäß) und einigen Korrekturfaktoren wird der Brennwert H_O nach Formel I berechnet.

$$H_O = \frac{C \cdot (t_m + c - t_o) - \sum b}{G} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (\text{I})$$

Hierin bedeuten:

- t_o = erste Temperatur des Hauptversuches im Wasserbad
- t_m = letzte Temperatur des Hauptversuches im Wasserbad
- G = Einwaage des Brennstoffes in g

c = Berichtigung für den Wärmeaustausch zwischen Kalorimeter und Umgebung

Σb = Summe der Berichtigungen für beobachtete Wärmemengen, die der Begriffserklärung des Brennwertes nicht entsprechen

C = Wärmekapazität in kJ/K des Systems (durch Verbrennung von Benzoesäure mit bekanntem Verbrennungswert bestimmt)

Die Berichtigung c wird nach einer von MOSER (zit. in 10) angegebenen Umformung der Regnault-Pfaunderschen Gleichung wie folgt berechnet:

$$c = m \cdot \Delta t_n - (\Delta t_n + \Delta t_v) \cdot F \quad (\text{II})$$

Hierin bedeuten:

m = Dauer des Hauptversuches in Minuten

Δt_v = mittlerer Temperaturanstieg für jede Minute des Vorversuches

Δt_n = mittlerer Temperaturabfall für jede Minute des Nachversuches

F = wird mit einer für die meisten Fälle ausreichenden Genauigkeit mit folgenden Zahlenwerten in Gleichung II eingesetzt:

$F = 1,00$, wenn der Temperaturanstieg in der ersten Minute des Hauptversuches größer ist als in der zweiten;

$= 1,25$, wenn der Temperaturanstieg in der ersten und zweiten Minute des Hauptversuches annähernd gleich ist;

$= 1,50$, wenn der Temperaturanstieg in der ersten Minute des Hauptversuches kleiner ist als in der zweiten.

Die Berichtigung Σb in Gleichung I setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Sigma b = b_N + b_S + b_Z \quad (\text{III})$$

Hierin bedeuten:

b_N = Wärmemenge, die dadurch frei wird, daß der im Brennstoff enthaltene Stickstoff zu Salpetersäure verbrennt. Für 1 mg Salpetersäure sind 0,96 J, für 1 cm³ 1/10 n Salpetersäure 6,28 J anzusetzen.

b_S = Wärmemenge, die bei der Bildung von Schwefeltrioxyd in Lösung aus Schwefeldioxyd entsteht. Für 1 mg Schwefelsäure sind 3,0 J für 1 cm³ 1/10 n Schwefelsäure 15,1 J anzusetzen.

b_Z = Wärmemenge, die durch Verbrennung eines Hilfsstoffes z.B. einer brennbaren Umhüllung oder des Zünddrahtes entsteht.

Aus dem errechneten Brennwert H_O kann nach Formel IV der Heizwert H_U ermittelt werden:

$$H_U = H_O - 24,41 \cdot w \text{ (kJ/kg)} \quad \text{(IV)}$$

Hierin bedeutet:

w = Durch Elementaranalyse bestimmtes Wasser, das aus den wasserstoffhaltigen Inhaltsstoffen des Brennstoffs während der Verbrennung entsteht plus Feuchtegehalt des Brennstoffs in Gew.-v.H..

Zur Veranschaulichung der Heizwertbestimmung ist in Abbildung 7 ein Bombenkalorimeter schematisch dargestellt.

Ein wassergekühlter Isolationsmantel schützt das Kalorimetergefäß vor äußeren Temperatureinflüssen. In dem Kalorimetergefäß steht der Druckbehälter, die sogenannte Kalorimeterbombe, die mit einem Deckel mit Überwurfmutter verschlossen ist. An dem Verschlußdeckel sind ein Einlaßventil für das Einbringen des Sauerstoffs, ein Auslaßventil zum Entweichen der Verbrennungsgase sowie zwei Pole für die elektrische Zündung angebracht. Ein Pol ist als Halterung für den Verbrennungstiegel, der andere als Einlaßventil ausgebildet. Ein Magnetrührwerk sorgt dafür, daß sich der gesamte Wasserinhalt des Gefäßes nach der Zündung gleichmäßig erwärmt.

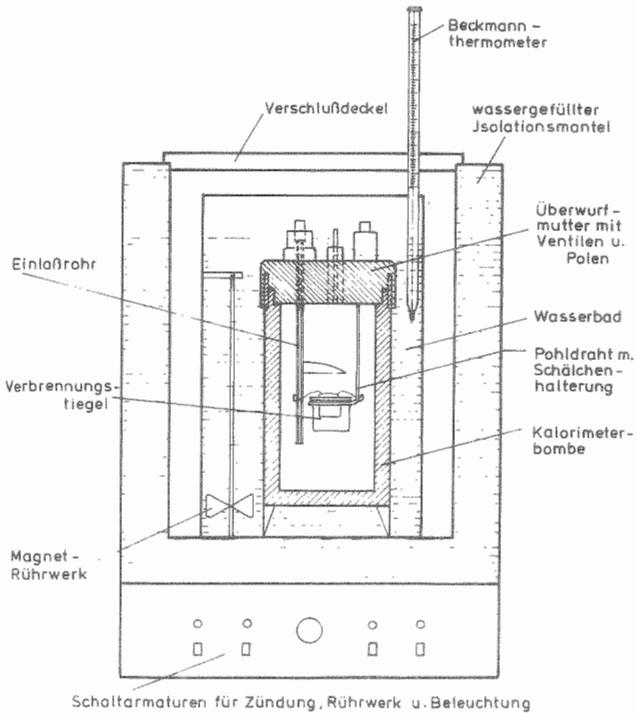


Abbildung 7: Bombenkalorimeter zur Heizwertbestimmung nach DIN 51 900

Für einige weiterführende Berechnungen ist es notwendig, den Heizwert der lufttrockenen Substanz $H_{u(lftr)}$ auf verschiedene Bezugsgrößen umzurechnen. So errechnet sich der Heizwert der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ nach Formel V:

$$H_{u(wf)} = \frac{(H_{u(lftr)} + 24,41 \cdot U) \cdot 100}{100 - U} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (\text{V})$$

U bedeutet hierin den Feuchtegehalt des Brennstoffes in v.H..

Der Heizwert der wasser- und aschefreien Substanz $H_{u(waf)}$ errechnet sich nach Formel VI:

$$H_{u(waf)} = H_{u(wf)} \cdot \frac{100}{100 - A} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (\text{VI})$$

A bedeutet hierin den Aschegehalt in v.H..

2.2 Versuchsdurchführung und Methode der Auswertung

In den ersten Vorversuchen, die im Jahre 1975 durchgeführt wurden, zeigte sich, daß der Heizwert von Getreidestroh keine konstante Größe ist, sondern von verschiedenen, nicht näher erfaßten Faktoren beeinflußt wird (36). Bei diesen Untersuchungen ergab sich, daß Haferstroh und Weizenstroh mit gleichem Feuchtegehalt von 14 v.H. einen unterschiedlichen Heizwert von 10 900 kJ/kg bzw. 16 200 kJ/kg aufwiesen. Der Schluß lag nahe, daß der Heizwert sowohl von den Getreidearten und -sorten als auch von den Umweltbedingungen während des Aufwuchses und der Lagerung beeinflußt wird. Um darüber mehr Klarheit zu erhalten, wurde eine Versuchsserie angelegt, in der die Abhängigkeit des Heizwertes von Getreideart, Getreidesorte, Standort, Witterung, Düngung und Lagerung untersucht wurde.

Das Untersuchungsmaterial wurde nach der Probennahme auf den Versuchsfeldern der Bayerischen Landesanstalt für Pflanzenbau und Bodenkultur (LfPB) in Frankendorf b. Freising und Weißenstephan und dem Versuchsfeld des Lehrstuhls für Pflanzenernährung in Weißenstephan 3 - 4 Wochen lang offen gelagert, um ein eventuell notwendiges Nach-trocknen zu erreichen. Die Lagerraumtemperatur schwankte in diesem Zeitraum witterungs- und tageszeitbedingt zwischen 18 - 23° C, die relative Luftfeuchte zwischen 40 und 70 %. Danach wurde das Stroh in der Labormühle gemahlen und mit einer Teilprobe im Trockenschrank der Feuchtegehalt bestimmt. Der verbliebene Rest - je Stichprobe etwa 50 g - wurde luftdicht in Plastikbeutel bis zum Zeitpunkt der Heizwertbestimmung aufbewahrt, um etwaige Befeuchtung und damit verbundene Heizwertveränderungen auszuschließen.

Zur Untersuchung kamen insgesamt 55 verschiedene Proben, an denen jeweils 6 - 8 Heizwertbestimmungen zur ausreichenden statistischen Absicherung des Mittelwertes vorgenommen wurden. Zur Versuchsauswertung wurde von AUERNHAMMER (42) das EDV-Programm KALORI entwickelt, das aus den Meßdaten den Heizwert der lufttrockenen Substanz $H_{U(lftr)}$ und der wasserfreien Substanz ($H_{U(wf)}$) errechnet und mit Angabe des Mittel-

wertes in kJ/kg, der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der Wiederholungen ausdrückt. In Anhangstabelle 1 ist ein Beispiel aufgeführt. Wahlweise können die Ergebnisse auf Lochkarten ausgestanzt werden.

In der weiteren Auswertung wurde so vorgegangen, daß immer nur solche Stichproben auf signifikante Unterschiede im Heizwert getestet wurden, bei denen alle Einflußfaktoren mit Ausnahme eines einzigen konstant gehalten waren. Dabei wurde das EDV-Programm PESK (40) (Programm zur Ermittlung statistischer Kenngrößen) herangezogen. Das Berechnungsverfahren geht so vor, daß nach der Bestimmung von Mittelwert und Streuung ein Test auf Normalverteilung und auf Ausreißer durchgeführt wird. Aus zwei nacheinander berechneten Proben kann dann über den F- und den t-Test ermittelt werden, ob zwischen den Mittelwerten bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95, 99 oder 99,9 v.H. signifikante Unterschiede bestehen (33).

Bei der Ermittlung des Witterungseinflusses wurde weiterhin festzustellen versucht, welche Witterungsfaktoren den größten Einfluß ausüben. Hierzu wurden die Wetterdaten von September 1975 bis August 1977 des Standortes Weihenstephan herangezogen. Zur Verrechnung kamen die Witterungsfaktoren Niederschlagssumme, Summe der mittleren Tagestemperatur, Summe der täglichen Sonnenscheindauer jeweils von der Aussaat bis zur Ernte, Dauer der Vegetationsperiode und die Durchschnitte der mittleren Tagestemperatur (MTT), der täglichen Sonnenscheindauer (SSD) und der täglichen Niederschlagsmenge (NS). Die täglichen Witterungsdaten wurden in der Kleinrechenanlage des Instituts für Landtechnik gespeichert und mit dem EDV-Programm WITTER (43) verrechnet. Das Programm ermittelt aus den täglichen Witterungsdaten für beliebig wählbare Zeitabschnitte die Durchschnittswerte und die Anzahl der Tage. Dabei werden nur die Tage berechnet, deren mittlere Tagestemperatur über einer beliebig wählbaren Temperaturuntergrenze liegt.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Der Einfluß des Feuchtegehaltes

Während der Einfluß von Getreideart, Getreidesorte, Witterung, Standort, Düngung und Lagerung experimentell untersucht werden muß, kann die Heizwertveränderung durch die Zu- bzw. Abnahme des Feuchtegehaltes nach Formel VII (10) rechnerisch bestimmt werden:

$$H_{u(\text{roh})} = H_{u(\text{wf})} \cdot \frac{100-U}{100} - 24,41 \cdot U \text{ (kJ/kg)} \quad (\text{VII})$$

Hierin bedeuten:

- $H_{u(\text{roh})}$ = Heizwert der Rohsubstanz in kJ/kg
- $H_{u(\text{wf})}$ = Heizwert der wasserfreien Substanz in kJ/kg
- U = Feuchtegehalt in Gew.-v.H.

Nach Formel VII wurde der Heizwert der Rohsubstanz $H_{u(\text{roh})}$ für verschiedene Feuchtegehalte und unterschiedliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(\text{wf})}$ errechnet. Um möglichst den gesamten in der Natur vorkommenden Bereich abzudecken, wurden unterschiedliche Feuchtegehalte in Stufen von 5 v.H. und verschiedene Heizwerte der wasserfreien Substanz in Stufen von 2500 kJ/kg von 10 000 - 20 000 kJ/kg unterstellt.

Tabelle 2: Heizwerte von Stroh mit unterschiedlichem Feuchtegehalt U und unterschiedlichem Heizwert der wasserfreien Substanz $H_{u(\text{wf})}$

Feuchtegehalt U in Gew.-%	Heizwert H_u in kJ/kg				
0	10.000	12.500	15.000	17.500	20.000
5	9.380	11.750	14.130	16.500	18.880
10	8.760	11.000	13.260	15.510	17.760
15	8.130	10.260	12.380	14.510	16.630
20	7.510	9.510	11.510	13.510	15.510
25	6.890	8.770	10.640	12.520	14.390
30	6.270	8.020	9.770	11.520	13.270

Die Werte der Tabelle 2 sind in Abbildung 8 grafisch dargestellt. Auf der Abszisse ist der Feuchtegehalt U in Gew.- v.H., auf der Ordinate der Heizwert H_u in $\text{kJ/kg} \cdot 10^3$ aufgetragen.

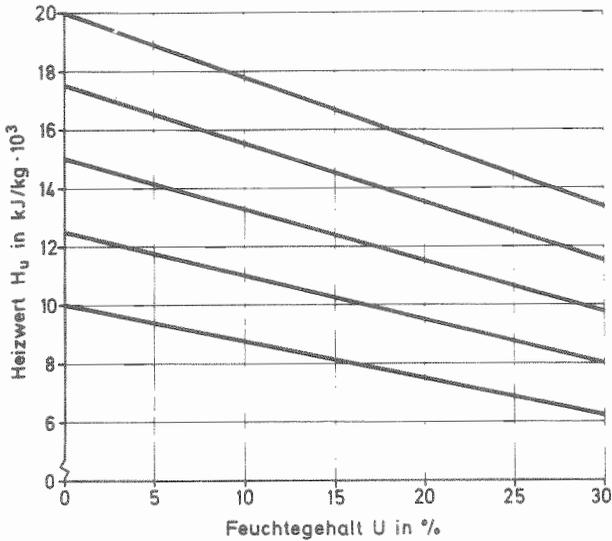


Abbildung 8: Abhängigkeit des Heizwertes H_u vom Feuchtegehalt U eines Brennstoffs

Für alle unterstellten Heizwerte der wasserfreien Substanz ergibt sich eine lineare Abnahme mit zunehmendem Feuchtegehalt. Diese Degression ist absolut gesehen umso ausgeprägter, je höher der Heizwert der wasserfreien Substanz ist. Die prozentuale Abnahme hingegen ist bei niedrigerem Heizwert der wasserfreien Substanz etwas höher. So hat eine Zunahme des Feuchtegehaltes von 15 auf 25 v.H. bei einem Heizwert der wasserfreien Substanz von 10 000 kJ/kg eine Heizwertabnahme von 15,25 v.H., bei 20 000 kJ/kg jedoch lediglich 13,46 v.H. zur Folge. Daraus ergibt sich für diese Feuchtegehaltzunahme von 10 v.H. eine durchschnittliche Heizwertabnahme von 14,3 v.H.. Getreidestroh, das zur Verfeuerung vorgesehen ist, sollte deshalb möglichst trocken geerntet werden und während der Lagerung vor Befeuchtung geschützt sein.

2.3.2 Der Einfluß der Getreidearten und -sorten

Zur Klärung der Frage, ob sich einzelne Getreidearten und -sorten im Heizwert unterscheiden, wurden 1976 verschiedene Sorten der vier Hauptgetreidearten Weizen, Gerste, Hafer und Roggen untersucht. Aussaat- und Erntezeitpunkt, Düngung und Standort waren für die Sorten einer Art jeweils gleich, um zu gewährleisten, daß durch unterschiedliche Umweltbedingungen hervorgerufene Unterschiede nicht auftreten konnten. Ursprünglich war vorgesehen, daß sämtliche Proben dem Schau-sortiment der Bayerischen Landesanstalt für Pflanzenbau und Bodenkultur in Weihenstephan entnommen werden sollten. Aufgrund terminlicher Schwierigkeiten während der Ernte waren jedoch die Wintergerstensorten dort nicht verfügbar, so daß diese von der Versuchsstation Frankendorf beschafft werden mußten. Das gesamte Untersuchungsmaterial wurde vor der Feuchtegehaltsbestimmung unter den in Abschnitt 2.2 aufgeführten Bedingungen gelagert (18-23° C, 40-70 % rel. Luftfeuchte). Trotz der für alle Proben gleichen Lagerungsbedingungen ergaben sich beachtliche Unterschiede im Feuchtegehalt, wie dies aus Anhangstabelle 2 ersichtlich ist. Da die Standardabweichungen bei den Wiederholungen der Feuchtegehaltsbestimmungen jedoch sehr gering sind, kann angenommen werden, daß die unterschiedlichen Ergebnisse nicht auf Meßungenauigkeiten beruhen, sondern hierfür arten- und sortentypische Sorptionsisothermen verantwortlich sind. Alle festgestellten Feuchtegehalte lagen zwischen 8,03 und 13,55 v.H. und damit durchwegs unter 14 v.H.; das Untersuchungsmaterial war also lagerfest. Die Ursache für die geringen Feuchtegehalte dürfte in der extrem trockenen und warmen Witterung des Jahres 1976 liegen.

Die durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz der einzelnen Getreidearten im Jahre 1976 sind in Tabelle 3 wiedergegeben.

Danach weist Wintergerste mit 16 156 kJ/kg den niedrigsten Wert auf. Es folgen Hafer mit 16 671 kJ/kg, Sommerweizen mit 17 140 kJ/kg, Winterweizen mit 17 188 kJ/kg und Sommergerste mit 17 453 kJ/kg, während Winterroggen mit 17 737 kJ/kg den höchsten Heizwert erreicht. Danach

Tabelle 3: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ der 1976 untersuchten Getreidearten

Getreideart	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Wintergerste	16 156	193,07	1,20	94,71
Hafer	16 671	402,04	2,41	97,73
Sommerweizen	17 140	275,59	1,61	100,48
Winterweizen	17 188	143,80	0,84	100,76
Sommergerste	17 453	282,95	1,62	102,32
Winterroggen	17 737	299,45	1,69	103,98
Durchschnitt	17 058			100

ergibt sich für alle Getreidearten ein Durchschnitt von 17 058 kJ/kg. Die Relativwerte schwanken zwischen 94,71 und 103,98 v.H., so daß sich der höchste und der niedrigste Wert um 9,27 v.H. des Durchschnitts voneinander unterscheiden.

Die Verrechnung dieser Ergebnisse mit dem Programm PESK ergab, daß mit Ausnahme von Winterweizen und Sommerweizen sich die durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ aller Getreidearten signifikant voneinander unterscheiden. Die meisten Unterschiede lassen sich sogar noch mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99,9 v.H. absichern. Lediglich beim Vergleich von Sommerweizen mit Sommergerste beträgt dieser Wert nur 99 v.H. und bei Winterroggen mit Sommergerste 95 v.H.. Die einzelnen Ergebnisse dieser Berechnung sind aus Anhangstabelle 3 ersichtlich.

Um festzustellen, ob unterschiedliche Heizwerte auch sortenbedingt sind, wurden von jeder Getreideart mehrere Sorten untersucht. Tabelle 4 gibt die Heizwerte der einzelnen Wintergerstensorten wieder.

Tabelle 4: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{U(wf)}$ von Wintergerstenstroh der Ernte 1976

Wintergerstensorte	Heizwert $H_{U(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Dunja	15 794	473,70	3,00	97,76
Vogelsanger Gold	16 108	331,56	2,06	99,70
Doris	16 121	384,94	2,39	99,78
Espe	16 124	284,11	1,76	99,80
Dura	16 253	146,16	0,90	100,60
Malta	16 296	270,01	1,66	100,87
Sonja	16 399	135,66	0,83	101,50
Durchschnitt	16 156			100

Von allen untersuchten Wintergerstensorten besitzt die Sorte Dunja mit 15 794 kJ/kg den geringsten Heizwert, gefolgt von Vogelsanger Gold mit 16 108 kJ/kg und der Sorte Doris, die mit 16 121 kJ/kg fast den selben Wert wie Espe mit 16 124 kJ/kg erreicht. Nur wenig höher liegen Dura mit 16 253 kJ/kg, Malta mit 16 296 kJ/kg und Sonja mit 16 399 kJ/kg. Der Durchschnittswert der Wintergerstensorten liegt mit 16 156 kJ/kg um 888 kJ/kg unter dem Durchschnittswert aller Getreidearten.

Die Prüfung auf signifikante Unterschiede (Anhangstabelle 4) ergab, daß sich die einzelnen Wintergerstensorten wesentlich homogener verhalten als die Getreidearten untereinander. Lediglich die Sorten Dunja mit dem niedrigsten Wert und Sonja mit dem Höchstwert waren zum Teil von den anderen Sorten signifikant unterschiedlich.

Die durchschnittlichen Heizwerte der einzelnen Sommergersten sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Sommergerstenstroh der Ernte 1976

Sommergerstensorte	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Canova	17.088	130,79	0,77	97,91
Claudia	17.155	612,15	3,57	98,29
Ortolan	17.320	140,33	0,81	99,24
Villa	17.330	111,57	0,64	99,30
Nudinka	17.461	298,02	1,71	100,04
Carina	17.638	659,91	3,74	101,06
Hilde	17.741	89,59	0,50	101,65
Asse	17.887	229,85	1,28	102,49
Durchschnitt	17.453			100

Von den untersuchten Sommergerstensorten besitzt das Stroh der Sorte Canova mit 17 088 kJ/kg den geringsten Heizwert, während Asse, die einzige untersuchte vierzeilige Sommergerstensorte, mit 17 887 kJ/kg den höchsten Wert erreicht. Diese beiden Sorten weichen somit um 4,58 v.H. des Durchschnittswertes von 17 453 kJ/kg voneinander ab.

Signifikante Unterschiede von den anderen Sorten weisen lediglich Canova, Hilde und Asse auf (Anhangstabelle 5), so daß sich die Sommergersten ähnlich homogen wie die Wintergersten verhalten.

Tabelle 6 gibt die durchschnittlichen Heizwerte der untersuchten Winterweizensorten wieder.

Die englische Sorte Maris Huntsman erreicht mit 16 957 kJ/kg den niedrigsten Heizwert, gefolgt von Benno mit 17 073 kJ/kg und Diplomat mit 17 102 kJ/kg. Fast genau denselben Wert besitzen Monopol und Jubilar mit 17 263 bzw. 17 264 kJ/kg. Ähnlich nah beieinander liegen auch Feldkrone mit 17 322 kJ/kg und Caribo, der mit 17 332 kJ/kg den höchsten Heizwert der Winterweizensorten besitzt.

Tabelle 6: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Winterweizenstroh der Ernte 1976

Winterweizensorte	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Maris Huntsman	16 957	117,93	0,70	98,66
Benno	17 073	226,38	1,33	99,33
Diplomat	17 102	346,93	2,03	99,50
Monopol	17 263	165,31	0,96	100,44
Jubilar	17 264	251,47	1,46	100,44
Feldkrone	17 322	109,15	0,63	100,78
Caribo	17 332	143,28	0,83	100,84
Durchschnitt	17 188			100

Ebenso wie die Gerstenproben weisen nur wenige Winterweizensorten signifikante Unterschiede im Heizwert voneinander auf. So sind laut Anhangstabelle 6 die Werte der Sorten Benno und Feldkrone bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 v.H. signifikant unterschiedlich, während Maris Huntsman sich von Jubilar mit 95 v.H. Sicherheitswahrscheinlichkeit, von Monopol mit 99 v.H. und von Feldkrone und Caribo mit 99,9 v.H. unterscheidet.

An Sommerweizen wurden die Sorten Bali, Kolibri, Janus und Mephisto auf ihren Heizwert untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Den geringsten Heizwert weist hier die Sorte Bali mit 16 800 kJ/kg auf. Ihr folgt Mephisto mit 17 033 kJ/kg und Kolibri mit 17 349 kJ/kg und die Sorte Janus hat den höchsten Heizwert mit 17 379 kJ/kg.

Anhangstabelle 7 zeigt, daß lediglich der Heizwert von Bali mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99,9 v.H. von den Werten der Sorten Janus und Kolibri unterschiedlich ist, während alle anderen Unterschiede statistisch nicht abgesichert werden können.

Tabelle 7: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Sommerweizenstroh der Ernte 1976

Sommerweizensorte	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Bali	16 800	247,64	1,47	98,02
Mephisto	17 033	679,56	3,99	99,38
Kolibri	17 349	93,56	0,54	101,22
Janus	17 379	158,16	0,91	101,40
Durchschnitt	17 140			100

Wie in Tabelle 3 dargestellt, besitzt Winterroggen den höchsten durchschnittlichen Heizwert von allen Getreidearten. Die Ergebnisse der einzelnen Roggensorten sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Winterroggenstroh der Ernte 1976

Roggenstrohsorte	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Tetrahell	17 384	302,31	1,74	98,01
Pekuro	17 700	210,17	1,19	99,79
Kustro	17 749	123,45	0,70	100,07
Nomaro	18 115	97,59	0,54	102,13
Durchschnitt	17 737			100

Die einzige untersuchte tetraploide Sorte Tetrahell besitzt mit 17 384 kJ/kg den geringsten Heizwert. Ihr folgen die beiden Kurzstrohsorten Pekuro mit 17 700 kJ/kg und Kustro mit 17 749 kJ/kg. Den höchsten Heizwert und damit auch den Höchstwert aller untersuchten Strohsorten besitzt die hexaploide Sorte Nomaro mit 18 115 kJ/kg.

proben erreicht die Langstrohsorte Nomaro mit 18 115 kJ/kg.

Im Gegensatz zu den anderen bisher aufgeführten Getreidestrohartarten weisen mit diesen Werten die Roggensorten eine größere Variabilität untereinander auf. So sind, wie in Anhangstabelle 8 dargestellt, mit Ausnahme von Kustro und Pekuro alle Sorten in ihrem Heizwert signifikant voneinander unterschiedlich.

Auch die Heizwerte der einzelnen Hafersorten schwanken in einem grossen Bereich. Ihre Ergebnisse sind in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Haferstrohsorten der Ernte 1976

Haferstrohsorte	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	relativ
Moritz	16 233	214,67	1,32	97,37
Flämingsnova	16 449	205,66	1,25	98,67
Pirol	16 887	112,53	0,67	101,30
Arnold	17 115	86,48	0,51	102,66
Durchschnitt	16 671			100

Hier weist die Sorte Moritz mit 16 233 kJ/kg den geringsten Wert auf, gefolgt von Flämingsnova mit 16 449 kJ/kg und Pirol mit 16 887 kJ/kg. Den höchsten Heizwert besitzt die Sorte Arnold mit 17 115 kJ/kg.

In Anhangstabelle 9 sind die Ergebnisse der Prüfung auf signifikante Unterschiede im Heizwert der Hafersorten aufgeführt. Lediglich die Werte der Sorten Flämingsnova und Moritz sind nicht voneinander signifikant unterschiedlich, während die Differenzen bei allen anderen Sorten hochsignifikant sind.

2.3.3 Der Einfluß der Düngung

Die Nährstoffversorgung einer Pflanze nimmt einen großen Einfluß auf ihre Ertragsleistung. Der Gedanke lag deshalb nahe, zu untersuchen, ob die Höhe der Düngung den Heizwert des Strohs beeinflusst. Um darüber mehr Aufschluß zu erhalten, wurden die Heizwerte von Stroh aus Parzellen eines Dauerdüngungsversuches des Lehrstuhls für Pflanzenernährung in Weihenstephan bestimmt. Diese Proben sind in Tabelle 10 mit dem durchschnittlichen Heizwert aus 6 Wiederholungen aufgeführt.

Tabelle 10: Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ verschieden gedüngter Stroharten

Strohart	Durchschn.Heizwert wasserfr. Substanz		VK der 6 Wiederholungen v.H.	Prüfung auf sign.Untersch. P = 95 v.H.
	in kJ/kg	v.H.		
WW Caribo, 60 Jahre ohne K	16 157	100	1,116	nicht signifikant
WW Caribo, 60 Jahre mit K	16 296	100,86	1,842	
WW Caribo, 40 Jahre ohne N	15 718	100	1,246	*
WW Caribo, 40 Jahre mit N	16 142	102,70	1,784	
SG Hilde, 40 Jahre ohne N	15 908	100	1,191	nicht signifikant
SG Hilde, 40 Jahre mit N	15 746	98,98	0,922	

Das Untersuchungsmaterial entstammt Parzellen, die langjährig mit dem betreffenden Nährstoff normal versorgt wurden, während die Vergleichsflächen im selben Zeitraum keinerlei entsprechende Düngung erhielten.

Die K-Düngung bewirkte bei der Winterweizensorte Caribo eine Zunahme des Heizwertes um 0,86 v.H., die jedoch statistisch nicht abgesichert werden konnte. Hingegen ist die Heizwertzunahme derselben Sorte durch N-Düngung um 2,7 v.H. mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 v.H. als signifikant anzusehen. Im Gegensatz dazu verursachte eine N-Düngung der Sommergerstensorte Hilde eine Heizwertabnahme um 1,02 v.H., die jedoch bei Variationskoeffizienten der jeweils 6 Wiederholungen von 1,191 v.H. bzw. 0,922 v.H. nicht abgesichert werden konnte.

Eine Getreidesorte, die unter sonst gleichen Bedingungen mit P unter- bzw. normalversorgt war, stand nicht zur Verfügung. Dies liegt nicht zuletzt daran, daß der P-Gehalt des Bodens nur zu einem geringen Teil pflanzenverfügbar ist und außerdem der Gehalt an pflanzenverfügbarem P im Boden nur sehr langsam durch Düngung erhöht werden kann (34).

Aufgrund der geringen Heizwertdifferenzen trotz extrem unterschiedlicher Düngung kann gesagt werden, daß der Heizwert von Getreidestroh nur in unwesentlichem Ausmaß von der Nährstoffversorgung beeinflusst wird.

2.3.4 Der Einfluß der Witterung

Zur Klärung der Frage, ob die Witterung während des Aufwuchses einen Einfluß auf den Heizwert ausübt, wurde versucht, eine Beziehung zwischen den Witterungsdaten der Vegetationsperioden 1975/76 und 1976/77 und dem Heizwert der in dieser Zeit heranwachsenden Strohproben herzustellen. In die Berechnung kamen als unabhängige Variable die Witterungsfaktoren

- Anzahl der Tage über n Grad mittlerer Tagestemperatur von der Aussaat bis zur Ernte
- Summe der mittleren Tagestemperatur in dieser Zeit in °C
- Durchschnittliche Tagestemperatur in °C
- Summe der Sonnenscheindauer in h
- Durchschnittliche tägliche Sonnenscheindauer in h/d
- Summe der Niederschläge in mm
- Durchschnittliche tägliche Niederschläge in mm/d

Die Ermittlung dieser Parameter erfolgte aus den Daten des Deutschen Wetteramtes mit dem EDV-Programm WITTER (43) an der Kleinrechenanlage des Institutes für Landtechnik. Sie sind in den Anhangstabellen 11-13 mit den Temperaturuntergrenzen 5° C, 7° C und 10° C für die einzelnen Getreidearten aufgeführt.

Über die multiple Regressionsanalyse wurde dann versucht, mit dem EDV-

Programm AUFMUR (41) einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Witterungsdaten als Einflußfaktoren (unabhängige Variable) und der Zielgröße Heizwert (abhängige Variable) herzustellen und in Form einer Regressionsgleichung darzustellen. Das Programm AUFMUR geht dabei so vor, daß mit Hilfe eines F-Testes diejenige unabhängige Variable ermittelt wird, deren Korrelationskoeffizient zur Zielgröße am größten ist und sich signifikant von Null unterscheidet. Diese Variable wird dann in den Regressionsansatz aufgenommen. In den weiteren Schritten wird dann immer diejenige Variable mit dem nächsthöheren Korrelationskoeffizienten in den neuen Ansatz aufgenommen, bis alle Variablen mit einem von 0 verschiedenen Korrelationskoeffizienten in der Regressionsgleichung erscheinen, die dann nach folgendem Schema dargestellt wird:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_ix_i \quad (\text{VIII})$$

Dabei ist:

y = Zielgröße (Heizwert)

a = Absolutglied

b = Regressionskoeffizient

x₁ = 1. Variable

x₂ = 2. Variable

x₃ = 3. Variable

x_i = i-te Variable

} Witterungsdaten

Nach diesem Verfahren wurden die insgesamt 40 durchschnittlichen Heizwerte der 1976 und 1977 untersuchten Strohsorten mit den dazugehörigen Witterungsdaten verrechnet. Die Regressionsgleichung mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß wurde erzielt, als die Witterungsdaten mit einer Temperaturuntergrenze von 10° C herangezogen wurden.

$$y = - 467,1545 + 12,4642 x_1 - 29,5285 x_2 + 12,9612 x_3 + \quad (IX) \\ + 26326,1211 x_4 - 11721,8164 x_5$$

	b	t-Werte
x_1 = Summe der mittleren Tages- temperatur (1469,0249)	12,4642	3,83579
x_2 = Summe der Sonnenschein- dauer (838,59985)	-29,5285	-4,46144
x_3 = Summe der Niederschläge (206,29999)	12,9612	2,51900
x_4 = Durchschnittliche Sonnen- scheindauer (logarith- miert) (0,95853)	26.326,1211	2,86371
x_5 = Durchschnittliche Nieder- schläge (logarithmiert) (0,33367)	11.721,8164	-4,50897

n = 40

B = 0,776

F = 23,558

Anhand der t-Werte kann eine Wertung über die Einflußnahme der einzelnen Variablen vorgenommen werden. So ist der Einfluß der Summe der Sonnenscheindauer mit dem t-Wert von -4,46144 und der durchschnittlichen täglichen Niederschläge mit $t = -4,50897$ am stärksten abgesichert. Das Minuszeichen besagt, daß diese Variablen den Heizwert negativ beeinflussen. Der t-Wert von 3,83579 der Variablen x_1 sagt aus, daß die positive Einflußnahme der Summe der mittleren Tagestemperatur etwas weniger stark gesichert ist. Auch die Summe der Niederschläge und die durchschnittliche Sonnenscheindauer wirken sich positiv auf die Höhe des Heizwertes aus, wenn auch der Einfluß dieser Variablen mit t-Werten von 2,51900 und 2,86371 im Vergleich zu den anderen Witterungsfaktoren am wenigsten abgesichert ist.

Werden die Werte für a, b_1 b_5 und x_1 x_5 in Formel (VIII) eingesetzt, dann ergibt sich beispielsweise für die Winterweizensorte Jubilar, Ernte 1976 ein geschätzter Heizwert der wasserfreien Substanz von $H_{u(wf)} = 17\,077$ kJ/kg.

Das Bestimmtheitsmaß B von 0,776 besagt, daß die Gesamtstreuung der untersuchten Proben zu 77,6 v.H. durch die Regressionsgleichung erklärbar ist. Dieser für biologisches Material erstaunlich hohe Wert erklärt sich zum einen daraus, daß die Jahre 1976 und 1977 eine sehr unterschiedliche Witterung aufwiesen. Zum anderen standen nur Werte aus diesen beiden Jahren zur Verfügung, so daß dieser Regressionsgleichung nur ein bedingter Aussagewert zukommt. Für eine ausreichende statistische Absicherung müßte nämlich die Zahl der beobachteten Werte die Anzahl der Einflußgrößen um 1 übersteigen (33). In diesem Fall müßten also bei 7 verschiedenen Witterungsfaktoren Heizwert und Witterung über 8 Jahre hinweg beobachtet werden. Da aber die Unterschiede im Heizwert der untersuchten Sorten zwischen dem sehr warmen und trockenen Jahr 1976 und dem kühleren und feuchten Jahr 1977 nur maximal 4,49 v.H. betragen, erscheint es gerechtfertigt, auf weitere Untersuchungen zu verzichten. In Tabelle 11 sind die Heizwerte einiger Strohsorten vom Standort Weihestephan aus den Jahren 1976 und 1977 wiedergegeben.

Tabelle 11: Heizwerte einiger Strohsorten im Jahresvergleich zwischen 1976 und 1977

Strohsorte	Heizwert $H_{U(wf)}$ 1976 in kJ/kg	Heizwert $H_{U(wf)}$ 1977 in kJ/kg	Abweichung in Wertes 1976	Prüfung auf signifikante Unterschiede
SW Kolibri	17 349	17 156	- 1,11	nicht signifikant
H Arnold	17 116	17 123	+ 0,04	nicht signifikant
WR Kustro	17 749	16 987	- 4,29	**

Bei der Sommerweizensorte Kolibri wurde der Heizwert der wasserfreien Substanz im Jahre 1977 gegenüber 1976 um 1,11 v.H. erniedrigt, während die Hafersorte Arnold im selben Zeitraum um 0,04 v.H. anstieg. Lediglich der Winterroggen Kustro wurde durch die Witterung mehr beeinflusst, so

daß 1977 sein Heizwert um 4,29 v.H. abnahm. Diese Abnahme war in diesem Versuch auch die einzige, die statistisch mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99 v.H. in einem t-Test abgesichert werden konnte.

2.3.5 Der Einfluß des Aufwuchsstandortes

Neben den genetischen Voraussetzungen spielt der Aufwuchsstandort eine bedeutende Rolle für das Wachstum einer Pflanze. So übt er durch folgende Faktoren einen Einfluß auf die pflanzliche Entwicklung aus:

- geografische Lage
- Inklination und Exposition
- Klima
- Bodenverhältnisse (18)

Diese Variablen wirken nicht nur auf die Pflanze selbst, sondern stehen auch untereinander in einem Wechselspiel. Um alle möglichen Kombinationen dieser Faktoren in ihrer Auswirkung auf den Heizwert zu überprüfen, wäre eine große Zahl von Versuchen über mehrere Jahre hinweg erforderlich, deren Aufwand aufgrund der zu erwartenden geringen Schwankungen nicht gerechtfertigt erscheint. Die Versuche zur Bestimmung des Standorteinflusses wurden deshalb dahingehend eingeschränkt, daß lediglich festgestellt werden sollte, ob überhaupt ein Zusammenhang zwischen Aufwuchsstandort und Heizwert festzustellen ist. In dem Versuch wurde Stroh der Aufwuchsperiode 1977 von den Standorten Weihenstephan und Frankendorf miteinander verglichen. Diese Orte liegen ungefähr 15 km voneinander entfernt und besitzen mit einem langjährigen Mittel der Jahrestemperatur von $7,7^{\circ}$ C und durchschnittlichen Jahresniederschlägen von 814 mm in Weihenstephan und 790 mm in Frankendorf (19) fast genau dieselben Witterungsbedingungen. Etwaige Heizwertunterschiede sind deshalb ausschließlich auf unterschiedliche Bodenverhältnisse wie z.B. Porenvolumen, Luft : Wasserverhältnis und pH-Wert zurückzuführen.

Das feuchte und kühle Wetter während der Getreideernte 1977 bewirkte, daß die Strohproben zur Heizwertbestimmung zum Teil sehr feucht ge-

erntet werden mußten. Dies hatte zur Folge, daß einige Partien während des Nachtrocknens zu schimmeln begannen und deshalb nicht untersucht werden konnten. Nur die Winterroggensorte Kustro und der Sommerweizen Kolibri, deren Proben von beiden Standorten nicht verdorben waren, konnten zur Auswertung herangezogen werden. Die Mittelwerte aus jeweils 6 Wiederholungen wurden in einem t-Test auf signifikante Unterschiede hin geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 wiedergegeben.

Tabelle 12: Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Stroh verschiedener Standorte

Strohsorte	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg		Abweichung inv.H. des Wertes von Weihenstephan	Prüfung auf signifikante Unterschiede
	Weihenstephan	Frankendorf		
WR Kustro	16 987	17 958	+ 5,7	nicht signifikant
SW Kolibri	17 156	17 806	+ 3,8	***

Während der um 5,7 v.H. höhere Heizwert von Kustro auf dem Standort Frankendorf gegenüber Weihenstephan nicht abgesichert werden konnte, war der Unterschied von 3,8 v.H. bei Kolibri aufgrund der geringeren Standardabweichung der Wiederholungen hochsignifikant abzusichern. Eine eindeutige Aussage über einen Bodeneinfluß kann damit nicht gemacht werden. Hierzu müßten noch weitere Heizwertbestimmungen von Stroh verschiedener Standorte vorgenommen werden. Aufgrund der geringen Unterschiede in diesem Versuch, die z.T. nicht einmal abgesichert werden konnten, erscheint es jedoch gerechtfertigt, auf weitergehende Untersuchungen zu verzichten.

Um einen Einblick darüber zu erhalten, ob der Standort in seiner Gesamtheit - also auch die unterschiedliche Tageslänge, Klima usw. - einen Einfluß auf den Heizwert besitzt, wurden auch Strohproben aus

dem europäischen Ausland untersucht. Es standen Weizen- und Gerstenstroh aus der Poebene in Italien und eine Weizensorte aus dem Fürstentum Liechtenstein zur Verfügung. Außerdem konnte noch Reisstroh aus der Poebene untersucht werden. Die durchschnittlichen Heizwerte dieser Proben aus jeweils 6 Wiederholungen sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Getreidestroh ausländischer Herkunft

Strohart	Herkunft	\bar{x} in kJ/kg	s	VK
Weizenstroh	Liechtenstein	17 663	146,91	0,83
Gerstenstroh	Poebene	16 648	187,73	1,13
Weizenstroh	Poebene	16 797	58,55	0,35
Reisstroh	Poebene	14 618	120,08	0,82

Auch diese ausländischen Varietäten weichen mit Ausnahme von Reisstroh nicht wesentlich von dem in Weihenstephan aufgewachsenen Stroh ab, für das ein Durchschnittswert von 17 058 kJ/kg der wasserfreien Substanz ermittelt wurde. Somit kann ein Einfluß des Aufwuchsstandortes auf den Heizwert von Stroh als nicht vorhanden betrachtet werden. Der niedrige Heizwert von Reisstroh läßt sich dadurch erklären, daß dieses Material mit 17 v.H. einen wesentlich höheren Aschegehalt aufweist als die anderen Getreidestroharten mit 4 - 6 v.H.(3).

2.3.6 Die Heizwertveränderung durch Lagerung

Wie jede organische Substanz kann auch Stroh durch unsachgemäße Lagerung (zu feucht und zu warm) Veränderungen erfahren, die es in seiner Qualität mindern. Um festzustellen, ob durch den Verderb infolge zu feuchter Lagerung auch der Heizwert verändert wird, wurden einem Rundballen, der durch Feuchteinfluß im Laufe von 6 Monaten an sei-

ner Unterseite verschimmelt war, Proben entnommen. Als Nullprobe diente dem Ballenkern entnommenes Stroh, das keine Veränderungen aufwies. 20 cm über der Auflagefläche zeigte das Material erste bräunliche Verfärbungen. An dieser Stelle wurde die zweite Probe gezogen. Ca. 5 cm über dem Erdboden war das Stroh durch den mikrobiellen Abbau bereits dunkelbraun verfärbt; hier wurde die dritte und an der Auflagestelle, wo die stärksten Veränderungen zu erkennen waren, die vierte Probe entnommen.

Die Ergebnisse der Heizwertbestimmung an diesem Material sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14: Abnahme des Heizwertes der wasserfreien Substanz $H_{U(wf)}$ durch Zunahme des mikrobiellen Abbaus

Probe	Zunahme des Verderbs	Heizwert der wasserfreien Substanz $H_{U(wf)}$ in kJ/kg	Signifikanzgrad	Relativwerte in v.H.
0	ohne Veränderung	17 620		100
1	leicht bräunlich	17 380	**	98,6
2	braun verfärbt	17 229	***	97,8
3	stark verfäult	16 802	***	95,4

** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P=99$ v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P=99,9$ v.H.

Die Heizwerte der wasserfreien Substanz zeigen eine deutliche Abnahme mit zunehmendem Verderb. So erreicht bereits die nur leicht verfärbte Probe mit 17 380 kJ/kg nur mehr einen Heizwert, der 1,6 v.H. unter dem Wert der Nullprobe liegt. Bei stärkerer Braunfärbung beträgt der Heizwert mit 17 229 kJ/kg noch 97,8 v.H. des Ausgangsmaterials, und die am stärksten verfäulte Probe sinkt mit 16 802 kJ/kg um 818 kJ/kg gegenüber der Nullprobe am meisten ab. Dies entspricht einer Verminde-

ung um 4,6 v.H.. Daraus kann geschlossen werden, daß bei der Verrottung von Stroh neben den durch Mikroorganismen verursachten üblichen Masseverlusten auch eine Abnahme des Heizwertes zu beobachten ist.

2.4 Diskussion der Ergebnisse

Zur Ermittlung des Heizwertes von Getreidestroh wurden insgesamt 361 Heizwertbestimmungen nach DIN 51 900 durchgeführt. Dabei sollte festgestellt werden, ob diese Größe durch relevante Faktoren beeinflusst wird.

Es zeigte sich, daß die Durchschnitte der einzelnen Getreidearten, die unter sonst gleichen Bedingungen aufgewachsen waren, um bis zu 9,27 v.H. voneinander abweichen, wobei die Wintergersten mit einem durchschnittlichen Heizwert der wasserfreien Substanz von $H_{u(wf)} = 16\ 156$ kJ/kg den niedrigsten Wert erreichen und Winterroggen mit 17 737 kJ/kg den höchsten durchschnittlichen Heizwert aufweist.

Demgegenüber erbrachte eine Sortenvergleich innerhalb der Arten wesentlich geringere Unterschiede. So beträgt die Differenz der einzelnen Wintergerstensorten maximal 3,74 v.H. des Durchschnittswertes und die Sommergersten differieren um maximal 4,58 v.H.. Noch einheitlicher verhalten sich die Winterweizensorten mit 2,18 v.H. Unterschied und die Sommerweizensorten mit 3,38 v.H. Unterschied zwischen der Sorte mit dem Höchstwert und der Sorte mit dem niedrigsten Heizwert. Bei den Winterroggensorten beträgt diese Differenz 4,42 v.H. und bei den Hafersorten 5,12 v.H.. Den niedrigsten Heizwert aller untersuchten Sorten besaß die Wintergerste Dunja mit 15 794 kJ/kg, den höchsten der Winterroggen Nomaro mit 18 115 kJ/kg; somit beträgt der größte festgestellte Unterschied 13,6 v.H. des Durchschnittswertes von 17 058 kJ/kg.

Ein Einfluß der Witterung während der Aufwuchsperiode auf den Heizwert war nicht eindeutig nachzuweisen. Zwar konnte mit Hilfe einer aufbauenden multiplen Regressionsanalyse eine Regressionsgleichung aufgestellt werden, mit der aus der mittleren Tagestemperatur, der

Summe der Sonnenscheindauer, der Niederschlagssumme, der durchschnittlichen täglichen Sonnenscheindauer und den durchschnittlichen täglichen Niederschlägen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,776 der Heizwert $H_{u(wf)}$ berechnet werden kann, jedoch ist dieser Aussage aufgrund der geringen Zahl der beobachteten Jahre noch wenig abgesichert. Da aber trotz der extrem unterschiedlichen Witterungsverhältnisse in den beiden Untersuchungsjahren 1976 und 1977 die Heizwertunterschiede nur in einem Fall mit 4,49 v.H. so hoch waren, daß sie statistisch abgesichert werden konnten, dürften weitere Nachforschungen in dieser Richtung wenig sinnvoll sein.

Eine Veränderung des Heizwertes durch unterschiedliche Düngung mit N und K wurde an der Winterweizensorte Caribo und der Sommergerste Hilde untersucht. Jedoch nur an der Sorte Caribo konnte eine signifikante Erhöhung des Heizwertes durch N-Düngung um 2,7 v.H. beobachtet werden, so daß der Düngungseinfluß als unwesentlich betrachtet werden kann.

Der Anbau der selben Sorten auf zwei verschiedenen Standorten erbrachte nur in einem von zwei beobachteten Fällen eine signifikante Heizwertveränderung. So erzielte der Sommerweizen Kolibri 1977 in Weihenstephan einen Heizwert $H_{u(wf)}$ von 17 156 kJ/kg, im 15 km entfernten Frankendorf jedoch mit 17 806 kJ/kg 3,8 v.H. mehr. Der unterschiedliche Heizwert der Winterroggensorte Kustro auf den beiden Standorten hingegen konnte statistisch nicht abgesichert werden. Ein Einfluß des Aufwuchsstandortes auf den Heizwert von Stroh konnte also nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Demgegenüber hat der mikrobielle Abbau von Stroh unter Feuchtlagerung eine deutliche Abnahme des Heizwertes zur Folge. So sank der Heizwert der wasserfreien Substanz mit zunehmendem Verderb von 17 620 kJ/kg der nicht verschimmelten Nullprobe auf 16 802 kJ/kg ab, wenn das Stroh stark verfäult war, und erreichte damit nur mehr 95,4 v.H. des Ausgangsheizwertes.

Für alle Berechnungen auf signifikante Unterschiede wurde der Heizwert der wasserfreien Substanz herangezogen, um den Einfluß von Feuchtegehaltsschwankungen auszuschalten. Für die Verbrennung ist jedoch der Heizwert der Rohsubstanz von Bedeutung, der eine starke Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Brennstoffs aufweist. So hat eine Feuchtegehaltszunahme von 15 auf 25 v.H. eine lineare Abnahme des Heizwertes um 14,3 v.H. zur Folge und übt damit von allen untersuchten Faktoren den größten Einfluß auf den Heizwert aus.

Der in Tabelle 3 wiedergegebene durchschnittliche Heizwert von Getreidestroh mit 17 058 kJ/kg wurde aus den Durchschnitten der 1976 untersuchten Getreidesorten gebildet. Werden aber auch die 1977 ermittelten Werte mit Ausnahme der beim Lagerungsversuch verschimmelten Proben mitberechnet, so ergeben sich für die einzelnen Getreidearten die in Tabelle 15 aufgeführten Durchschnittswerte. Die Einzelwerte sind der Anhangstabelle 10 entnommen. In der Tabelle 15 sind außerdem die Prozentanteile der Anbauflächen der einzelnen Getreidearten aufgeführt. Diese Daten entstammen der Besonderen Ernteermittlung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1977 und geben den Stand von 1976 wieder.

Um für weitergehende Berechnungen einen repräsentativen Durchschnittsheizwert zu erhalten, werden die durchschnittlichen Heizwerte der einzelnen Getreidearten mit ihren Anbauverhältnissen in Formel (X) in Rechnung gesetzt:

$$\overline{H_{u(wf)}} = WG \cdot 0,164 + SG \cdot 0,193 + WW \cdot 0,289 + \quad (X) \\ SW \cdot 0,047 + WR \cdot 0,131 + H \cdot 0,176$$

Hierin bedeuten:

- WG = durchschnittlicher Heizwert $H_{u(wf)}$ von Wintergerste
- SG = durchschnittlicher Heizwert $H_{u(wf)}$ von Sommergerste
- WW = durchschnittlicher Heizwert $H_{u(wf)}$ von Winterweizen

SW = durchschnittlicher Heizwert $H_{u(wf)}$ von Sommerweizen
WR = durchschnittlicher Heizwert $H_{u(wf)}$ von Winterroggen
H = durchschnittlicher Heizwert $H_{u(wf)}$ von Hafer

Tabelle 15: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ der einzelnen Getreidearten, gebildet aus sämtlichen 1976 und 1977 durchgeführten Untersuchungen

Getreideart	Heizwert $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	s	VK	Anbauverhältnis in der BRD in v.H.
Wintergerste	16 156	193,2	1,20	16,4
Sommergerste	17 084	707,8	4,14	19,3
Winterweizen	16 852	588,5	3,49	28,9
Sommerweizen	17 333	337,4	1,94	4,7
Winterroggen	17 775	248,6	1,40	13,1
Hafer	16 760	401,04	2,39	17,6

Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von $H_{u(wf)} = 16\,909$ kJ/kg.
Bei einem Feuchtegehalt von 14 v.H. errechnet sich daraus nach Formel VII ein Heizwert der lufttrockenen Substanz von
 $H_{u(lftr)} = 14\,200$ kJ/kg.

Für die weiteren Berechnungen wird der Heizwert der wasserfreien Substanz auf $H_{u(wf)} = 16\,900$ kJ/kg abgerundet.

2.5 Der Heizwert von Stroh im Vergleich mit den Werten anderer Festbrennstoffe

Zur Beurteilung des Brennstoffes Stroh ist ein Vergleich seines Heizwertes mit den Werten anderer Festbrennstoffe nötig. Diese sind in Tabelle 16 aufgeführt. Mit Ausnahme von Stroh beruhen sie auf Angaben von GUMZ (16).

Tabelle 16: Durchschnittliche Heizwerte verschiedener Festbrennstoffe

Brennstoff	Heizwert der lufttrockenen Substanz $H_{u(lftr)}$ in kJ/kg	Heizwert der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Heizwert der wasser- u. aschefreien Substanz $H_{u(waf)}$ in kJ/kg
Stroh	14 200	16 900	17 900
Holz	15 300	18 600	18 600
Holzkohle	30 100	31 700	31 900
Torf	13 500	21 800	22 200
Braunkohle	13 600	22 500	24 600
Steinkohle	29 500	32 500	34 900
Koks	25 900	28 800	32 500

Die Heizwerte der lufttrockenen Substanz - der bei der Verbrennung effektiv nutzbare Wert - von Stroh, Holz, Torf und Braunkohle liegen in einem relativ engen Bereich zwischen 13 500 und 15 300 kJ/kg, so daß Stroh in Bezug auf den Heizwert ähnlich wie diese Brennstoffe zu bewerten ist. Lediglich die Heizwerte der hochwertigen Brennstoffe Holzkohle, Steinkohle und Koks sind zum Teil mehr als doppelt so hoch. Beim Vergleich der Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiebt sich die Situation zu Ungunsten von Stroh, das mit 16 900 kJ/kg den absolut niedrigsten Wert aufweist. Beim Heizwert der wasser- und aschefreien Substanz, der sich nach Formel VI, Abschnitt 2.1 errechnet, tritt dies noch deutlicher hervor. Daraus läßt sich schließen, daß der verhältnismäßig hohe Heizwert der lufttrockenen Substanz von Stroh nicht darauf beruht, daß seine brennbare Substanz so energiereich ist, sondern daß es einen vergleichsweise geringen Gehalt an nicht brennbaren Ballaststoffen hat.

3. ERMITTLUNG WEITERER VERBRENNUNGSTECHNISCHER KENNGRÖßEN UND DEREN VERGLEICH MIT DEN WERTEN ANDERER FESTBRENNSTOFFE

3.1 Die chemische Zusammensetzung

Zur Berechnung verschiedener verbrennungstechnischer Kenngrößen ist die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung eines Brennstoffs Voraussetzung (16; 5; 6). Um von Stroh die entsprechenden Wert zu erhalten, wurden Elementaranalysen von ausgewählten Proben veranlaßt. Die Analysen wurden als Einfachbestimmungen (ohne Wiederholungen) vom Mikroanalytischen Laboratorium PASCHER in Bonn (25) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 wiedergegeben.

Tabelle 17: Chemische Analysen von Getreidestroh

Strohart	Gehalte in Gewichtsprozent der wasserfreien Substanz						Summe
	Asche	C	O	H	N	S	
Weizenstroh	6,53	48,53	39,08	5,53	0,28	0,05	100
Gerstenstroh	4,30	45,67	38,26	6,15	0,43	0,11	94,92
Haferstroh	4,71	48,22	39,60	5,86	0,41	0,14	98,94
Roggenstroh	4,44	49,84	38,69	5,43	0,35	0,09	98,84
\bar{x}	5,00	48,07	38,91	5,74	0,37	0,10	98,19
s	1,04	1,74	0,57	0,32	0,07	0,04	
VK	20,80	3,63	1,47	5,71	18,24	38,92	

Theoretisch müßte die Quersumme für jede Strohart den Wert 100 ergeben. Dies trifft jedoch nur für Weizenstroh zu, während sich für die anderen Stroharten durch Analysenfehler Abweichungen bis zu - 5 % errechnen. Da jedoch Elementaranalysen sehr kostenaufwendig sind, und die Gehalte der Hauptelemente C, O und H zwischen den einzelnen Arten nur geringfügig schwanken, wurde auf weitere Analysen verzichtet.

Für die folgenden Berechnungen wird mit bereinigten Durchschnittswerten gerechnet, deren Summe 100 ergibt. Der hierbei entstehende

Fehler kann vernachlässigt werden, da er geringer ist als die Analysenunterschiede zwischen den einzelnen Arten. In Tabelle 18 sind diese Werte bezogen auf verschiedene Ausgangssubstanzen aufgeführt.

Tabelle 18: Chemische Zusammensetzung von Getreidestroh in Gewichtsprozent

	Feuchtegehalt	Asche	C	O	H	N	S
lufttrockene Substanz	14	4,3	42,4	33,8*	5,0*	0,4	0,1
wasserfreie Substanz	-	5,0	49,3	39,3	5,8	0,5	0,1
wasser- u. aschefreie Substanz	-	-	51,9	41,4	6,1	0,5	0,1

* ohne O- und H-Gehalt des Wassers

Um anhand dieser Werte eine Aussage über die Eignung von Stroh als Brennstoff machen zu können, müssen sie mit den Gehalten herkömmlicher Festbrennstoffe verglichen werden. Diese wurden dem Handbuch für Brennstoff- und Feuerungskunde von GUMZ und HARDT (16) entnommen und in Tabelle 19 aufgeführt. Aufgrund der großen Schwankungsbreite der Werte für die einzelnen Kohlenarten wurden hier nicht Durchschnittswerte, sondern die von GUMZ und HARDT beschriebenen Minimal- und Maximalwerte angegeben.

Wie aus Tabelle 19 ersichtlich ist, steigt der C-Gehalt eines Brennstoffs mit zunehmendem Alter. So weisen die rezenten Materialien Stroh und Holz Gehalte von 51,9 bzw. 50,4 v.H. auf, während die C-Gehalte der Steinkohlen - den ältesten fossilen Brennstoffen - bei 81 - 92 v.H. liegen. Gleiche oder sogar noch höhere Gehalte besitzen lediglich Holzkohle und die verschiedenen Kokse, die im Laufe der Verkohlung einem künstlichen Alterungsprozeß unterworfen wurden. Die Veränderungen der fossilen Brennstoffe, die sie im Laufe von Jahrtausenden erfuhren,

Tabelle 19: Elementgehalte verschiedener Festbrennstoffe

Brennstoff	Asche in Gewichtsprozent wasserfreien Substanz	Gewichtsprozent der wasser- und asche-freien Substanz				
		C	O	H	N	S
Stroh	5,0	51,9	41,4	6,1	0,5	0,1
Holz	0,4	50,4	43,3	6,2	0,1	0,0
Holzkohle	0,7	83,5	12,6	3,8	0,1	0,0
Torf	2,0	55,5	37,5	5,8	0,9	0,3
Braunkohle	1,3 - 15	63-74	16-26	5-6	0,9-1,9	0,3-3,9
Steinkohle	1 - 15	81-92	1,4-10	4-5	1,2-1,7	0,6-1,4
Koks	9 - 17	90-98	0-5	0,3-2,9	0-0,9	0,6-1,2

beruhen unter anderem darauf, daß aus ihnen die sauerstoffhaltigen flüchtigen Bestandteile ausgetrieben wurden, und dadurch der Kohlenstoffgehalt der Restmasse zunahm. Dementsprechend umgekehrt verhält es sich mit dem Sauerstoffgehalt, der bei Stroh und Holz am höchsten liegt.

Von allen in Tabelle 19 verglichenen Brennstoffen sind die Gehalte an Wasserstoff und Stickstoff annähernd gleich und nur in geringen Mengen vorhanden. Der niedrige Schwefelgehalt von nur 0,1 v.H. im Stroh im Vergleich zu den verschiedenen Kohlen, deren Gehalte zwischen 0,3 bis 3,9 v.H. schwanken, spricht für eine Verwendung von Stroh als Brennstoff. Hohe Schwefelgehalte im Brennstoff sind unerwünscht, da sie bei der Verbrennung die Emission von umweltbelastenden Schwefeloxiden zur Folge haben.

Der Aschegehalt, der als Ballaststoff möglichst niedrig sein soll, liegt für Holz und Holzkohle mit 0,4 und 0,7 v.H. sehr günstig. Ein Aschegehalt von 5,0 v.H., wie er im Stroh vorzufinden ist, kann ebenfalls noch als günstig angesehen werden, wenn berücksichtigt wird, daß die einzelnen Kohlearten bis zu 15 v.H. Asche beinhalten können.

3.2 Fraktionierung in Reinkoks und flüchtige Bestandteile

3.2.1 Methode

Wie jeder feste Brennstoff besteht auch Stroh aus verschiedenen Fraktionen, die in Abbildung 9 schematisch dargestellt sind.

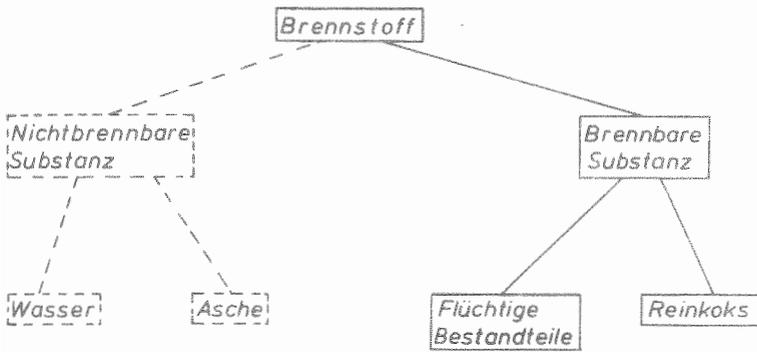


Abbildung 9: Zusammensetzung fester Brennstoffe

Festbrennstoffe setzen sich aus brennbarer Substanz und nichtbrennbaren Ballaststoffen zusammen, worunter Wasser und Asche zu verstehen sind. Die brennbare Substanz besteht aus flüchtigen Bestandteilen und Reinkoks, auch fixer Kohlenstoff genannt (16).

Zur Bestimmung des Anteils dieser beiden Fraktionen sind von GUMZ und HARDT (16) zahlreiche Methoden beschrieben worden, deren gemeinsames Prinzip darauf beruht, daß eine Brennstoffeinwaage unter Sauerstoffabschluß erhitzt wird. Dadurch werden die flüchtigen Bestandteile ausgetrieben, der Reinkoks und die Asche bleiben zurück. Die Unterschiede der einzelnen Bestimmungsmethoden liegen im Gewicht der zu untersuchenden Einwaage, der Erhitzungsgeschwindigkeit, der Endtemperatur und der Dauer der Temperatureinwirkung. In Deutschland gilt als

Bestimmungsverfahren die "Bochumer Methode", die als DIN 51 702 standardisiert wurde. DIN 51 702 wurde jedoch vom Deutschen Normenausschuß ohne Ersatz zurückgezogen, so daß sie zur Strohbeurteilung nicht herangezogen werden konnte. Deshalb wurde nach den Angaben von GUMZ und HARDT (16) eine Versuchsanlage aufgebaut und in Vorversuchen die notwendige Temperatur und Verweilzeit der Probe bestimmt, bei der trotz weiterer Temperatureinwirkung mit keiner Gewichtsabnahme zu rechnen war. In diesem Fall konnte davon ausgegangen werden, daß sämtliche flüchtige Bestandteile ausgetrieben waren. Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau dieser Versuchsanlage.

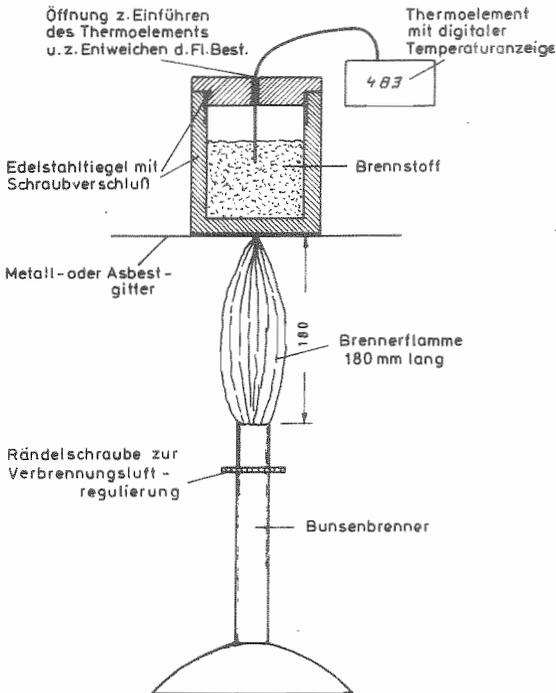


Abbildung 10: Versuchsanordnung zur Bestimmung flüchtiger Bestandteile

Ein Bunsenbrenner erwärmt einen verschraubbaren Probentiegel aus Edelstahl mit dem darin befindlichen Untersuchungsmaterial. Der Schraubdeckel des Tiegels ist mit einer Bohrung versehen, durch die ein Thermoelement zur Temperaturfeststellung eingeführt ist. Durch dieselbe Öffnung können auch die flüchtigen Bestandteile entweichen. Der durch das Freiwerden dieser Fraktion entstehende Überdruck im Tiegel verhindert, daß Luftsauerstoff eindringen kann, der eine Oxydation des Reinkokses zu CO bzw. CO₂ verursachen würde. Durch vorheriges Bestimmen des Feuchtegehaltes und Wiegen des Brennstoffes vor und nach der Erhitzung kann der Anteil der einzelnen Fraktionen nach folgenden Formeln ermittelt werden:

$$G_W = \frac{U \cdot G_G}{100} \text{ (g)} \quad \text{(XI)}$$

$$G_A = \frac{A \cdot G_G}{100} \text{ (g)} \quad \text{(XII)}$$

$$RK' = \frac{(G_{RA} - G_A) \cdot 100}{G_G} \text{ (v.H.)} \quad \text{(XIII)}$$

$$FB' = 100 - (U + A + RK') \text{ (v.H.)} \quad \text{(XIV)}$$

$$FB = \frac{FB' \cdot 100}{FB' + RK'} \text{ (v.H.)} \quad \text{(XV)}$$

$$RK = 100 - FB \text{ (v.H.)} \quad \text{(XVI)}$$

Hierin bedeuten:

G_W = Gewicht des in der Probe enthaltenen Wassers in g

U = Feuchtegehalt des Brennstoffes in v.H.

G_G = Gewicht der Gesamtprobe in g

G_A = Gewicht der in der Probe enthaltenen Asche in g

A = Aschegehalt in v.H.

RK' = Reinkoksgehalt in v.H. des lufttrockenen Brennstoffs

G_{RA} = Gewicht des Reinkokses und der Asche in g

FB' = Gehalt an flüchtigen Bestandteilen in v.H. des lufttrockenen Brennstoffs

FB = Gehalt an flüchtigen Bestandteilen in v.H. der brennbaren Substanz

RK = Gehalt an Reinkoks in v.H. der brennbaren Substanz

3.2.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

In den Vorversuchen zeigte sich, daß erst dann mit keiner weiteren Gewichtsabnahme der Probe zu rechnen war, wenn die Einwaage von 5 g auf 673 K erwärmt wurde und 30 min lang auf diesem Temperaturniveau gehalten wurde. In jedem Versuch konnte im Temperaturbereich von 523 K bis 643 K eine exotherme Reaktion beobachtet werden, die sich durch eine rasche Temperaturerhöhung von ca. 2 K/s auch bei unterbrochener Wärmezufuhr äußerte. Dies kann durch den Zerfall der freigesetzten flüchtigen Bestandteile in kürzere Kohlenwasserstoffketten erklärt werden. Ähnliche Beobachtungen machte auch PATZAK (27), der mit Hilfe der Thermogravimetrie und der Differentialthermoanalyse das Verhalten von Fichtenholz unter thermischer Belastung untersuchte.

Eine Reaktion der flüchtigen Bestandteile mit Luftsauerstoff kann als nicht gegeben betrachtet werden, da durch den bei der Erwärmung zuerst austretenden Wasserdampf die im Probenbehälter verbliebene Luft ausgetrieben wurde.

Im Hauptversuch wurden insgesamt 5 Wiederholungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 20 wiedergegeben sind. Zur Untersuchung kam Stroh der Sommerweizensorte Kolibri und der Hafersorte Flämingsnova.

In den 5 Wiederholungen wurde bei einem Variationskoeffizienten von 2,53 v.H. ein Mittelwert von 80,3 v.H. flüchtiger Bestandteile der brennbaren Substanz festgestellt, der für die weiteren Betrachtungen auf 80 v.H. gerundet wird. Zum Vergleich sind die Werte der anderen Festbrennstoffe nach GUMZ und HARDT (16) in Tabelle 21 aufgeführt.

Tabelle 20: Bestimmung der flüchtigen Bestandteile von Getreidestroh

Strohart	flüchtige Bestandteile in Gewichtsprozent		
	der lufttrockenen Substanz	der wasserfreien Substanz	der wasser- u. aschefreien Substanz
Sommerweizen:			
Kolibri	64,4	77,4	81,5
Kolibri	65,2	78,4	82,5
Kolibri	64,0	77,0	81,0
Hafer:			
Flämingsnova	67,9	75,4	79,4
Flämingsnova	66,1	73,4	77,3
\bar{x}	65,5	76,3	80,3
s	1,55	1,95	2,04
VK	2,37	2,56	2,53

Den niedrigsten Gehalt an flüchtigen Bestandteilen weisen Holzkohle mit 23,2 v.H. und Koks mit 3,8 - 10 v.H. auf (Tab. 21), da durch den Verkokungsprozeß diese Fraktion weitgehend aus ihnen ausgetrieben wurde. Die einzelnen Kohlenarten schwanken je nach dem Grad ihrer Alterung zwischen 7,7 und 63,8 v.H. Die Werte der jüngsten Brennstoffe Torf, Holz und Stroh liegen bei 70 v.H. und darüber, wobei Stroh mit 80,3 v.H. den weitaus höchsten Gehalt an flüchtigen Bestandteilen besitzt. Welche Anforderungen sich daraus für die Konstruktion von Strohfeuerungsanlagen ergeben, wird in Abschnitt 5 behandelt werden.

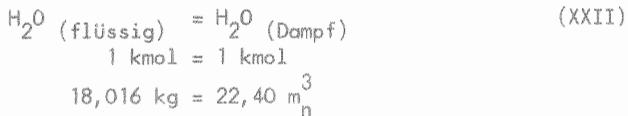
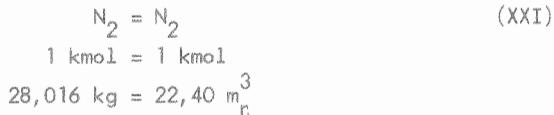
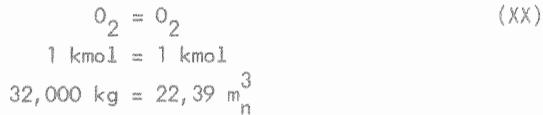
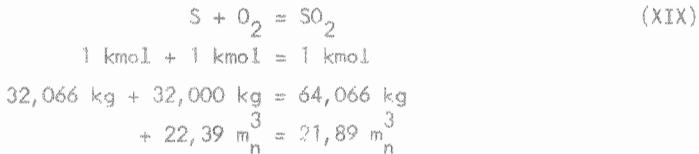
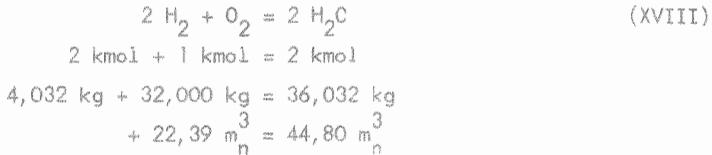
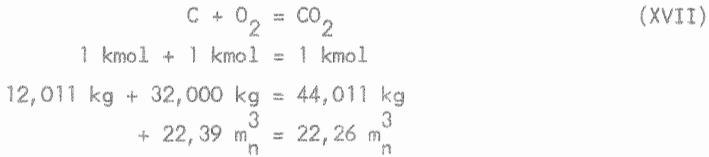
Tabelle 21: Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen verschiedener Festbrennstoffe

Brennstoff	flücht. Bestandteile Durchschnitt	in Gewichtsprozent Maximalwert	d.brennb.Subst. Minimalwert
Stroh	80,3	82,5	77,3
Holz	70	-	-
Holzkohle	23,2	-	-
Torf	70	-	-
Braunkohle	57,5	63,8	55,25
Steinkohle	26,3	39,4	7,7
Koks	3,8	10	0

3.3 Der spezifische Verbrennungsluftbedarf L

3.3.1 Methode

Zur richtigen Dosierung der Verbrennungsluftzufuhr in Feuerungsanlagen ist es notwendig zu wissen, wie hoch der spezifische Verbrennungsluftbedarf des Brennstoffs ist. Dieser errechnet sich aus der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs, der Luft und den Molvolumina der im Brennstoff enthaltenen Elemente. Zur Vereinfachung der Verbrennungsrechnung werden zwar in der Literatur Berechnungsverfahren vorgeschlagen, die auf dem empirisch festgestellten Zusammenhang zwischen Heizwert und chemischer Zusammensetzung verschiedener Kohlearten beruhen (5 ; 6), eine versuchsweise durchgeführte Berechnung ergab jedoch, daß die diesem Verfahren zugrundegelegten Vereinfachungen mit der chemischen Zusammensetzung von Stroh nicht vereinbar sind, weshalb auf das ausführliche Berechnungsverfahren von GUMZ und HARDT zurückgegriffen wurde (16). Dieser Methode liegen folgende Gleichungen zugrunde:



Aus den Gleichungen (XVII) - (XXII) errechnet sich der minimale Sauerstoffbedarf O_{\min} nach Formel XXII:

$$\begin{aligned} O_{\min} &= \frac{22,39}{12,011} \cdot c + \frac{22,39}{32,066} \cdot s + \frac{22,39}{4,032} \cdot h - \frac{22,39}{32} \cdot o && \text{(XXIII)} \\ &= 1,864 \cdot c + 0,6982 \cdot s + 5,5531 \cdot h - 0,6997 \cdot o \end{aligned}$$

Die Kleinbuchstaben bedeuten hierin die Prozentgehalte/100 der Elemente im lufttrockenen Brennstoff. Diese Werte aus Tabelle 18 entnommen, ergeben für Getreidestroh einen durchschnittlichen Sauerstoffbedarf O_{\min} von

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 1,864 \cdot 0,424 + 0,6982 \cdot 0,001 + 5,5531 \cdot 0,05 - 0,6997 \cdot 0,338 \\ &= \underline{0,832 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \text{ lufttrockenen Brennstoff mit } 14 \text{ v.H. Feuchtegehalt.} \end{aligned}$$

Bei einem Sauerstoffgehalt der Luft von 21 Vol.-v.H. errechnet sich daraus ein spezifischer Verbrennungsluftbedarf bei stöchiometrischer Verbrennung von

$$L_{\min} = \frac{0,832 \cdot 100}{21} = 3,96 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Unter diesem Wert ist nur die trockene Luft verstanden.

Der mit den Witterungsbedingungen schwankende Wasserdampfgehalt der Luft muß jedoch ebenfalls mit berücksichtigt werden. Für den folgenden Vergleich der einzelnen Brennstoffe wird dieser Wert mit Formel XXIV für Luft mit 80 % relativer Luftfeuchte, 20° C und normalem Luftdruck errechnet, woraus sich ein Wasserdampfballast W_L in $\frac{\text{m}^3}{\text{m}_n^3}$ trockene Luft von

$$W_L = 0,8 \cdot 0,01898 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}_n^3}\right) \cdot 1,243 \left(\frac{\text{m}_n^3}{\text{kg}}\right) = 0,0189 \frac{\text{m}_n^3}{\text{m}_{\text{nt}}^3} \quad (\text{XXIV})$$

ergibt.

0,8 = rel. Luftfeuchte (80 %)

0,01898 = Wasserdampfgehalt gesättigter Luft mit 20° C

1,243 = spezifisches Volumen von Wasserdampf

Der spezifische Verbrennungsluftbedarf bei stöchiometrischer Verbrennung erhöht sich in obigem Beispiel dadurch auf

$$L_{\text{minf}} = 3,96 + 3,96 \cdot 0,0189 = 4,04 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

3.3.2 Ergebnisse

Mit der in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Methode wurde der spezifische Verbrennungsluftbedarf verschiedener Festbrennstoffe bei stöchiometrischer Verbrennung ermittelt und in Tabelle 22 aufgeführt. Die der Berechnung zugrundeliegenden Werte sind den Anhangstabellen 14.1 bis 14.3 entnommen.

Tabelle 22: Durchschnittlicher spezifischer Verbrennungsluftbedarf L verschiedener Festbrennstoffe bei stöchiometrischer Verbrennung

Brennstoff	spezifischer Verbrennungsluftbedarf L_{min} in m_n^3/kg		
	der Rohsubstanz	der wasserfreien Substanz	der wasser- und aschefreien Substanz
Getreidestroh	4,04	4,69	4,94
Holz	4,02	4,73	4,75
Holzkohle	7,77	8,10	8,15
Torf	3,48	5,16	5,32
Braunkohle	4,72	6,30	6,99
Steinkohle	7,78	8,19	8,81
Koks	7,72	8,13	9,04

Die Unterschiede im spezifischen Verbrennungsluftbedarf der wasser- und aschefreien Substanzen erklären sich ausschließlich aus der verschiedenen chemischen Zusammensetzung der einzelnen Brennstoffe. So liegt der Verbrennungsluftbedarf umso höher, je niedriger der O-Gehalt und je höher der C-, H- und S-Gehalt des Brennstoffs ist. Der

Wert von Getreidestroh liegt mit $4,94 \text{ m}_n^3/\text{kg}$ ähnlich hoch wie der Verbrennungsluftbedarf von Holz oder Torf, während die hochwertigen Brennstoffe Holzkohle, Steinkohle und Koks einen fast doppelt so hohen spezifischen Verbrennungsluftbedarf erreichen können.

Die auf die wasserfreie Substanz bezogenen Werte hängen auch vom Aschegehalt ab und sinken mit zunehmendem Ascheanteil des Brennstoffs. Kohlen mit sehr hohem Aschegehalt und niedrigem C-Gehalt wie z.B. einige Braunkohlen können dabei noch erheblich unter die in Tabelle 22 angegebenen Werte absinken.

Der für die praktische Anwendung wichtigste Wert ist der spezifische Verbrennungsluftbedarf der Rohsubstanz. Auch hier liegt Stroh mit einem Durchschnittswert von $4,04 \text{ m}_n^3/\text{kg}$ in einem ähnlichen Bereich wie Holz und Torf und damit um fast die Hälfte niedriger als Koks, Holzkohle und Steinkohle.

Um die notwendige Verbrennungsluftmenge bei einer bestimmten Feuerungsleistung zu ermitteln, muß der spezifische Verbrennungsluftbedarf mit dem Heizwert des Brennstoffs in Beziehung gesetzt werden. So errechnet sich der stündliche Verbrennungsluftbedarf L' einer Feuerungsanlage bei stöchiometrischer Verbrennung nach Formel XXV:

$$L' = \frac{L_{\min} \cdot N}{H_u(\text{lftr})} \quad (\text{m}_n^3/\text{h}) \quad (\text{XXV})$$

N bedeutet hierin die bei der Verbrennung stündlich freigesetzte Wärmemenge in kJ/h .

In Tabelle 23 ist der stündliche Verbrennungsluftbedarf L' für verschiedene Feuerungsleistungen aus den Werten der Tabellen 16 und 22 errechnet.

Dadurch, daß Brennstoffe mit niedrigem spezifischen Verbrennungsluftbedarf auch einen geringeren Heizwert aufweisen, liegen die Werte für den leistungsbezogenen Verbrennungsluftbedarf L' aller Brennstoffe in einem relativ engen Bereich. So schwankt der Verbrennungsluftbedarf

Tabelle 23: Stündlicher Verbrennungsluftbedarf L' bei stöchiometrischer Verbrennung für verschiedene Feuerungsanlagen

Brennstoff	Verbrennungsluftbedarf L' in m_n^3/h bei Feuerungsleistungen von		
	160.000 kJ/h (1-Familienhaus-Heizung)	400.000 kJ/h (Getreidetrocknung 1 t/h)	2.700.000 kJ/h (Körnermaistrocknung 1 t/h)
Stroh	45,4	113,5	766
Holz	42,0	105,0	709
Holzkohle	41,3	103,3	697
Torf	41,2	103,1	696
Braunkohle	55,5	138,8	937
Steinkohle	42,2	105,5	712
Koks	47,7	119,2	805

bei stöchiometrischer Verbrennung für eine Wohnhausheizung mit einer Feuerungsleistung von 160.000 kJ/h nur mehr zwischen 41,2 und 55,5 m_n^3/h , wobei Getreidestroh mit 45,4 m_n^3/h eine Mittelstellung einnimmt. Wird eine Getreidetrocknung mit einer Trocknungsleistung von 1 t/h Trockengut unterstellt, so beträgt der Verbrennungsluftbedarf je nach Brennstoff zwischen 103,1 und 138,8 m_n^3/h , während eine Körnermaistrocknung mit 1 t/h Trockengut einen Verbrennungsluftbedarf von 695 - 937 m_n^3/h aufweist.

Aufgrund der Mittelstellung, die Stroh hinsichtlich des leistungsbezogenen Verbrennungsluftbedarfes einnimmt, kann davon ausgegangen werden, daß bei der Konstruktion einer Strohfederungsanlage die Dimensionierung der Verbrennungsluftzuführung in einem ähnlichen Rahmen gehalten werden kann, wie dies bei anderen Festbrennstoffen der Fall ist.

3.4 Das spezifische Rauchgasvolumen V_f

3.4.1 Methode

Soll eine Feuerungsanlage mit einem hohen Wirkungsgrad arbeiten, so müssen unter anderem die Wärmetauschflächen der geforderten Wärmeleistung möglichst genau angepaßt sein. So haben zu klein bemessene Wärmetauscher hohe Rauchgasverluste zur Folge, während eine zu starke Rauchgasabkühlung Korrosionsschäden an der Feuerungsanlage hervorrufen kann (16). Zur richtigen Dimensionierung eines Wärmetauschers ist neben anderen, nicht ausschließlich brennstoffabhängigen Kenngrößen wie Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur der Rauchgase und des wärmeaufnehmenden Mediums jedoch auch das spezifische Rauchgasvolumen von Bedeutung. Dieser Wert übt auch einen Einfluß auf die Schornsteinabmessungen aus. Weiterhin kann aus dem spezifischen Rauchgasvolumen der maximale CO_2 -Gehalt des Rauchgases ermittelt werden. Dieser Wert ist bei der Überwachung einer Feuerungsanlage zur Feststellung des Luftüberschusses und damit des Wirkungsgrades, mit der die Anlage gefahren wird, notwendig.

Das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas setzt sich aus den Verbrennungsprodukten und den an der Verbrennung nicht beteiligten Bestandteilen der Luft und des Brennstoffs - Stickstoffgehalt und Wasserballast der Luft sowie Feuchtegehalt des Brennstoffs - zusammen. Aus den Gleichungen (XVII) bis (XXII) ergibt sich dann bei stöchiometrischer Verbrennung ein nach Formel (XXVI) zu ermittelndes spezifisches Rauchgasvolumen V_f :

$$\begin{aligned} V_f &= \frac{22,26}{12,011} \cdot c + \frac{21,89}{12,011} \cdot s + \frac{44,8}{4,032} \cdot h + \frac{22,4}{28,016} \cdot n + 0,79 \cdot L_{\min} \quad (\text{XXVI}) \\ &\quad + L_{\min} \cdot W_L + \frac{22,4}{18,016} \cdot u \\ &= 1,8533 \cdot c + 0,6827 \cdot s + 11,111 \cdot h + 0,7995 \cdot n + 0,79 \cdot L_{\min} \\ &\quad + 1,243 \cdot u \quad (\text{m}_n^3/\text{kg}) \end{aligned}$$

u bedeutet hierin (Formel XXVI) den Feuchtegehalt des Brennstoffs in v.H./100

Durch Umformung von Gleichung (XXVI) in Formel (XXVII) errechnet sich der maximal mögliche CO_2 -Gehalt des Rauchgases

$$\text{CO}_2(\text{max}) = \frac{1,8533 \cdot c \cdot 100}{V_f} \quad (\text{Vol.- v.H.}) \quad (\text{XXVII})$$

Da die Verbrennung unter praktischen Bedingungen nie mit stöchiometrischen Verhältnissen stattfindet, sondern immer ein gewisser Luftüberschuß vorhanden ist, muß Formel (XXVI) in Formel (XXVIII) erweitert werden:

$$\begin{aligned} V_f = & 1,8533 \cdot c + 0,6827 \cdot s + 11,111 \cdot h + 0,7995 \cdot n \quad (\text{XXVIII}) \\ & + (\lambda - 1) \cdot 0,21 \cdot L_{\text{min}} + \lambda \cdot 0,79 \cdot L_{\text{min}} + \\ & \lambda \cdot L_{\text{min}} \cdot W_L + 1,243 \cdot u \end{aligned}$$

Die Luftüberschußzahl λ ist das Vielfache des Luftbedarfs zur stöchiometrischen Verbrennung.

3.4.2 Ergebnisse

Nach den Formeln (XXVI), (XXVII) und (XXVIII) wurde für verschiedene Festbrennstoffe das spezifische Rauchgasvolumen V_f und der maximale CO_2 -Gehalt im Rauchgas aus den Werten der Anhangstabellen 14.1 bis 14.3 und der Tabelle 22 errechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Genauso wie beim spezifischen Verbrennungsluftbedarf besitzen die Brennstoffe mit einem hohen Heizwert auch ein wesentlich höheres spezifisches Rauchgasvolumen als minderwertige Brennstoffe. So haben Koks, Steinkohle und Holzkönle mit Werten von $7,83 \text{ m}_n^3/\text{kg}$ bis $8,06 \text{ m}_n^3/\text{kg}$ bezogen auf Rohsubstanz bei stöchiometrischer Verbrennung fast das doppelte spezifische Rauchgasvolumen wie Torf, Holz und Getreidestroh mit $4,26 - 4,73 \text{ m}_n^3/\text{kg}$.

Tabelle 24: Spezifisches Rauchgasvolumen V_f verschiedener Festbrennstoffe und maximaler CO_2 -Gehalt des Rauchgases

Brennstoff	Rauchgasvolumen V_f der Rohsubstanz in $\frac{\text{m}^3}{\text{n}}/\text{kg}$ bei unterschiedlicher Luftüberschusszahl			$\text{CO}_2(\text{max})$ in Vol.- v.H. bezogen auf Rohsubstanz
	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 4$	
Getreidestroh	4,70	8,88	17,10	16,72
Holz	4,73	8,91	17,10	16,71
Holzkohle	8,06	16,13	31,96	18,30
Torf	4,26	7,87	14,96	15,81
Braunkohle	5,31	10,25	19,82	16,49
Steinkohle	7,99	16,06	31,92	18,45
Koks	7,83	15,84	31,57	19,33

Auch im maximalen CO_2 -Gehalt des Rauchgases ergeben sich beträchtliche Unterschiede. So liegt diese Kenngröße für Torf mit 15,81 v.H. extrem niedrig, während Koks mit 19,33 v.H. den Höchstwert erreicht. Stroh besitzt mit 16,72 v.H. fast genau denselben Wert wie Holz mit 16,71 v.H.. Für die praktische Anwendung ergibt sich daraus, daß eine strohbeheizte Feuerungsanlage mit 16 v.H. CO_2 im Rauchgas bereits im Bereich der stöchiometrischen Verbrennung arbeitet und somit die Gefahr von unvollständiger Verbrennung gegeben ist. Eine Koksfeuerung mit ebenfalls 16 v.H. CO_2 im Rauchgas hingegen fährt noch mit Luftüberschuß.

Neben dem spezifischen Rauchgasvolumen bei stöchiometrischer Verbrennung ist in Tabelle 24 diese Kenngröße auch für verschiedene Luftüberschusszahlen λ aufgeführt. Eine Luftüberschusszahl von $\lambda = 2$ entspricht einem Wert, wie er häufig auch in der Praxis an handbedienten Feuerungsanlagen vorzufinden ist, während $\lambda = 4$ bei Anlagen mit sehr schlechtem Wirkungsgrad auftreten kann. Es zeigt sich, daß bei allen Brennstoffen eine Verdoppelung von λ auch eine annähernde Verdoppelung des spezifischen Rauchgasvolumens zur Folge hat, wodurch

die Rauchgasverluste stark ansteigen.

Zur Ermittlung des leistungsbezogenen Rauchgasvolumens V_f' müssen die Werte der Tabelle 24 mit den Heizwerten der Tabelle 16 nach Formel (XXIX) in Beziehung gebracht werden.

$$V_f' = \frac{V_f \cdot N}{H_u(lftr)} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{XXIX})$$

N bedeutet hierin die Feuerungsleistung in kJ/h.

In Tabelle 25 ist das leistungsbezogene Rauchgasvolumen für eine unterstellte Feuerungsleistung von 400.000 kJ/h für verschiedene Luftüberschußzahlen aufgeführt. Diese Feuerungsleistung entspricht dem Wärmebedarf einer Getreidetrocknungsanlage mit einer Trocknerleistung von 1 t/h.

Tabelle 25: Stündliches Rauchgasvolumen V_f' verschiedener Festbrennstoffe bei einer Feuerungsleistung von 400.000 kJ/h

Brennstoff	stündliches Rauchgasvolumen V_f' in m_n^3/h		
	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 4$
Getreidestroh	132,4	250,1	481,7
Holz	123,7	232,9	447,1
Holzkohle	107,1	214,4	424,7
Torf	126,2	233,2	443,3
Braunkohle	156,2	301,5	582,9
Steinkohle	108,3	217,8	432,8
Koks	120,9	244,6	487,6

Während die verschiedenen Brennstoffe im spezifischen Rauchgasvolumen noch sehr große Unterschiede aufweisen, gleichen sich die Werte im leistungsbezogenen Rauchgasvolumen V_f' teilweise aus. So erreicht bei der unterstellten Feuerungsleistung von 400.000 kJ/h und bei

stöchiometrischer Verbrennung Holzkohle mit $107,1 \text{ m}_n^3/\text{h}$ das geringste und Braunkohle mit $156,2 \text{ m}_n^3/\text{h}$ das höchste stündliche Rauchgasvolumen. Getreidestroh besitzt mit $132,4 \text{ m}_n^3/\text{h}$ ein nur unwesentlich höheres leistungsbezogenes Rauchgasvolumen als die Brennstoffe Koks, Torf und Holz und nimmt damit eine Mittelstellung unter den Brennstoffen ein. Bei erhöhtem Luftüberschuß von beispielsweise $\lambda = 4$ verringern sich die Unterschiede etwas, da in diesem Fall die Rauchgase zum Überwiegenden Teil aus Überschußluft und nicht aus Verbrennungsprodukten bestehen.

Anhand dieser Werte kann davon ausgegangen werden, daß die Schornsteinabmessungen einer Strohfederungsanlage bei gleicher Leistung den Abmessungen einer Holzfeuerungsanlage entsprechen müssen, jedoch wesentlich kleiner gehalten werden können als bei Braunkohlenfeuerungen.

4. GESETZLICHE VORSCHRIFTEN FÜR DEN BAU UND DEN BETRIEB VON FEUERUNGSANLAGEN

Neben den in den Abschnitten 2 und 3 dargestellten brennstoffspezifischen Kenngrößen müssen für die Konstruktion und den Betrieb von Feuerungsanlagen auch einschlägige gesetzliche Vorschriften beachtet werden, die an dieser Stelle dargestellt werden, soweit die Verwendung von Stroh als Brennstoff nach Rücksprache mit dem Technischen Überwachungsverein München in ihren Geltungsbereich fällt.

4.1 Mindestabbranddauer

Während die Brennstoffbeschickung bei ölbeheizten Wärmeerzeugern selbst in Kleinanlagen mit wirtschaftlich tragbarem Aufwand automatisierbar ist, werden feste Brennstoffe mit Ausnahme von Großanlagen im allgemeinen immer noch von Hand beschickt. Um den Bedienungsaufwand jedoch möglichst niedrig zu halten, besteht in DIN 4702 (11) die Vorschrift, daß das Fassungsvermögen des Brennraumes so groß sein muß, daß die Anlage mindestens 4,5 h bei Nennleistung betrieben werden kann, ohne Brennstoff nachlegen zu müssen. Da Getreidestroh in Ballenform mit ca. 100 kg/m^3 Raumgewicht ein sehr voluminöser Bestandteil ist, muß der Brennraum entsprechend groß dimensioniert sein, um diese Forderung zu erfüllen. Das genaue Mindestvolumen V_{\min} des Brennraumes läßt sich nach Formel (XXX) ermitteln:

$$V_{\min} = \frac{t \cdot N_L}{\eta \cdot H_U \cdot G_{\text{spez}}} \quad (\text{m}^3) \quad (\text{XXX})$$

Hierin bedeuten:

- t = Abbranddauer in h
- N_L = Nennleistung in kJ/h
- η = Wirkungsgrad in %/100
- H_U = Heizwert in kJ/kg
- G_{spez} = spezifisches Gewicht in kg/m^3

4.2 Regelbarkeit und höchst zulässige Schwachlastleistung

Absätzig beschickte Feststoffheizkessel besitzen gegenüber ölbefeuerten Anlagen den Nachteil, daß sie nicht einfach wieder abgestellt werden können, wenn ihr Brennstoffvorrat einmal in Brand gekommen ist. Um jedoch ein Mindestmaß an Elastizität in der Leistungsabgabe zu gewährleisten, ist in DIN 4702 eine höchstzulässige Schwachlastleistung vorgeschrieben, auf die eine Feuerungsanlage herabgedrosselt werden kann. Diese Leistung darf bei Kleinanlagen mit einer Nennleistung von 42 000 kJ/h 25 v.H. und bei Großanlagen mit 2 500 MJ/h 15 v.H. der Nennleistung nicht überschreiten.

Weiterhin muß nach DIN 4751 (12) sichergestellt sein, daß bei einem plötzlichen Wegfall sämtlicher Wärmeabnehmer die Wassertemperatur im Heizkessel nicht über 115° C steigt.

Feststoffheizkessel weisen im allgemeinen aber ein so träges Regelverhalten auf, daß eine Erfüllung dieser Forderung durch eine Drosselung der Leistung über die Luftzufuhr nicht möglich ist. Um dieser Norm aber trotzdem gerecht zu werden, müssen Feststoffheizkessel deshalb mit einem Brauchwassererwärmer mit thermischer Ablaufsicherung versehen sein. Diese wird von der Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers gesteuert und öffnet spätestens bei Erreichen einer Vorlauftemperatur von 100° C den Wasserablauf am Brauchwassererwärmer, so daß das Wasser gefahrlos abgeleitet werden kann und eine weitere Temperatursteigerung im Wärmeerzeuger verhindert wird.

4.3 Der Wirkungsgrad

Bei der Verbrennung eines Brennstoffs in einem Wärmeerzeuger kann nicht die gesamte im Brennstoff enthaltene Energie in Nutzwärme umgewandelt werden, da immer an einigen Stellen Verlustquellen auftreten können. Diese Verluste können aufgeteilt werden in

- Verluste durch Abstrahlung und Konvektion an den Oberflächen des Wärmeerzeugers
- Verluste durch unvollständige Verbrennung
- Verluste durch die Enthalpie der Rauchgase

Die Summe dieser Verluste muß so gering sein, daß nach DIN 4702 bei Nennleistung ein Mindestwirkungsgrad von 70 - 78 v.H. je nach Größe der Anlage erreicht wird. Um diesen Wert zu erreichen, müssen Wärmeerzeuger so konstruiert sein, daß

- durch ausreichende Isolierung, die Abstrahlungsverluste möglichst gering sind
- ein vollständiger Ausbrand mit möglichst wenig Luftüberschuß gewährleistet ist
- und die Rauchgase an den Heizflächen soweit abgekühlt sind, daß am Schornsteinaustritt der Rauchgastaupunkt gerade noch überschritten wird.

4.4 Vorschriften zur Reinhaltung der Luft

Neben den Vorschriften zur Gewährleistung der Betriebssicherheit bestehen vom Gesetzgeber noch weitere Auflagen, die eine mögliche Umweltbelastung durch Feuerungsanlagen weitgehend verhindern sollen. Da Feststoffheizkessel vor allem in der Anfahrphase zu unvollständiger Verbrennung und damit zur Emission unverbrannter Bestandteile durch das Rauchgas neigen, sind in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (13) die zulässigen Höchstmengen an Staub, Ruß und Teer im Rauchgas während der Anfahrphase für holzbefeuerte Anlagen auf 300 mg/m_n^3 festgesetzt worden. Nach Rücksprache mit dem Technischen Überwachungsverein ist die Vorschrift auch für strohbefeuerte Anlagen mit einer Leistung von mehr als 80 000 kJ/h gültig.

5. AUS DEN VERBRENNUNGSTECHNISCHEN KENNGRÖßEN UND DEN GESETZLICHEN VORSCHRIFTEN ABGELEITETE ANFORDERUNGEN AN STROHFUERUNGSANLAGEN

Aufgrund der in den Abschnitten 2 und 3 aufgeführten verbrennungstechnischen Kenngrößen und den einschlägigen Vorschriften aus Abschnitt 4, werden nun die speziellen Anforderungen von Stroh an Feuerungsanlagen dargestellt.

Soll mit Getreidestroh beispielsweise ein Einfamilienhaus beheizt werden, so ist dafür ein Heizkessel mit einer Nennleistung von ca. 160 000 kJ/h erforderlich (26). Für eine Feuerungsanlage dieser Größenordnung ergibt sich nach DIN 4702 ein Mindestwirkungsgrad von 73 v.H. und eine Mindestbrenndauer bei Nennleistung von 4,5 h. Wird diese Anlage mit Hochdruckballen mit einem Raumgewicht von 100 kg/m^3 beschickt, so ergibt sich daraus bei einem Heizwert von $H_U = 14\,200 \text{ kJ/kg}$ nach Formel (XXX) ein Mindestbrennraumvolumen von $V_{\min} = 0,69 \text{ m}^3$.

Da Hochdruckballen üblicherweise unterschiedliche Ausmaße besitzen, ergeben sich bei der Befüllung eines Brennraumes immer einige Hohlräume, die nicht ausgefüllt werden können. Um dennoch den erforderlichen Brennstoff von 69 kg unterbringen zu können, muß für dieses Beispiel ein Brennraumvolumen von $0,8 \text{ m}^3$ unterstellt werden. Im Vergleich dazu besitzen herkömmliche, nach DIN 4702 geprüfte Kohleheizkessel derselben Leistung ein Brennraumvolumen von nur $0,17 \text{ m}^3$ (38).

Bei der Ausbildung des Brennraumes muß bedacht werden, daß Stroh einen sehr hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen von 80 % der brennbaren Substanz besitzt. Ist nun der Brennraum eines Wärmeerzeugers mit 160 000 kJ/h Leistung als Durchbrandkessel konstruiert, so hat dies zur Folge, daß der gesamte Brennstoff gleichzeitig in Glut gerät. Von den oben angegebenen 69 kg würden dann in kürzester Zeit 44 kg als flüchtige Bestandteile freigesetzt werden, wodurch eine vollständige Verbrennung nicht mehr gewährleistet wäre. Handbeschickte Strohfuerungsanlagen müssen deshalb als Unterbrandanlagen ausgeführt sein, so daß die Verbrennungsluft nur im unteren Bereich des Brenn-

raumes an den Brennstoff gelangen kann.

Um einen vollständigen Ausbrand der Schwelgase zu erreichen, muß außerdem noch eine Nachverbrennungszone nachgeschaltet werden. Dieser Nachverbrennungsraum dient dazu, daß in ihm unter Zufuhr von Sekundärverbrennungsluft die Schwelgase vollständig verbrennen. Da die Zündtemperatur dieser Gase nach ORTH (24) bei ca. 500°C liegt, erhebt sich die Forderung, daß die Nachbrennkammer möglichst schnell nach dem Anzünden des Brennstoffs durch die Wärmeentwicklung im unteren Teil des eigentlichen Brennraumes (Primärverbrennungszone) auf dieses Temperaturniveau gebracht wird. Um dies zu erreichen, müssen Primär- und Sekundärverbrennungszone möglichst nah beieinander liegen und der Nachverbrennungsraum eine geringe Wärmekapazität besitzen, so daß ein rasches Aufheizen gewährleistet ist. Da die Zufuhr von Sekundärluft vor der Zündung eine Abkühlung der Nachverbrennungszone zur Folge hätte, müssen Primär- und Sekundärluftzuführung voneinander unabhängig dosierbar sein.

Der praktische Betrieb gestaltet sich dann so, daß zum Anfahren der Anlage die Primärluftzufuhr ganz geöffnet ist, um innerhalb von 3 Minuten (nach der technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft zugelassene Zeitspanne, in der nach dem Anzünden der Höchstwert von 300 mg/m^3 an Staub, Ruß und Teer überschritten werden darf) durch die mit der Primärverbrennung erzeugte Wärme die Nachverbrennungskammer auf Zündtemperatur aufzuheizen. Zur Zündung der Nachverbrennung muß dann die Sekundärluftzufuhr geöffnet werden. Im Dauerbetrieb danach erfolgt die Leistungsregelung über die Dosierung der Primärluftzufuhr, die nach dem Zünden der Nachverbrennung gedrosselt werden muß, um eine Überproduktion an Schwelgasen zu verhindern.

Bei einer absätzig beschickten Feuerungsanlage ist außerdem die Forderung der DIN 4751 nach schneller Regelbarkeit zu erfüllen. Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, kann dieser Forderung am einfachsten mit dem Einbau eines Brauchwassererhitzers mit thermischer Ablaufsicherung

nachgekommen werden. Dadurch wird bei Überschreiten einer Höchsttemperatur von 100° C am Kesselvorlauf durch Öffnen eine Sicherheitsventils dem Brauchwassererhitzers Heißwasser entnommen und Frischwasser eingespeist, wodurch der gesamte Heizkessel abgekühlt wird.

Während des Nachfüllens von Stroh kann in den Brennraum durch die geöffnete Beschickungstüre Falschlufft eindringen. Dies kann zur Folge haben, daß die Verbrennung nicht mehr nach dem Unterbrandprinzip erfolgt, sondern der gesamte Brennstoff gleichzeitig anbrennt. Um dies zu verhindern, ist es zweckmäßig, die Beschickung über eine Schleuse zu ermöglichen. Darüberhinaus wird der Betreiber der Anlage dadurch gegen ein Herausschlagen der Flammen beim Nachheizen geschützt.

Für eine vollständige Verbrennung müssen in der Nachverbrennungskammer möglichst hohe Temperaturen herrschen, so daß eine Zündung der Schwelgase gewährleistet ist. Diese Brennkammer muß deshalb gegen eine Abkühlung isoliert sein, und der Wärmeaustausch darf nicht über die Brennkammerwände erfolgen. Der Wärmeinhalt der Rauchgase darf also erst dann an das wärmeübertragende Medium (Wasser oder Luft) abgegeben werden, wenn die Verbrennung vollständig abgeschlossen ist. Dies gelingt, wenn der Wärmetauscher hinter der Nachverbrennungszone angeordnet ist.

Da Getreidestroh in seinem Heizwert, seinem Anteil an flüchtigen Bestandteilen und seiner chemischen Zusammensetzung dem Brennstoff Holz sehr ähnlich ist, bietet es sich an, für große Leistungen Stroh in kurz gehäckselter Form in Einblasefeuerungen zu verwenden, wie sie für Sägeabfälle der Holzindustrie von mehreren Firmen seit langem angeboten werden (20;32). Derartige Anlagen werden für Leistungen über 400 000 kJ/h gebaut, und besitzen den Vorteil, daß die Beschickung automatisch über ein Gebläse erfolgt, und die Leistungsregelung über den Brennstoffnachschub möglich ist. Die kritische Anfahrphase wird dadurch überbrückt, daß der Brennraum von einem ölbeheizten Stützfeuer vorgewärmt wird.

Abschließend kann gesagt werden, daß Strohfeuerungsanlagen im Gegensatz zu kohle- oder koksbeheizten Wärmeerzeugern den Umständen Rechnung tragen müssen, daß Stroh einen wesentlich höheren Gehalt an flüchtigen Bestandteilen aufweist, ein geringeres Raumgewicht besitzt, und die Verfeuerung von Ballenstroh große Einfüllöffnungen erfordert. Andere feuerungstechnische Kenngrößen wie der leistungsbezogene Verbrennungsluftbedarf, das leistungsbezogene Rauchgasvolumen und der Aschegehalt liegen jedoch im selben Bereich wie die Werte anderer Festbrennstoffe, so daß sich hieraus keine speziellen Anforderungen an Strohfeuerungsanlagen ergeben.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Der zunehmende Strohertrag und die geänderten Produktionsmethoden in den letzten Jahren führten dazu, daß Getreidestroh besonders in viehlosen Betrieben und bei getreidestarken Fruchtfolgen zum lästigen Abfallprodukt wurde, das nicht mehr sinnvoll verwertet werden kann. Nach HERZOG (17) ist derzeit mit einer jährlichen Überschußstrohmenge von 5 - 6 Mio t zu rechnen, die teilweise, ohne weiteren Nutzen zu bringen, auf dem Feld in umweltbelastender Form verbrannt wird. Andererseits werden von den landwirtschaftlichen Betrieben der Bundesrepublik Deutschland jährlich fast 3 Mrd. DM für die Energiebereitstellung in Form von Strom, Brennstoffen und Kraftstoffen ausgegeben. Diese großen Mengen an zur Verfügung stehendem Getreidestroh einerseits und der Wunsch, fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle durch regenerative Energiequellen so weit als möglich zu ersetzen, waren der Anlaß, daß in den letzten Jahren versucht wurde, Stroh als Energieträger zu nutzen.

Diese Bemühungen hatten zur Folge, daß Anfang der 70er Jahre erste Strohheizkessel auf den Markt kamen. Eine Überprüfung dieser Anlagen ergab jedoch, daß der Bedienungskomfort - eingeschränkt durch häufiges Nachheizen - noch nicht den Anforderungen der Praxis entsprach, und daß die gesetzlichen Vorschriften zur Reinhaltung der Luft durch zu hohe Rauchgasverschmutzung nicht eingehalten werden konnten.

Die Ursache hierfür lag nicht zuletzt darin, daß über die verbrennungstechnischen Eigenschaften von Getreidestroh noch wenig Klarheit herrschte, und deshalb auf die speziellen Anforderungen von Stroh an Feuerungsanlagen bei der Konstruktion dieser ersten Heizkessel noch nicht eingegangen werden konnte. Auch waren in der Literatur nur wenige Hinweise über Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Stroh zu finden.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, die verbrennungstechnischen Eigenschaften von Getreidestroh in eingehenden Untersuchungen zu ermitteln,

den Einfluß verschiedener Faktoren auf diese Kenngrößen festzustellen, die ermittelten Werte mit denen herkömmlicher Festbrennstoffe zu vergleichen und die speziellen Anforderungen an Strohefeuerungsanlagen zu erarbeiten.

Insgesamt 361 Heizwertbestimmungen ergaben, daß Getreidestroh mit einem Feuchtegehalt von 14 v.H. im Durchschnitt einen Heizwert von $H_u = 14\ 200$ kJ/kg aufweist und damit in einem ähnlichen Bereich wie Holz, Torf und verschiedene Braunkohlen liegt. Die 1976 durchgeführten Untersuchungen zeigten, daß die durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ der einzelnen Getreidearten signifikant voneinander verschieden waren. So lag der Wert für Wintergerste bei 16 157 kJ/kg, für Sommergerste bei 17 460 kJ/kg, Winterweizen bei 17 157 kJ/kg, Sommerweizen bei 17 108 kJ/kg, Winterroggen bei 17.710 kJ/kg und Hafer bei 16 654 kJ/kg. Ein eindeutiger Einfluß der Düngung konnte nicht nachgewiesen werden. Ebenso war eine Auswirkung der Aufwuchsstandorte nicht eindeutig festzustellen. Für verschiedene Witterungsfaktoren konnte eine Regressionsgleichung aufgestellt werden, mit der der Heizwert mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,776$ berechnet werden kann. Da jedoch Heizwert und Witterung nur über zwei Jahre hinweg beobachtet wurden, kommt dieser Feststellung nur ein beschränkter Auswertungswert zu. Trotz extrem unterschiedlicher Witterung 1976 und 1977 wiesen die Heizwerte gleicher Sorten auf dem selben Standort nur geringe Unterschiede auf, so daß auf weitere Untersuchungen in dieser Richtung verzichtet werden konnte.

Eine Einflußnahme mikrobiellen Abbaus auf den Heizwert konnte eindeutig nachgewiesen werden. Stark verschimmelter Stroh hatte bezogen auf wasserfreie Substanz nurmehr 95 v.H. des Heizwertes der unveränderten Probe.

Als weitaus bedeutendster Einflußfaktor auf den Heizwert wurde der Feuchtegehalt des Strohs festgestellt. So hat eine Zunahme des Feuchtegehaltes von 15 auf 25 v.H. eine Abnahme des Heizwertes der Rohsubstanz $H_{u(roh)}$ um 14,3 v.H. zur Folge.

Elementaranalysen - durchgeführt vom Mikroanalytischen Laboratorium PASCHER in Bonn - ergaben, daß Stroh mit durchschnittlich 41,4 v.H. Sauerstoff der wasser- und aschefreien Substanz ähnlich wie Holz und Torf ein sehr sauerstoffreicher Brennstoff ist und sich damit von den anderen Festbrennstoffen Holzkohle, Braunkohle, Steinkohle und Koks erheblich unterscheidet, deren Sauerstoffgehalte nur zwischen 0 und maximal 26 v.H. liegen. Der niedrige Schwefelgehalt von nur 0,1 v.H. und der geringe Aschegehalt von durchschnittlich 5 v.H. lassen Stroh im Vergleich zu anderen Brennstoffen als günstig erscheinen.

Zur Bestimmung der flüchtigen Bestandteile von Stroh wurde eine Versuchsanlage gebaut und ein durchschnittlicher Gehalt an flüchtigen Bestandteilen von 80,3 v.H. der brennbaren Substanz festgestellt. Dieser Wert liegt erheblich über den Gehalten von Holzkohle mit 23,2 v.H., Steinkohle mit 26,3 v.H. und Koks mit durchschnittlich 3,8 v.H., und muß deshalb auch bei der Konstruktion von Strohfeuerungsanlagen besonders berücksichtigt werden, um einen vollständigen Ausbrand der Schwefelgase zu erreichen.

Anhand der Elementaranalysen wurden für Getreidestroh der spezifische Verbrennungsluftbedarf der Rohsubstanz mit $L = 4,04 \text{ m}_n^3/\text{kg}$ und das spezifische Rauchgasvolumen der Rohsubstanz mit $V_f = 4,70 \text{ m}_n^3/\text{kg}$ durch stöchiometrische Gleichungen ermittelt und mit den herkömmlichen Festbrennstoffen verglichen. Analog zum Sauerstoffgehalt und zum Kohlenstoffgehalt unterscheiden sich die einzelnen Brennstoffe auch in diesen Kenngrößen. So weisen Brennstoffe mit hohem Sauerstoff- und demgemäß niedrigem Kohlenstoffgehalt einen wesentlich geringeren spezifischen Verbrennungsluftbedarf und ein geringeres spezifisches Rauchgasvolumen auf als Brennstoffe mit hohem Kohlenstoffgehalt wie Holzkohle, Steinkohle und Koks, deren Werte fast doppelt so hoch sind, wie die von Stroh. Bezogen auf die Nennleistung einer Feuerungsanlage gleichen sich diese Werte jedoch wieder an, da Brennstoffe mit hohem spezifischen Verbrennungsluftbedarf und spezifischem Rauchgasvolumen auch einen hohen Heizwert besitzen.

Unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorschriften für den Bau und den Betrieb von Feuerungsanlagen wurden anhand der ermittelten verbrennungstechnischen Kenngrößen von Getreidestroh die speziellen Anforderungen an Strohfederungsanlagen ermittelt. Als wichtigste Erkenntnis wurde dabei festgestellt, daß absätzig beschickte Feuerungsanlagen nach dem Prinzip des Unterbrandes mit Nachverbrennung arbeiten müssen. Dies erscheint notwendig, um trotz des hohen Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen die gesetzlich zulässigen Höchstmengen an Staub, Ruß und Teer im Rauchgas nicht zu überschreiten und den noch DIN 4702 vorgeschriebenen Wirkungsgrad zu erreichen. Die ähnlichen verbrennungstechnischen Kennwerte von Stroh und Holz lassen es auch möglich erscheinen, Stroh in Einblasefeuerungen für Holzspäne zu verbrennen.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse scheint es daher grundsätzlich möglich, Stroh als Brennstoff zu verwenden, wenn es in Anlagen verfeuert wird, die den speziellen verbrennungstechnischen Eigenschaften dieses Materials Rechnung tragen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

1. AYIK, M.: Analyse des elektrischen Leistungsbedarfes wichtiger Bereiche der Milchviehhaltung, Diss. 1975, TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik
2. BACHTHALER, G., A. WAGNER: Ergebnisse langjähriger Vergleichsversuche Stroh - Gründüngung und Strohverbrennung unter verschiedenen Standortbedingungen, Sonderdruck Bayer. Landw. Jahrbuch (1973) 4
3. BECKER, M., K. NEHRING: Handbuch der Futtermittel, Band 2, Parey-Verlag Berlin 1965
4. BEWER, E.: Energieselbstversorgung bleibt unrentabel, Mitt. DLG (1974) 21, S. 608-610
5. BOIE, W.: Verbesserung der vereinfachten Verbrennungsrechnung durch neue Brennstoffkenngrößen, BWK 16 (1964) 3, S. 127-130
6. BOIE, W.: Eindeutige Kennzeichnung von Brennstoffen zur Anwendung von Prozeßrechnern im Kraftwerksbetrieb, Energietechnik 14 (1964) 5, S. 196-200
7. BUDERUS: Handbuch der Heizungs- und Klimatechnik, 1975, 32. Ausgabe, VDI-Verlag Düsseldorf
8. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN: Besondere Ernteermittlung 1976, Bonn 1977
9. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN: Statistisches Jahrbuch für Landwirtschaft 1977
10. DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS: DIN 51 900 - Bestimmung des Brennwertes und der Heizwertes, Beuth-Vertrieb Berlin, Köln (1966)
11. DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS: DIN 4702 Blatt 1 und 2 - Heizkessel, Begriffe, Nenleistung, Heiztechnische Anforderungen, Kennzeichnung, Prüfregelein, Beuth-Vertrieb Berlin, Köln 1967
12. DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS: DIN 4751 Blatt 2 - Sicherheitstechnische Ausrüstung von Heizungsanlagen mit Vorlauftemperaturen bis 110° C, offene und geschlossene Warmwasserheizungsanlagen bis 300.000 kcal/h mit thermostatischer Absicherung, Beuth-Vertrieb Berlin, Köln 1968

13. DREISSIGACKER, H.L.,
F.SURENDORF, E.WEBER: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), Carl Heymanns-Verlag Köln, Berlin, Bonn, München 1974, 221 S.
14. GRAHL, G.de: Wirtschaftliche Verwertung der Brennstoffe, Oldenburg-Verlag München, Berlin 1915
15. GRAHL, G.de.: Verwertung von Abfall- und Überschußenergie, VDI-Verlag Berlin 1927
16. GUMZ, W., L.HARDT: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik, Springer-Verlag 1962, 3. Aufl.
17. HERZOG, H.-J., H.-K.KNOOP,
M.STAROSTA: Studie zur sinnvollen Verwendung überschüssiger Strohabfälle auf bundesdeutschem Gebiet, ERNO Raumfahrttechnik GmbH Bremen 1975
18. KLAPP, E.: Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaus, Parey-Verlag Berlin, 6. Aufl., 603 S.
19. KNITTEL, H.: Auswirkungen der Minimalbestelltechnik auf physikalische Bodeneigenschaften, Diss. 1975, TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik
20. LOOS: Angaben der Fa. Loos, Gunzenhausen, über Unterschubfeuerungen
21. LOTTMANN, D.: Untersuchungen zur Strohverbrennung, Diss. 1976, Christian Albrechts-Universität Kiel
22. MENGEL, K.: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze, Gustav Fischer-Verlag Stuttgart 1972, 4. Aufl.
23. ORTH, H.-W., H.PETERS,
U.KÖHLER: Untersuchung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Getreidestroh, Grundl. Landt. 26 (1976) 6, S. 230-234
24. ORTH, H.-W.: Grundlagen des Brennverhaltens von Stroh, KTBL-Schrift Nr. 220 (1977) S. 125-137
25. PASCHER, F.: Elementaranalysen von Getreidestroh 1975-1977, Mikroanalytisches Laboratorium Bonn, pers. Mitt.
26. PATOW, O.: Die Ölheizung im Wohnhaus - Esso AG, Werner-Verlag, Düsseldorf 1962

27. PATZAK, W.: Zur Theorie des Brandgeschehens von Holz, VDI-Forschungsheft 1972 Nr. 552, 51 S., VDI-Verlag Düsseldorf
28. PERWANGER, A.,
H.MITTERLEITNER: Möglichkeiten der Strohverwertung, 2. Zwischenbericht d. Landt. Vereins e.V., Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1976
29. PERWANGER, A.: Ermittlung des Strohanfalls in der Bundesrepublik Deutschland, Energiegewinnung aus Stroh, 1. Zwischenbericht an die Europäische Gemeinschaft, Studie 1, Landtechnik Weihenstephan 1977
30. REHRL, K.: Biogas, ein wirtschaftseigener Kraftstoff? Prakt. Landtechnik 27 (1974) 2, S.50-51
31. REINHOLD, F.: Gasgewinnung in der Landwirtschaft nach dem System "Darmstadt", Landt. (1952) 2, S. 33-37
32. RÖNTGEN: Angaben der Fa. Röntgen, Extertal über Einblasefeuerungen
33. SACHS, L.: Statistische Auswertungsmethoden, Springer-Verlag 1969, 2. Aufl., 667 S., S. 262-266
34. SCHEFFER, F.,
P.SCHACHTSCHABEL: Lehrbuch der Bodenkunde, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1970, 7. Aufl., 447 S., S. 281 ff.
35. STAUSS, W.: Neue Probleme der Humus- und Energiewirtschaft, Mitt. DLG (1952) 38, S. 671-672
36. STREHLER, A.,
E.M.HOFSTETTER: Getreidestroh - eine neue Energiequelle zur Wohnhausheizung, Sanitär- und Heizungstechnik (1975) 7, S. 408-411
37. VETTER, H.: Einfluß der Strohdüngung auf Boden und Pflanze, Mitt. DLG (1959) 5, S. 110-111
38. VIESSMANN: Firmenprospekt über Kohleheizkessel, Typ "Mono" 1972
39. WENNER, H.-L. et al: Landtechnik Bauwesen, BLV-Verlag München Bern, Wien 1973

EDV-Programme

40. AUERNHAMMER, H.: PESK-Programm zur Erstellung statistischer Kenngrößen, Programmbibliothek d. Inst. f. Landtechnik, TUM Weihenstephan 1973
41. AUFMUR - aufbauende multiple Regression, Programmbibliothek d. Inst. f. Landtechnik, TUM Weihenstephan 1976
42. KALORI - Programm zur Auswertung der Heizwertbestimmung nach DIN 51 900, Programmbibliothek d. Inst. f. Landtechnik, TUM Weihenstephan 1976
43. WITTER - Programm zur Auswertung von Witterungsdaten, Programm d. Inst. f. Landtechnik, TUM Weihenstephan 1977

Anhangstabelle 1

- 93 -

VERSUCH : GETREIDESTROH

----- SOMMERGERSTE

ORTOLAN

N = 6

NR	BERICH- TIGUNG (GRAD)	PROBEN- GEWICHT (GRAMM)	BERICHTI- GUNGSSUMME (CAL)	VERBREN- NUNGSWERT (KJ/KG)	WASSER- INHALT (%)	HEIZ- WERT (KJ/KG)	H2O-FREIE SUBSTANZ (KJ/KG)
1	0.0025	0.753	10.37	16840.	65.60	15233.	17553.
2	0.0025	0.704	7.41	16583.	65.60	14976.	17262.
3	0.0015	0.700	7.94	16694.	65.60	15087.	17388.
4	0.0005	0.705	8.81	16512.	65.60	14905.	17182.
5	0.0	0.607	8.08	16654.	65.60	15048.	17344.
6	0.0010	0.587	7.93	16520.	65.60	14913.	17191.

MITTELWERT

15027. 17320.

STANDARDABWEICHUNG

124.05 140.33

VARIATIONSKOEFF.

0.83 0.81

VERSUCH : GETREIDESTROH

----- SOMMERWEIZEN

JANUS

N = 6

NR	BERICH- TIGUNG (GRAD)	PROBEN- GEWICHT (GRAMM)	BERICHTI- GUNGSSUMME (CAL)	VERBREN- NUNGSWERT (KJ/KG)	WASSER- INHALT (%)	HEIZ- WERT (KJ/KG)	H2O-FREIE SUBSTANZ (KJ/KG)
1	0.0	0.702	9.84	16860.	63.60	15303.	17188.
2	0.0015	0.813	10.68	17271.	63.60	15713.	17642.
3	0.0	0.718	10.31	17038.	63.60	15480.	17384.
4	0.0	0.710	9.41	16925.	63.60	15367.	17259.
5	0.0020	0.754	9.04	17016.	63.60	15458.	17360.
6	0.0027	0.686	8.67	17094.	63.60	15536.	17446.

MITTELWERT

15476. 17380.

STANDARDABWEICHUNG

142.98 158.16

VARIATIONSKOEFF.

0.92 0.91

Anhangstabelle 2: Durchschnittliche Feuchtegehalte der 1976 untersuchten Getreidestrohsorten

Art und Sorte	Anzahl der Wiederholungen	\bar{x}	Standardabweichung	Variationskoeffizient
WG Dura	4	9,71	0,276	2,847
WG Dunja	3	8,03	0,196	2,441
WG Doris	4	8,53	0,605	7,085
WG Sonja	4	8,77	0,660	7,525
WG Espe	4	8,40	0,752	8,954
SG Claudia	3	10,57	0,796	7,531
SG Canova	4	9,23	0,524	2,751
SG Carina	4	9,63	0,316	3,375
SG Ortolan	4	11,65	0,606	5,203
SG Villa	4	12,74	0,893	8,377
SG Asse	4	13,28	0,308	2,318
SG Hilde	4	13,55	0,850	6,277
SG Malta	4	8,27	0,492	5,953
SG Vogels.Gold	4	10,13	1,342	13,249
SG Nudinka	4	10,65	0,892	8,377
WW Feldkrone	4	12,20	0,258	2,115
WW Maris Hunstm.	3	11,53	0,416	3,609
WW Caribo	4	10,26	0,366	3,568
WW Jubilar	4	11,20	0,283	2,525
WW Diplomat	4	10,45	0,191	1,831
WW Monopol	4	11,19	0,955	8,536
WW Benno	4	9,82	0,460	4,682
SW Kolibri	4	10,33	0,235	2,270
SW Janus	4	9,62	0,410	9,623
SW Bali	4	9,81	0,628	6,399
SW Mephisto	4	10,85	0,137	1,266

Anhangstabelle 2: Durchschnittliche Feuchtegehalte der 1976 untersuchten Getreidestrohsorten (Fortsetzung)

Art und Sorte	Anzahl der Wiederholungen	\bar{x} v.H.	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
WR Pekuro	4	10,76	0,436	4,054
WR Nomaro	4	12,20	0,596	4,884
WR Tetra hell	4	11,25	0,556	4,944
WR Kustro	4	11,11	0,100	0,900
H Moritz	4	9,68	0,693	7,159
H Pirol	4	10,12	0,255	2,516
H Flämingsnova	4	9,49	0,309	3,255
H Arnold	4	10,12	0,229	2,262

Anhangstabelle 3: Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$)
 verschiedener Getreidestroharten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\bar{\varnothing} H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\bar{\varnothing} H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Wintergerste 16 157	Sommergerste 17 460	Winterweizen 17 175	Sommerweizen 17 108	Winterroggen 17 710	Hafer 16 654
Wintergerste 16 157		—					
Sommergerste 17 460		***	—				
Winterweizen 17 175		***	***	—			
Sommerweizen 17 108		***	**	***	—		
Winterroggen 17 710		***	*	***	***	—	
Hafer 16 654		***	***	***	***	***	—

n.s. = nicht signifikanter Unterschied

* = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 95$ v.H.

** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99$ v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99,9$ v.H.

Anhangstabelle 4 : Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$) von Stroh verschiedener Wintergersten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\bar{H}_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\bar{H}_{u(wf)}$ in kJ/kg	Doris 16 121	Malta 16 296	Vogels.Gold 16 108	Dura 16 253	Espe 16 124	Sonja 16 399	Dunja 15 794
Doris 16 121		-						
Malta 16 296		n.s.	-					
Vogelsanger Gold 16 108		n.s.	n.s.	-				
Dura 16 253		n.s.	n.s.	n.s.	-			
Espe 16 124		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-		
Sonja 16 399		n.s.	n.s.	*	n.s.	*	-	
Dunja 15 794		n.s.	*	n.s.	*	n.s.	**	-

n.s. = nicht signifikanter Unterschied

* = signifikanter Unterschied mit
Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 95 v.H.

** = signifikanter Unterschied mit
Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 99 v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit
Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 99,9 v.H.

Anhangstabelle 5: Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Stroh verschiedener Sommergersten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\bar{\Delta}H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\bar{\Delta}H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Claudia 17 155	Asse 17 887	Carina 17 638	Nudinka 17 461	Villa 17 330	Ortolan 17 320	Conova 17 088	Hilde 17 741
Claudia 17 155		-							
Asse 17 887		*	-						
Carina 17 638		n. s.	n. s.	-					
Nudinka 17 461		n. s.	*	n. s.	-				
Villa 17 330		n. s.	***	n. s.	n. s.	-			
Ortolan 17 320		n. s.	***	n. s.	n. s.	n. s.	-		
Canova 17 088		n. s.	***	n. s.	*	**	*	-	
Hilde 17 741		*	n. s.	n. s.	n. s.	***	***	***	-

n. s. = nicht signifikanter Unterschied
 * = signifikanter Unterschied mit
 Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 95 v.H.

** = signifikanter Unterschied mit
 Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 99 v.H.
 *** = signifikanter Unterschied mit
 Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 99,9 v.H.

Anhangstabelle 6 : Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz $H_{u(wf)}$ von Stroh verschiedener Winterweizensorten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\varnothing H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\varnothing H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Feldkrone 17 322	Benno 17 073	Caribo 17 332	Jubilar 17 264	Monopol 17 263	Diplomat 17 102	Maris Huntsman 16 957
Feldkrone 17 322		-						
Benno 17 073		*	-					
Caribo 17 332		n.s.	n.s.	-				
Jubilar 17 264		n.s.	n.s.	n.s.	-			
Monopol 17 263		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-		
Diplomat 17 102		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	
Maris Huntsman 16 957		***	n.s.	***	*	**	n.s.	-

n.s. = nicht signifikanter Unterschied

* = signifikanter Unterschied mit
Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 95 v.H.

** = signifikanter Unterschied mit
Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 99 v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit
Sicherheitswahrscheinlichkeit P = 99,9 v.H.

Anhangstabelle 7: Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$) von Stroh verschiedener Sommerweizensorten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\emptyset H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\emptyset H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Bali 16 800	Janus 17 379	Kolibri 17 349	Mephisto 17 033
Bali 16 800		-			
Janus 17 379		***	-		
Kolibri 17 349		***	n. s.	-	
Mephisto 17 033		n. s.	n. s.	n. s.	-

n. s. = nicht signifikanter Unterschied

* = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 95$ v.H.

** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99$ v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99,9$ v.H.

Anhangstabelle 8: Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$) von Stroh verschiedener Winterroggensorten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\emptyset H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\emptyset H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Kustro 17 749	Nomaro 18 115	Pekuro 17 700	Tetrahell 17 384
Kustro 17 749		-			
Nomaro 18 115		***	-		
Pekuro 17 700		n. s.	**	-	
Tetrahell 17 384		*	***	*	-

n. s. = nicht signifikanter Unterschied

* = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 95$ v.H.

** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99$ v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99,9$ v.H.

Anhangstabelle 9: Ergebnisse der Prüfung der durchschnittlichen Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$) verschiedener Hafersorten auf signifikante Unterschiede

Sorte $\emptyset H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Sorte $\emptyset H_{u(wf)}$ in kJ/kg	Flämingsnova 16 449	Pirol 16 887	Moritz 16 233	Arnold 17 115
Flämingsnova 16 449		-			
Pirol 16 887		***	-		
Moritz 16 233		n.s.	***	-	
Arnold 17 115		***	**	***	-

n.s. = nicht signifikanter Unterschied

* = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 95$ v.H.

** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99$ v.H.

*** = signifikanter Unterschied mit Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99,9$ v.H.

Anhangstabelle 10: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$) sämtlicher Strohproben

	$H_{u(wf)}$ in kJ/kg	n	s	VK
<u>Wintergerste 1976</u>				
<u>Frankendorf</u>				
Doris	16 122	8	384,94	2,39
Malta	16 297	8	270,01	1,66
Vogelsanger Gold	16 108	8	331,56	2,06
Dura	16 256	8	146,16	0,90
Espe	16 124	7	284,11	1,76
Sonja	16 399	8	135,66	0,83
Dunja	15 794	8	473,70	3,00
<u>Sommergerste 1976</u>				
<u>Weihenstephan</u>				
Claudia	17 156	8	612,15	3,57
Asse	17 887	8	229,85	1,28
Carina	17 638	8	659,91	3,74
Nudinka	17 462	6	298,02	1,71
Villa	17 330	8	111,57	0,64
Ortolan	17 320	6	140,33	0,81
Canova	17 088	6	130,79	0,77
Hilde	17 742	6	89,59	0,50
<u>Winterweizen 1976</u>				
<u>Weihenstephan</u>				
Feldkrone	17 322	6	109,15	0,63
Benno	17 074	6	226,38	1,33
Caribo	17 332	6	143,28	0,83
Jubilar	17 264	6	251,47	1,46
Monopol	17 263	6	165,31	0,96
Diplomat	17 103	7	346,93	2,03
Maris Huntsman	16 958	8	117,93	0,70

Anhangstabelle 10: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{U(wf)}$) sämtlicher Strohproben (Fortsetzung)

	$H_{U(wf)}$ in kJ/kg	n	s	VK
<u>Sommerweizen 1976</u>				
<u>Weihenstephan</u>				
Bali	16 800	8	247,64	1,47
Janus	17 380	6	158,16	0,91
Kolibri	17 350	6	93,56	0,54
Mephisto	17 034	8	679,56	3,99
<u>Winterroggen 1976</u>				
<u>Weihenstephan</u>				
Kustro	17 749	6	123,45	0,70
Nomaro	18 115	6	97,59	0,54
Pekuro	17 700	6	210,17	1,19
Tetrahell	17 385	8	302,31	1,74
<u>Hafer 1976</u>				
<u>Weihenstephan</u>				
Flämingsnova	16 450	8	205,66	1,25
Pirol	16 888	6	112,53	0,67
Moritz	16 234	6	214,67	1,32
Arnold	17 116	6	86,48	0,51
<u>Düngungsversuch</u>				
WW Caribo ohne K	16 157	6	180,31	1,116
WW Caribo mit K	16 296	6	300,17	1,84
WW Caribo ohne N	15 718	6	195,85	1,25
SG Hilde ohne N	15 908	6	189,46	1,19
SG Hilde mit N	15 749	6	145,21	0,92

Fortsetzung Seite 105

Anhangstabelle 10: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz ($H_{U(wf)}$) sämtlicher Strohproben (Fortsetzung)

	$H_{U(wf)}$ in kJ/kg	n	s	VK
<u>Weihenstephan 1977</u>				
SW Kolibri	17 156	6	76,73	0,45
H Arnold	17 123	6	85,02	0,50
WR Kustro	16 987	6	47,35	0,28
<u>Frankendorf 1977</u>				
WR Kustro	17 958	6	130,15	6,29
SW Kolibri	17 806	6	223,67	1,26
<u>Ausländische Strohproben</u>				
Weizenstroh Liechtenstein	17 663	6	146,91	0,83
Gerstenstroh Poebene	16 648	6	187,73	1,13
Weizenstroh Poebene	16 797	6	58,55	0,35
Reisstroh Poebene	14 618	6	120,08	0,82
<u>Lagerungsversuch Weizenstroh</u>				
ohne Veränderung	17 620	6	158,48	0,90
leicht bräunlich	17 380	6	213,31	1,23
braun verfärbt	17 229	6	198,42	1,15
stark verfäult	16 802	6	197,73	1,18

Anhangstabelle 11: Witterungsdaten zur Heizwertbestimmung mit 5° C Temperaturuntergrenze

Getreideart	Aussaat-termin	Ernte-termin	Tempera- turunter- grenze °C	Anzahl d. Tage über 5° C mittlerer Togestemp.	Mittl. Tages- temperatur		Sonnenschein		Niederschläge	
					Summe °C	Durchschn. °C	Summe h	Durchschn./Tag h/d	Summe mm	Durchschn./Tag mm/d
Winterweizen	17.10.75	31.7.76	5	129	1764	13,68	1006	7,8	298	2,31
Wintergerste	23. 9.75	7.7.76	5	125	1565	12,51	938	7,51	201	1,61
Winterroggen	23. 9.75	31.7.76	5	149	2001	13,43	1085	7,28	299	2,01
Sommerweizen	18. 3.76	31.7.76	5	114	1672	14,66	981	8,6	250	2,2
Sommergerste	18. 3.76	19.7.76	5	102	1491	14,61	946	9,27	189	1,85
Hafer	18.3. 76	10.8.76	5	124	1819	14,67	1051	8,47	287	2,31
Winterweizen	13.10.76	12.8.77	5	168	2021	12,03	953	5,67	451	2,68
Sommerweizen	13. 3.77	12.8.77	5	134	1788	13,34	881	6,57	392	2,92
Sommergerste	13. 7.77	28.7.77	5	119	1550	13,03	793	6,67	297	2,49
Hafer	13. 3.77	12.8.77	5	134	1788	13,34	881	6,57	392	2,92
Winterroggen	30. 9.77	12.8.77	5	181	2179	12,04	1012	5,59	454	2,51

Anhangstabelle 12: Witterungsdaten zur Heizwertbestimmung mit 7° C Temperaturuntergrenze

Getreideart	Aussaat-termin	Ernte-Termin	Tempera-turunter-grenze °C	Anzahl d. Tage über 7°C mittlerer Tagestemp.	Mittlere Tages-temperatur		Sonnenscheindauer		Niederschläge	
					Summe °C	Durchschn. °C/d	Summe h	Durchschn./Tag h/d	Summe mm	Durchschn./Tag mm/d
Winterweizen	17.10.75	31.7.76	7	111	1659	14,95	963	8,68	257,6	2,32
Wintergerste	23. 9.75	7.7.76	7	104	1441	13,86	882	8,48	160,2	1,54
Winterroggen	23. 9.75	31.7.76	7	128	1878	14,68	1029	8,04	258,7	2,02
Sommerweizen	18. 3.76	31.7.76	7	108	1637	15,16	958	8,87	230,1	2,13
Sommergerste	18. 3.76	19.7.76	7	96	1457	15,17	923	9,61	169,4	1,76
Hafer	18. 3.76	10.8.76	7	118	1785	15,13	1028	8,71	266,9	2,26
Winterweizen	13.10.76	12.8.77	7	135	1828	13,54	893	6,62	404,4	3,00
Sommerweizen	13. 3.77	12.8.77	7	123	1723	14,01	855	6,95	365,7	2,97
Sommergerste	13. 3.77	28.7.77	7	108	1486	13,78	768	7,11	270,4	2,50
Hafer	13. 3.77	12.8.77	7	123	1723	14.01	855	6,95	365,7	2,97
Winterroggen	30. 9.77	12.8.77	7	148	1986	13,42	951	6,43	408,1	2,76

Anhangstabelle 13: Witterungsdaten zur Heizwertbestimmung mit 10 ° C Temperaturuntergrenze

Getreideart	Aussaat-termin	Ernte-termin	Tempera- turunter- grenze °C	Anzahl d. Tage über 10°C mittlerer Tagestemp.	Mittlere Tages- temperatur		Sonnenscheindauer		Niederschläge	
					Summe °C	Durchschn. °C/d	Summe h	Durchschn./Tag h/d	Summe mm	Durchschn./Tag mm/d
Winterweizen	17.10.75	31.7.76	10	93	1510	16,23	860	9,25	193,8	2,08
Wintergerste	23. 9.75	7.7.76	10	82	1255	15,3	772	9,41	196,2	1,17
Winterroggen	23.9.75	31.7.76	10	106	1692	15,96	919	8,67	194,7	1,84
Sommerweizen	18. 3.76	31.7.76	10	93	1510	16,23	860	9,25	193,8	2,08
Sommergerste	18. 3.76	19.7.76	10	81	1329	16,40	825	10,19	133,1	1,64
Hafer	18. 3.76	10.8.76	10	103	1657	16,09	930	9,03	230,6	2,24
Winterweizen	13.10.76	12.8.77	10	104	1563	15,03	777	7,47	346,5	3,33
Sommerweizen	13. 3.77	12.8.77	10	101	1530	15,15	774	7,67	342,3	3,39
Sommergerste	13. 3.77	28.7.77	10	86	1293	15,03	687	7,99	247,0	2,87
Hafer	13. 3.77	12.8.77	10	101	1530	15,15	774	7,67	342,3	3,39
Winterroggen	30. 9.76	12.8.77	10	116	1711	14,75	835	7,20	349,9	3,02

Anhangstabelle 14.1: Zusammensetzung der Rohsubstanz fester Brennstoffe

Brennstoff	Gewichtsprozent der Rohsubstanz						
	Wasser	Asche	C	O	H	N	S
Extremwert von Stroh	10-25	4-7	34-45	29-36	4-5	0,2-0,4	0,04-0,13
durchschnittliches Stroh	14	4,3	42,4	33,8	5,0	0,3	0,10
Holz	15	0,42	42,65	36,6	5,22	0,1	0,0
Holzkohle	4	0,67	79,59	11,96	3,64	0,13	0,0
Torf	32,5	2,0	36,35	24,56	3,80	0,59	0,20
Extremwert von Braunkohle	15-60	1,3-15	15,8-61,9	4-21,76	1,25-5,0	0,23-1,59	0,08-3,26
durchschnittliche Braunkohle	25	7,5	47,25	14,85	3,38	0,67	1,35
Extremwert von Steinkohle	1-18,7	1-15	53,7-90,2	0,9-9,8	2,6-4,9	0,8-1,66	0,4-1,3
durchschnittliche Steinkohle	5	6,65	79,52	4,42	2,65	0,88	0,88
Extremwert von Koks	4-20	9-17	56,7-85,3	0-4,35	0,19-1,0	0-0,87	0,38-1,0
durchschnittlicher Koks	5	9,5	81,65	0,86	1,28	0,86	0,86

Anhangstabelle 14.2: Zusammensetzung der wasserfreien Substanz fester Brennstoffe

Brennstoff	Gewichtsprozent der wasserfreien Substanz					
	Asche	C	O	H	N	S
Extremwerte von Stroh	4,65-8,14	45-50	38-40	5-6	0,3-0,4	0,05-0,14
durchschnittliches Stroh	5	49,3	39,4	5,8	0,4	0,1
Holz	0,49	50,17	43,05	6,14	0,12	0,0
Holzkohle	0,69	82,91	12,64	3,79	0,14	0,0
Torf	6,15	53,85	36,39	5,62	0,87	0,30
Extremwerte von Braunkohle	1,5-37,5	18,59-72,8	4,7-25,6	1,47-5,9	0,27-1,78	0,09-3,84
durchschnittliche Braunkohle	10	63	19,8	4,5	0,9	1,8
Extremwerte von Steinkohle	1-18,5	65,2-91,1	1,1-9,9	3,2-5,0	1,0-1,7	0,5-1,3
durchschnittliche Steinkohle	7	83,7	4,65	2,79	0,93	0,93
Extremwerte von Koks	9,4-21,3	70,8-88,8	0-4,5	0,2-2,5	0-0,9	0,5-1,0
durchschnittlicher Koks	10	85,95	0,9	1,35	0,9	0,9

Anhangstabelle 14.3: Zusammensetzung der wasser- und aschefreien Substanz fester Brennstoffe

Brennstoff	Gewichtsprozent der wasser- und aschefreien Substanz				
	C	O	H	N	S
Extremwerte von Stroh	48-53	39,6-43	5,2-6,5	0,3-0,6	0,06-0,2
durchschnittliches Stroh	51,9	41,4	6,1	0,4	0,1
Holz	50,43	43,28	6,17	0,12	0,0
Holzkohle	83,49	12,55	3,82	0,14	0,0
Torf	55,5	37,50	5,80	0,90	0,3
Extremwerte von Braunkohle	63-74	16-26	5-6	0,9-1,9	0,3-3,9
durchschnittliche Braunkohle	70	22	5	1	2
Extremwerte von Steinkohle	81-92	1,4-10	3-5	1,2-1,7	0,6-1,4
durchschnittliche Steinkohle	90	5	3	1	1
Extremwerte von Koks	90-98	0-5	0,3-2,9	0-0,9	0,6-1,2
durchschnittlicher Koks	95,5	1	1,5	1	1

Die Werte der Anhangstabellen 14.1 - 14.3 entstammen mit Ausnahme von Stroh dem Handbuch für Brennstoff- und Feuerungstechnik von GUMZ und HARDT, Springer-Verlag 1962

Anhangstabelle 15: Umrechnung von Energie- und Leistungseinheiten

	1 kJ	1 kcal	1 kWh	1 kJ/h	1 kcal/h	1 kW
kJ	1	4,1868	3 600			
kcal	0,2388	1	860			
kWh	0,0002778	0,001163	1			
kJ/h				1	4,1868	3 600
kcal/h				0,2388	1	860
kW				0,0002778	0,001163	1

Zehnerpotenzen:

	Vorsilbe	Zeichen
10^3	kilo	k
10^6	mega	M
10^9	giga	G

Anhangstabelle 16:

Verordnungen über die Beseitigung von pflanzlichen Abfällen (Stroh) außerhalb von
Abfallbeseitigungsanlagen in den einzelnen Bundesländern

Bundesland	Meldefrist	erlaubter Zeitpunkt (Tageszeit, Wochen- tag)	Strohverteilung	zulässige Größe der Brandfläche in ha	Aufsichtspersonen	Brandrichtung	Mindestentfernung in m		
							Straßen	Gebäuden	Wäldern
Baden-Württemberg	rechtzeitig	am Tag	Schwaden oder Haufen	gemäß Ortsvorschrift			Autobahnen 200 andere Straßen 100	50	50
Bayern	7	8 ⁰⁰ -18 ⁰⁰ , 1-6	möglichst Fläche	3	2	nur von 1 Stelle aus	Autobahnen 100 andere Straßen 50	100	20
Hessen	2 Werktage	8 ⁰⁰ -16 ⁰⁰ , 1-5 8 ⁰⁰ -12 ⁰⁰ , 6	-	3	2	gegen Wind			
Niedersachsen	2 Werktage	am Tag, 1-5	Schwaden oder Haufen	2,5	2	gegen Wind	100	50	100
Nordrhein-Westfalen	2	9 ⁰⁰ -17 ⁰⁰ , 1-5	Schwaden	3	2	gegen Wind	50	100	100
Rheinland-Pfalz	3	am Tag	Schwaden oder Haufen	-	ständige Kontrolle	gegen Wind	50	100	100
Saarland	3	am Tag	Schwaden oder Haufen	-	ständige Kontrolle	gegen Wind	Autobahnen 100 andere Straßen 50	100	100
Schleswig-Holstein		am Tag, 1-5	Flächen oder Schwaden	5	ständige Aufsicht	nur von 1 Stelle aus	50	50	50(Lautwälder) 100(andere Wälder)