

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

Raps als Energiepflanze

Verwertung von Rapsöl und Rapsstroh zur Energiegewinnung

Dipl.-Ing.agr. Univ.
Rudolf Apfelbeck

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Agrarwissenschaften
genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. W. Rothenburger

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. H.-L. Wenner
(Schriftliche Beurteilung)

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. M. Estler
(Mündliche Prüfung)

2. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. G. Fischbeck

Die Dissertation wurde am 24.02.1989 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Landwirtschaft und Gartenbau am 26.06.1989 angenommen.

© 1989 by Landtechnik Weihenstephan

ISSN-Nr. 0931-6264

Nachdruck auch auszugsweise, Wiedergabe, Vervielfältigung und
Übersetzung nur mit Genehmigung der Landtechnik Weihenstephan

Selbstverlag im Eigenvertrieb: Institut für Landtechnik

Vöttlinger Str. 36

D-8050 Freising-Weihenstephan

V O R W O R T

Der hohe Verbrauch an fossilen Energieträgern im 20. Jahrhundert hat Auswirkungen auf das Klima der Erde, deren nachteilige Folgen erst nach und nach erkannt werden. Neben der drastischen Einschränkung des Energieverbrauchs insgesamt kann die Produktion von Biomasse zur Energieerzeugung in der Landwirtschaft ebenfalls einen Beitrag zur Abmilderung von Klimaveränderungen leisten.

Neben dem anaeroben Gärungsprodukt Alkohol, der als flüssiger Kraftstoff für Motoren geeignet ist, bietet die Produktion von Rapsöl oder anderen pflanzlichen Ölen ebenfalls die Möglichkeit, einen Kraftstoff mit relativ hoher Energiedichte für Dieselmotoren bereitzustellen. Das in den Samenkörnern enthaltene Pflanzenöl kann mit geringem Energieaufwand großtechnisch mittels Hexan-Extraktion und im small-scale-Bereich mechanisch ohne Umformprozesse gewonnen werden. Daneben kann Rapsstroh zur Wärmeerzeugung oder für Kochzwecke als fester Brennstoff ebenfalls dazu beitragen, fossile Energieträger einzusparen.

Während unter europäischen Verhältnissen die Energieträgerproduktion aus Biomasse kurz- bis mittelfristig nur durch eine massive agrarpolitische Förderung eingeführt werden kann, ist in Entwicklungsländern die Pflanzenölerzeugung bereits derzeit ökonomisch sinnvoll und kann zur Weiterentwicklung der Landwirtschaft beitragen.

Weihenstephan, August 1989



o. Prof. Dr. M. Estler

Nach Abschluß der vorliegenden Dissertation möchte ich mich bei all denen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. H.-L. Wenner für die Überlassung des Themas. Für die Übernahme der Aufgabe des ersten Prüfers nach dem Tod von Prof. Wenner, sei Herrn Prof. Dr. M. Estler recht herzlich gedankt.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. W. Rothenburger für die nachträgliche Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. G. Fischbeck für die Übernahme des Coreferates.

Besondere Anerkennung gebührt Herrn AOR Dr. A. Strehler und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die stets gewährte Unterstützung.

Hervorheben möchte ich ebenfalls, daß mir von verschiedenen landwirtschaftlichen Betriebsleitern und Mitarbeitern der LBP Freising, Versuchsflächen zur Verfügung gestellt wurden. Vielen Dank.

Weihenstephan, August 1989



Rudolf Apfelbeck

ABSTRACT

Continually increasing expenditure for market regulation in the EEC, the consideration of fossil fuel and an attempt to diminish the increase of CO₂-content in the atmosphere are the main reasons for the use of biomass as a potential energy source. The utilization of the rape plant enables the production of both liquid and solid fuel.

Rape oil fails to reach the German standard of diesel fuel in five points. The operation of direct injected diesel engines led to deposits in the combustion area and to increase abrasive damage. A range of pre-chamber diesel engines can utilize rape oil as a diesel substitute, although a 10 - 20 % higher volumetric consumption must be expected. The higher consumption using direct injected Elsbett-diesel engine, which is suitable for plant oils, is approx. 6 % according to recent assessments.

Norm values for viscosity and cetan number can be attained by means of transesterification of the plant oil molecule with mono alcohols. A rise in fuel consumption (0 - 17 %) and lubrication oil dilution was measured operation with conventional diesel engine series. Up to 50 % reduction of harmful emission has been recorded.

Rape oil can be used as a heating oil in special boilers or as an admixture of 20 % to extra light heating oil without any trouble.

It was statistically proved by means of a variety trial that both the variety and the weather conditions prevailing throughout the year influence the rape straw- and seed yield. A rape straw yield of 7,5 t dry matter/ha and rape seed yield of 2,9 t dry matter/ha was recorded - calculated as an average of three years values using eight varieties. The moisture content of rape straw dried in the swath drops within two days from 50 to 15 - 20 %. 50 - 80 % of the straw recovery implements.

Rape straw has a heating value of 17 MJ/kg and an ash content of 6,5 %. The 20 % higher rate of combustion with rape straw compared with cereal straw and wood means that it is necessary to alter the furnace construction in order to achieve an efficient combustion with low harmful emission.

Approx. 1,2 t oil and 5 t straw as fuel as well as 1,8 t rape meal as albuminous feed can be produced from the rape plant at low energy costs. This economical advantage, however, is faced with the disadvantage of high piece costs.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Problemstellung und Ziel	4
2. Energieträger Rapsöl	7
2.1 Herkunft und chemische Zusammensetzung von Rapsöl	7
2.2 Energetische Verwertung von Rapsöl als Kraftstoff	12
2.2.1 Kraftstoffspezifische Kenngrößen von Rapsöl . . .	12
2.2.1.1 Reines Rapsöl	14
2.2.1.2 Rapsölester	18
2.2.2 Rapsölverwendung als Kraftstoff in Dieselmotoren .	22
2.2.2.1 Reines Rapsöl	22
2.2.2.2 Rapsölester	35
2.3 Energetische Verwertung von Rapsöl als Brennstoff	41
2.3.1 Brennstoffspezifische Kenngrößen von Rapsöl . . .	42
2.3.1.1 Reines Rapsöl	44
2.3.1.2 Gemisch Heizöl-Rapsöl	47
2.4 Lagerung von Rapsöl	51
2.4.1 Lagerungsbedingungen und Mischbarkeit	51
2.4.2 Materialverträglichkeit von Rapsöl	56
3. Energieträger Rapsstroh	60
3.1 Erträge bei Rapsstroh	60
3.1.1 Rapsstroherträge in der Literatur	60
3.1.2 Methode der Ertragsermittlung von Rapsstroh . . .	62
3.1.2.1 Sortenvergleichsversuche	62
3.1.2.2 Versuche in Rapsbeständen im feldmäßigen Anbau . .	63
3.1.3 Ergebnisse der Ertragsermittlungen	67
3.1.3.1 Parzellenversuchsergebnisse	67
3.1.3.2 Praxisversuchsergebnisse	73
3.2 Trocknung von Rapsstroh	76
3.2.1 Gleichgewichtsfeuchte	77
3.2.2 Rapsstroh-trocknung im Schwad	81

3.3	Ernte von Rapsstroh	86
3.4	Brikettierung von Rapsstroh	92
3.4.1	Halmgutzerkleinerung	92
3.4.2	Brikettierung	100
3.5	Feuerungstechnische Kenngrößen von Rapsstroh . . .	106
3.5.1	Heizwert von Rapsstroh	106
3.5.2	Chemische Zusammensetzung	110
3.5.3	Flüchtige Bestandteile und Abbrandgeschwindigkeit	112
3.5.4	Asche- und Nährstoffgehalte	115
3.6	Energiegewinnung aus Rapsstroh	119
3.6.1	Verfeuerung von HD-Ballen	121
3.6.1.1	Heizkessel auf dem Kesselprüfstand	122
3.6.1.2	Heizkessel in Praxisanlagen	126
3.6.2	Verfeuerung von Briquettes	127
3.6.2.1	Einzelöfen	128
3.6.2.2	Heizkessel	132
4.	Kostenabschätzung zur Nutzung von Rapsöl und Rapsstroh als Energieträger	136
4.1	Kosten für den Energieträger Rapsöl	136
4.1.1	Kosten für den Motorenbetrieb mit reinem Rapsöl .	137
4.1.2	Kosten für den Motorenbetrieb mit Rapsölester . .	140
4.2	Kosten der Verwertung von Rapsöl als Brennstoff .	141
4.3	Kosten der Brennstoffbereitstellung und der Wärmeerzeugung aus Rapsstroh	143
4.4	Kosten der Rapsstrohbrikettierung	146
5.	Weiterführende Arbeiten	148
6.	Zusammenfassung	150
7.	Literatur	155
8.	Anhang	165

Verzeichnis der Tabellen	Seite
Tab. 1: Fettsäurezusammensetzung von Rapsöl und anderen Pflanzenölen nach Angaben verschiedener Autoren	10
Tab. 2: Summenformeln, Heizwerte und Dichten von flüssigen Energieträgern	13
Tab. 3: Normanforderungen an Dieselöl und entsprechende Kennwerte von Rapsöl nach verschiedenen Autoren	14
Tab. 4: Normanforderungen an Dieselöl und entsprechende Kennwerte von Rapsölmethylester (RME) nach verschiedenen Autoren	20
Tab. 5: Versuche mit Rapsöl und Dieselöl als Kraftstoff in <u>direkte</u> inspritzenden Dieselmotoren	24
Tab. 6: Versuche mit Rapsöl und Dieselöl als Kraftstoff in <u>indirekt</u> einspritzenden Dieselmotoren	28
Tab. 7: Kolbensauberkeit und Düsenzustand bei unterschiedlich aufbereitetem Rapsöl (Beurteilung nach VELLGUTH [122])	32
Tab. 8: Versuche mit Rapsölmethylester und Dieselöl als Kraftstoff in Dieselmotoren	36
Tab. 9: Abgasemissionen mit Rapsölmethylester nach dem Testzyklus US-FTP-75; Kaltstart	40
Tab. 10: Normanforderungen an Heizöl EL und entsprechende Kennwerte von Rapsöl nach verschiedenen Autoren	42
Tab. 11: Verbrennungskennwerte bei Verbrennung von Rapsöl auf einem Prüfstand mit einem Ölbrenner für Heizöl	45
Tab. 12: Verbrennungskennwerte bei Verbrennung mit einem Gemisch aus Rapsöl und Heizöl EL (1 : 1) auf einem Prüfstand mit einem Ölbrenner für Heizöl EL	48
Tab. 13: Verbrennungskennwerte bei Verbrennung von Rapsölmethylester (100 %) mit und ohne Brennstoffvorwärmung auf einem Prüfstand mit einem Ölbrenner für Heizöl	50
Tab. 14: Rapsstrohmengen und Korn-Stroh-Verhältnis zum Erntezeitpunkt	61
Tab. 15: Signifikanztest und Least-Squares-Mittelwerte für die untersuchten Rapsernteerträge (n = 64, Gewichtsangaben in Trockensubstanz)	68
Tab. 16: Ergebnisse der Rapsstrohauffangversuche 1985 und 1986 (Angaben in Trockensubstanz)	73
Tab. 17: Korn-Stroh-Verhältnis aus den Praxisversuchen 1985 und 1986	75

Tab. 18:	Geerntete Rapsstrohmengen und Bergequote bei den Praxisversuchen (Bezug Trockensubstanz)	87
Tab. 19:	Gewichte und Dichte von HD-Rapsstrohhallen (Angaben in Trockensubstanz)	88
Tab. 20:	Gewichte und Dichte von Rapsstroh-Rundballen (Angaben in Trockensubstanz)	89
Tab. 21:	Arbeitszeitbedarf für die Rapsstrohbergung mit HD-Ballenpresse (1 AK), laden und einlagern von Hand (3 AK)	90
Tab. 22:	Arbeitszeitbedarf für die Rapsstrohbergung mit Rundballenpresse (1 AK), laden und ebenerdig einlagern mit Frontlader (1 AK)	90
Tab. 23:	Durchsatz, Leistungsaufnahme und Stromverbrauch für die Auflösung und Zerkleinerung von Strohrundballen (12-mm-Rundlochsieb)	94
Tab. 24:	Durchsatz, Drehleistungsaufnahme und Arbeitsbedarf für die Strohzerkleinerung von Hochdruckballen (6-mm-Rundlochsieb)	97
Tab. 25:	Durchsatz, Leistungsaufnahme und Stromverbrauch für die Brikettierung	101
Tab. 26:	Kennwerte der verpreßten Stroharten	102
Tab. 27:	Durchsatz, Drehleistungsaufnahme und Arbeitsbedarf für die Brikettierung (2 Kolbenstrangpressen)	104
Tab. 28:	Kennwerte der verpreßten Stroharten	104
Tab. 29:	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz von Winterrapsorten der Ernte 1985 auf dem Standort Freising	107
Tab. 30:	Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener Standorte (Sorte BELINDA, Erntejahr 1985)	108
Tab. 31:	Durchschnittliche Heizwerte der wasser- und aschefreien Substanz $H_u(waf)$ verschiedener Standorte (Sorte BELINDA, Erntejahr 1985)	108
Tab. 32:	Heizwerte von Winterrapsorten im Jahresvergleich zwischen 1985 und 1986	109
Tab. 33:	Durchschnittlicher Heizwert von Rapsstroh und anderen Festbrennstoffe	110
Tab. 34:	Durchschnittliche Elementgehalte von Rapsstroh und anderen Festbrennstoffe	111
Tab. 35:	Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen von Rapsstroh bei wasserfreier (wf) bzw. wasser- und aschefreier (waf) Substanz	112

Tab. 36:	Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen in der wasser- und aschefreien Substanz (waf) von Rapsstroh und verschiedenen anderen Festbrennstoffen	113
Tab. 37:	Nährstoffgehalte von Rapsstroh (Angaben in Gew.-% der Trockensubstanz)	116
Tab. 38:	Asche- und Nährstoffgehalte von Winterrapsstroh (Angaben in Gew.-% der Trockensubstanz)	118
Tab. 39:	Nährstoffentzug bei der Ernte von 40 dt Rapsstrohtrockenmasse pro Hektar	119
Tab. 40:	Prüfstandsversuche mit einem Unterbrandkessel für HD-Ballen	124
Tab. 41:	Befuerung von zwei Unterbrandkesseln für HD-Ballen	126
Tab. 42:	Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit Metallgußbrennkammer (Nennwärmeleistung 4,65 kW)	128
Tab. 43:	Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit Schamottbrennkammer	130
Tab. 44:	Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit runder Metallbrennkammer (Nennwärmeleistung 16 kW)	130
Tab. 45:	Prüfstandsversuche mit einem Unterbrand-Heizkessel mit Gebläseluftzuführung (Nennwärmeleistung 37 kW)	132
Tab. 46:	Kraftstoffkosten und Mehrkosten (DM/l) für den Dieselmotorenbetrieb mit reinem Rapsöl bei einem Vorkammer-Motor (IDI) und einem DI-Motor bei konstantem Motorwirkungsgrad	139
Tab. 48:	Brennstoffkosten und Mehrkosten (DM/l) für den Wärmeerzeugung bei 20 %iger Rapsölbeimischung zu Heizöl und alleinigem Rapsöleinsatz	142
Tab. 49:	Kosten der Rapsstrohbergung in DM/t bei einem Strohertrag von 4,6 t/ha (nach KOLLOCH et al. 1987 [54] und eigenen Berechnungen)	143
Tab. 50:	Kosten der Brennstoffbereitstellung und Lagerung	144
Tab. 51:	Investitionsaufwand und Kosten für die Wärmeerzeugung aus Rapsstroh und Heizöl (nach KOLLOCH 1987 [54])	145
Tab. 52:	Gesamtkosten für die Wärmeerzeugung aus Rapsstroh	145

Verzeichnis der Abbildungen	Seite
Abb. 1: Entwicklung der Überschußproduktion (1977/'81/'85) und der Marktordnungskosten in der Europäischen Gemeinschaft (nach SCHÄFER [43] und [55])	1
Abb. 2: Rohölverbrauch der EG (12) 1984 mit Anteil der Landwirtschaft und mögliches Biomasseproduktionspotential auf 10 Mio. ha (nach SCHÄFER [43], [55] und [126]	2
Abb. 3: Bestandteile eines Rapskorns [6]	7
Abb. 4: Bildung eines Fettmoleküls [18]	8
Abb. 5: Viskositätsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur bei Pflanzenölen und Dieselöl (nach VELLGUTH [122])	15
Abb. 6: Siedeverlauf von Rapsöl und Dieselkraftstoff [105, 35, 65, 130]	16
Abb. 7: Umesterung eines Triglyzerids mit Methanol	18
Abb. 8: Destillationskurven von Rapsölestern und Dieselöl [130, 67]	21
Abb. 9: Schematische Darstellung von Einspritzdüse und Kolben beim ELKO-Dieselmotor [27]	27
Abb. 10: Entwicklung der Peroxidzahl von Sonnenblumenöl bei konstanter Erwärmung auf 85 °C (nach DU PLESSIS [25])	54
Abb. 11: Entwicklung der Säurezahl von Sonnenblumenöl bei konstanter Erwärmung auf 85 °C (nach DU PLESSIS [25])	55
Abb. 12: Entwicklung der Viskosität (Messung bei 40 °C) von Sonnenblumenöl bei konstanter Erwärmung auf 85 °C (nach DU PLESSIS [25])	55
Abb. 13: Rapsstrohauffangversuch nach der Planenmethode	64
Abb. 14: Probenahme von Rapsstroh mit der Schwadzange	66
Abb. 15: Stroh- und Kornerträge von Winterrapssorten - Sortenvergleich Weihestephan; Jahrgänge '83, '85, '86	70
Abb. 16: Rapsstroh- und Kornertrag in den Erntejahren 1983, 1985 und 1986; 8 Sorten	72
Abb. 17: De- und Adsorptionsisothermen für Lieschgras (nach TUNCER aus [133])	78
Abb. 18: Feuchtgleichgewicht von Rapsstroh bei ca. 20 °C	79

Abb. 19:	Feuchtegleichgewicht von Rapsstroh bei ca. 30 °C .	79
Abb. 20:	Wiegevorrichtung zur Beobachtung des Trocknungs- verlaufs	82
Abb. 21:	Trocknungsverlauf von Rapsstroh im Schwad nach dem Drusch (Freising 1985)	83
Abb. 22:	Trocknungsverlauf von Rapsstroh im Schwad nach dem Drusch (Mittelwerte aus sechs Trocknungsrahmen)	84
Abb. 23:	Mindestlänge und Häufigkeit regenfreier Tages- perioden der Jahre 1948 - 1968 [73]	86
Abb. 24:	Leistungsaufnahme P_{el} beim Auflöse- und Häcksel- vorgang von Raps- und Weizenstroh	94
Abb. 25:	Siebanalysen von zerkleinertem Stroh (12-mm-Rundlochsieb)	95
Abb. 26:	Siebanalysen von zerkleinertem Stroh (6-mm-Rundlochsieb)	98
Abb. 27:	Drehmomentverlauf beim Häckseln von HD-Ballen von Raps- und Wintergerstenstroh	99
Abb. 28:	Abbrandkurve verschiedener Stroh Brennstoffe bei 750 °C (nach HELLWIG [116])	114
Abb. 29:	Prüfstand zur Erprobung von Heizkesseln und Einzelöfen	120
Abb. 30:	Schemazeichnung eines Unterbrandkessels für HD-Ballen	123
Abb. 31:	Kraftstoffmehrkosten in Abhängigkeit von Umrüstkosten und Nutzungsdauer	138

Verzeichnis der Abkürzungen

ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Bestimmtheitsmaß
Bq	Bergequote (%)
CO	Kohlen(mon)oxid
CO ₂	Kohlendioxid
CVS	Constant Volume Sampling/Sampler
ECU	European Currency Unit
FTP	Federal Test Procedure (USA)
HC	Hydrocarbons (dt. Kohlenwasserstoffe)
H _u	(Unterer) Heizwert (kJ/kg)
K	Grad Kelvin
LBP	Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau Freising-München
lfm	laufender Meter
meq	Milliäquivalent
NO _x	Sammelbegriff für die Stickoxide NO und NO ₂
ÖE	Öläquivalent (42 GJ/t)
P	Sicherheitswahrscheinlichkeit
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pfl./m ²	Zahl der Pflanzen pro Quadratmeter
ppm	Parts per Million
rel.	relativ
RME	Rapsölmethylester
s	Standardabweichung
Str _{auf}	vom Mähdrescher aufgenommene Strohmenge
Str _{ernt}	erntbare Strohmenge
TS	Trockensubstanz
U	Feuchtegehalt (Gew.-%)
US 75	USA - Abgasprüfverfahren ab MY 75
\bar{x}	Mittelwert
%	Gewichtsprozent (wenn nicht anders angegeben)
ρ	Dichte (kg/m ³)
μmol	Mikromol
00-Raps	Rapsorte mit geringem Erucasäureanteil im Öl und geringem Glucosinolatgehalt im Schrot (double low)
HI	Harvest Index; HI = ökonomisch verwertbarer Ertrag/ oberirdische Pflanzenmasse. In neuerer Literatur wird nun häufig der Begriff HI anstatt dem Korn- Stroh-Verhältnis verwendet

1. Einleitung

1.1 Einführung

Die Produktion von Agrarprodukten hat in der Europäischen Gemeinschaft (EG) stetig zugenommen. Aufgrund eines stagnierenden Absatzmarktes führte diese Entwicklung zu Beginn der achtziger Jahre auch auf dem Getreidesektor zu einem Anstieg des Selbstversorgungsgrades über die 100 %-Marke; derzeit wird etwa 16 % mehr Getreide erzeugt als im Binnenmarkt verbraucht wird; bei Weichweizen sind es 40 %. Bereits zuvor überschritt die Milchproduktion (vor 1973), die Weißzuckerproduktion (1976) und die Rindfleischerzeugung (1978) den Verbrauch, wie aus Abbildung 1 (Säulendarstellung) hervorgeht [43, 55, 14].

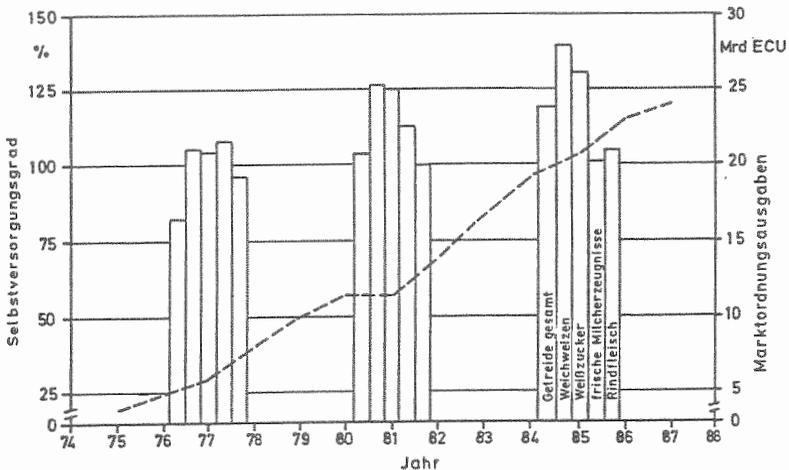


Abb. 1: Entwicklung der Überschußproduktion (1977/'81/'85) und der Marktordnungskosten in der Europäischen Gemeinschaft (nach SCHÄFER [43] und [55])

Bei Einbeziehung der Importe in die EG liegt die Überschußproduktion bei bestimmten Produkten bis zu 40 % über dem Verbrauch und verursacht ständig ansteigende Agrarmarktausgaben. Für die Lagerhaltung und Beseitigung der nicht in der EG verbrauchten Mengen mußten 1987 rund 24 Mrd. ECU (ca. 52 Mrd. DM) aufge-

wendet werden [14]. Trotz produktionsbeschränkender Maßnahmen im Milch- und Zuckerbereich stiegen die Marktordnungskosten an und werden vermutlich weiter steigen (s. Abbildung 1).

Da nahezu alle Mitgliedsländer der EG Netto-Energieimporteure sind [126], wird in der Produktion von Energieträgern auf "Überschußflächen" eine Lösungsmöglichkeit zur Entlastung des Nahrungsmittelsektors gesehen. Gemessen am möglichen Produktionspotential würde sich für die Landwirtschaft ein nicht zu sättigender Absatzmarkt eröffnen, wie Abbildung 2 verdeutlicht.

Wäre es möglich, auf der von SCHÄFER und HEIDRICH 1984 [43] in einer Studie mit 10 Mio. ha veranschlagten "Überschußfläche" pro Hektar und Jahr ein Energieäquivalent von drei Tonnen Rohöl zu erzeugen, so könnten nur 6,9 % des 1984 verbrauchten Rohöls [126] ersetzt werden. Andererseits wäre es möglich, den gesamten Rohölbedarf der Landwirtschaft selbst zu decken.

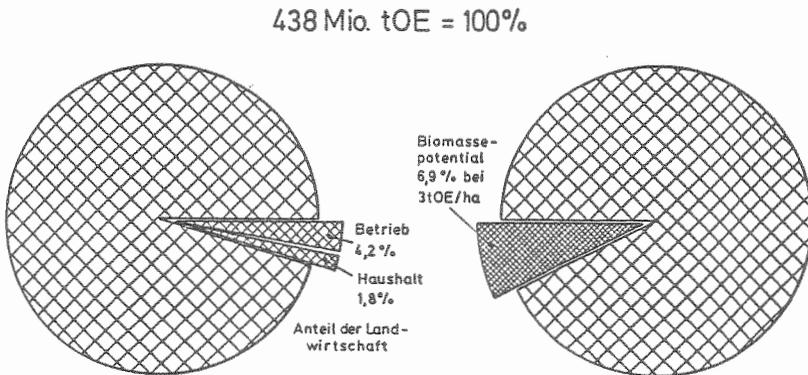


Abb. 2: Rohölverbrauch der EG (12) 1984 mit Anteil der Landwirtschaft und mögliches Biomasseproduktionspotential auf 10 Mio. ha (nach SCHÄFER [43], [55] und [126])

Auch auf der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche der EG von 132 Mio. ha könnte bei obigen Annahmen der jährliche Rohölbedarf nicht gedeckt werden; 10 Mio. ha entsprechen 7,6 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche der EG (12).

Durch eine dezentrale landwirtschaftliche Energieproduktion würde eine weitere Diversifizierung der Energieversorgung erreicht und die Importabhängigkeit von fossilen Energieträgern wie Rohöl, Kohle und Gas reduziert. Zusätzlich ergäbe sich eine höhere Reichweite der fossilen Energieresourcen.

Desweiteren führe die Energiebereitstellung über Biomasse zu einem geschlossenen Kreislauf von Kohlendioxid, da die Kohlenstoffeinlagerung bei Pflanzen nach AMBERGER 1979 [3] ausschließlich aus dem CO_2 der Luft erfolgt. Kohlendioxid gilt als "Treibhausgas", das die Infrarot-Strahlung vom Erdboden in den Weltraum verhindert und eine Temperaturerhöhung auf der Erde von 1,5 bis 4,5 Grad in den nächsten hundert Jahren erwarten läßt. Durch die Nutzung fossiler Brennstoffe ist der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre in den letzten zwei Jahrhunderten von 280 auf 345 ppm gestiegen [28]. Um eine starke Klimaveränderung zu verhindern, müßte ein weiterer Anstieg der CO_2 -Konzentration gestoppt werden, was unter anderem durch Wärme- und Kraftherzeugung aus Biomasse bewirkt werden könnte.

Derzeit werden in Europa vier Verfahren zur Energieträgerproduktion diskutiert [38]:

- Anbau von ölhaltigen Pflanzen (Pflanzenöl- und Brennstoffproduktion)
- Anbau von stärke- und zuckerhaltigen Pflanzen (Äthanol- und Brennstoffproduktion)
- Anbau von jährlich erntbaren kohlehydrathaltigen Pflanzen (Brennstoffproduktion)
- Anbau von schnellwachsenden Baumarten wie Weiden und Pappe (Brennstoffproduktion)

Während mit den beiden letztgenannten Produktionsverfahren sinnvollerweise nur Festbrennstoffe erzeugt werden, wird bei den erstgenannten Verfahren vor allem auf die Gewinnung von flüssigen Energieträgern abgezielt.

Da für die Pflanzenölgewinnung aus Ölsaaten bereits bestehende Extraktionsanlagen genutzt werden könnten und die Gewinnung des Energieträgers sehr umwelt- und entsorgungsfreundlich ist, verdient diese Produktionsrichtung besondere Beachtung. In den nördlich gelegenen Mitgliedsländern der Europäischen Gemein-

schaft kommt für die Ölerzeugung hauptsächlich der Rapsanbau in Frage. Bei dieser Pflanze besteht die Möglichkeit, sowohl das Öl als auch das Stroh als Energieträger zu nutzen.

1.2 Problemstellung und Ziel

Bei bisherigen Veröffentlichungen zur Energieträgerverwertung aus der Rapspflanze wurde nur die Komponente Rapsöl behandelt [81, 122, 31, 123, 105]. In dieser Arbeit soll die energetische Nutzung zweier Bestandteile der Rapspflanze untersucht werden. Es wird sowohl

- der flüssige Energieträger Rapsöl, als auch
- der feste Brennstoff Rapsstroh

behandelt.

Rapsöl kann als Kraftstoff in Dieselmotoren und als Brennstoff in Ölfeuerungsanlagen eingesetzt werden. Nach Sichtung der vorliegenden Literatur ergibt sich für diese Verwertungsmöglichkeiten Untersuchungsbedarf für folgende Bereiche:

- a) Für Dieselkraftstoff sind die physikalischen und chemischen Kennwerte in der DIN-Norm 51 601 [144] festgelegt. Für Pflanzenöl als Kraftstoff gibt es keine Norm. Bei der Beurteilung von Rapsöl als Kraftstoff muß die Norm für Dieselkraftstoffe als Maßstab angelegt werden. Bei VELLGUTH [122], PETERSON et al. [81] u.a. werden jeweils nur Einzelergebnisse für Rapsöl angegeben. Es ist notwendig, diese Einzelergebnisse zusammenzustellen, um die Bandbreite der einzelnen Kenngrößen zu erfassen und mit Dieselkraftstoff in Vergleich zu setzen.
- b) In verschiedenen Ländern wurden Versuche mit Pflanzenölen als Kraftstoff in Dieselmotoren durchgeführt [81, 122, 31, 123, 105]. Die meisten Motortestläufe erfolgten mit Sonnenblumen- und Sojaöl. Nur vereinzelt an verschiedenen Stellen wurde auch Rapsöl verwendet. Ein Gesamtüberblick der mit Rapsöl als Dieselölersatz erzielten Versuchser-

gebnisse ist in der Fachliteratur nicht zu finden. Deshalb soll in dieser Arbeit eine Zusammenstellung dieser Versuche erfolgen.

- c) Versuchsergebnisse rapsölbefuerter Anlagen sind in der Literatur nicht zu finden. Da Ölfeuerungsanlagen im Vergleich zu Motoren einfache technische Geräte mit konstanten Betriebsverhältnissen sind, erscheint auch der Einsatz in diesem Bereich untersuchenswert. Rapsöl als Heizölersatz muß ebenfalls mit den Normwerten für flüssige Brennstoffe nach DIN 51 603 [145] verglichen werden. Nach Untersuchungen von OLSON [74] und DU PLESSIS [25] muß wegen der ungesättigten Verbindungen bei Pflanzenölen mit der Neigung zur Polymerisierung gerechnet werden, die zu Schleim- und Lackbildung führen kann. FULS [30] berichtet auch von Beeinträchtigung von Kunststoffen und Gummi durch Sonnenblumenöl und deren Derivat. Es ist erforderlich, diese Informationen über Lager- und Materialverhalten zu sammeln, um Rückschlüsse für die Lagerung von Rapsöl ziehen zu können.

Für die Rapspflanze im Zwischenfruchtanbau und zur Verfütterung als Frischpflanze sind Verfahrensdaten in Standardwerken der Literatur angegeben [92, 21]. Genauere Daten über Rapsstrohmengen zum Zeitpunkt der Kornvollreife waren nicht zu finden. Aufgrund des fast vollständigen Blattverlustes bis zum Drusch und der spröden Struktur des Halmes sind Erfahrungen bezüglich Trocknungsverhalten und Erntbarkeit aus der Getreidestroh- und Heuernte nicht übertragbar. Deshalb sind hierzu experimentelle Versuche erforderlich, um

- a) Informationen über aufwachsende Rapsstrohmengen zum Druschzeitpunkt zu erhalten und
- b) Kenntnisse über Trocknungseigenschaften und Bergeverfahren zu gewinnen sowie Aufbereitungsverfahren als Brennstoff zu untersuchen.

- c) Die Bestimmung feuerungstechnischer Kenngrößen und Versuche zur Verbrennung sind notwendig, um Feuerungsanlagen dem Brennstoff Rapsstroh optimal anzupassen.

Das Hauptziel der Arbeit wird es sein, abgesicherte Angaben über die technischen Möglichkeiten zusammenzustellen und die Durchführbarkeit der Energiegewinnung aus der Rapspflanze zu untersuchen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll eine Abschätzung der Kosten dieser Produktionslinie durchgeführt werden.

Im ersten Schwerpunkt der Arbeit wird der flüssige Energieträger Rapsöl behandelt. Als Teilziele sind zu sehen:

- Vergleich und Wertung von Rapsöl als Kraft- und Brennstoff anhand der bestehenden Normen
- Zusammenstellung und Wertung der mit Rapsöl durchgeführten Motorenversuche
- Ermittlung von Kennwerten bei der Verbrennung von Rapsöl in Ölfeuerungen

Für das Erreichen der beiden ersten Teilziele wird auf Literaturergebnisse zurückgegriffen. Zur Rapsölverbrennung war die Durchführung von Versuchen notwendig.

Die Fragen zum Schwerpunkt Energieträger Rapsstroh müssen ebenfalls auf experimentellem Weg beantwortet werden. Als Teilziele sind zu nennen:

- Ermittlung aufwachsender und erntbarer Rapsstrohmengen
- Bestimmung deren feuerungstechnischer Kenngrößen
- Erzeugung von Wärme in Feuerungsanlagen

Bei der Energiegewinnung aus Rapsstroh wird nur die Verbrennung berücksichtigt, da es sich um das einfachste und effizienteste Verfahren der Energieumsetzung handelt.

2. Energieträger Rapsöl

Rapsöl wird derzeit hauptsächlich für Nahrungszwecke verwendet. Aus diesem Grund sind seine chemischen und physikalischen Kennwerte weitgehend bekannt. Im folgenden Kapitel soll die Zusammensetzung des Öls behandelt und ein Vergleich mit Kennwerten von flüssigen Kraft- und Brennstoffen durchgeführt werden. Desweiteren werden Versuche mit Rapsöl als Kraftstoff in Dieselmotoren und als Brennstoff in Heizkesseln zusammengefaßt und bewertet. Die Öllagerung, die Mischungs- und Materialverträglichkeit werden abschließend angesprochen.

2.1 Herkunft und chemische Zusammensetzung von Rapsöl

Das Rapsöl ist Bestandteil des in einer Schote enthaltenen, kugelförmigen Samenkorns der Rapspflanze. Das Korn hat im Zustand der Vollreife einen Durchmesser von 1,5 - 3,0 mm und eine dunkelbraune bis schwarze Farbe. Es besteht in lagerfähigem Zustand aus den in Abbildung 3 quantifizierten Komponenten.

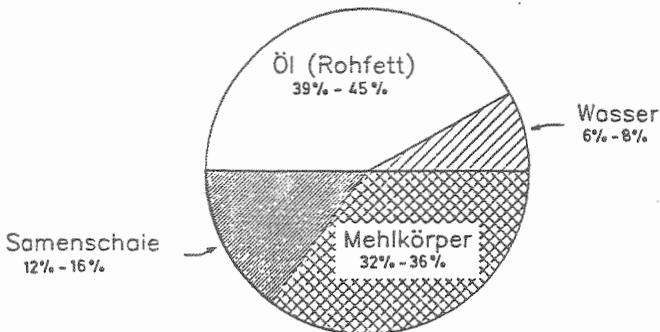
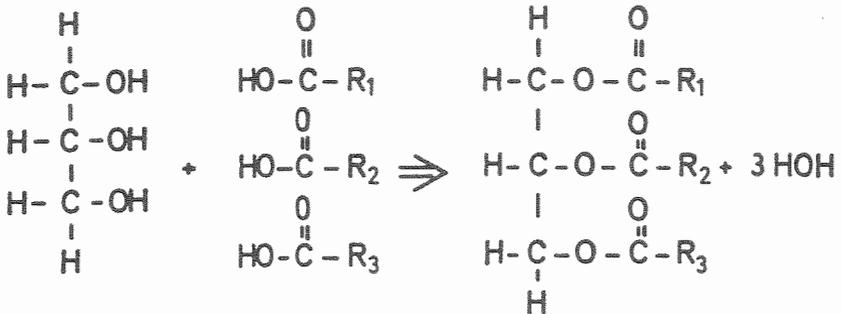


Abb. 3: Bestandteile eines Rapskorns [6]

Von der chemischen Zusammensetzung her ist das Rapsöl, wie alle Fette und fetten Öle, ein Glycerid, bestehend aus dem dreiwertigen Alkohol Propantriol-1,2,3 (Trivialname Glycerin) und

einer, zwei oder drei Fettsäuren. Zu 95 - 98 % ist ein Fettmolekül mit drei Fettsäuren besetzt (s. Abbildung 4). Die Fettsäuren setzen sich überwiegend aus geradzahligem Kohlenwasserstoffketten (meist 16 - 22 C-Atome) und einem Carboxylrest zusammen [87, 118]. Die Art der Bindung des dreiwertigen Alkohols mit den Fettsäuren wird als Esterbindung bezeichnet [119, 18].



Glycerin + 3Fettsäuren \Rightarrow Triglycerid + Wasser

Abb. 4: Bildung eines Fettmoleküls [18]

Sind alle Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) des Glycerins mit Fettsäuren besetzt, so ergibt sich für das wasserabstoßende (hydrophobe) Molekül ein Molekulargewicht von 800 - 1000 [106] ($\text{C}_{54}\text{H}_{114}\text{O}_6$). Im Vergleich hierzu hat Dieselöl mit der Summenformel $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ein Molekulargewicht von nur 226.

Stark ölhaltige Kulturpflanzen zeichnen sich meist durch eine charakteristische Häufung bestimmter Fettsäuren aus. Bei Rapsölen älterer Sorten war die Erucasäure mit 40 - 64 % Hauptbestandteil des Öls. Bei den nach 1973 in Europa angebauten Rapsorten liegt die Ölsäure mit 54 - 64 % an erster Stelle, gefolgt von der Linolsäure mit 16 - 22 % und der Linolensäure mit einem Anteil um 10 %. Genauere Zahlenangaben sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Angaben der verschiedenen Autoren enthalten zum Vergleich auch Werte für Soja- und Sonnenblumenöl. Die Werte der

Einzeluntersuchungen bei Rapsöl (Zeile 2 - 9) sind nach dem Jahr der Veröffentlichung gereiht.

Der hohe Erucasäuregehalt älterer, in Europa angebauter Raps-sorten (vor 1973, s. Zeile 1) führte bei Verwendung für Nah-rungszwecke zu krankhaften Veränderungen der Herzmuskulatur [61] und wurde aus diesem Grunde bei Neuzüchtungen auf einen Anteil von drei Prozent und weniger reduziert. Der Anbau dieser neueren sogenannten 0-Sorten wird heute jedoch noch nicht in allen Ländern realisiert, wie das aus den USA stammende Unter-suchungsergebnis von 1981 [80] aus Tabelle 1, Zeile 2 belegt.

Da jedoch zur Beurteilung von Fetten und fetten Ölen früher nicht ständig die aufwendige Bestimmung der Fettsäurezusammen-setzung durchgeführt werden konnte, die heute gaschromatogra-phisch ermittelt wird, wurden und werden teilweise noch heute, um bestimmte Eigenschaften wiederzugeben, chemische Kennzahlen verwendet. Dabei sind diese als äquivalente Mengen bestimmter Reagentien definiert, die mit bestimmten funktionellen Gruppen der Lipide reagieren [118]. Es sind dies

- die Verseifungszahl,
- die Jodzahl und
- die Säurezahl.

Die Verseifungszahl (VZ) dient als Maß für die mittlere Ket-tenlänge der Fettsäuren. Bei Rapsöl liegt die Verseifungszahl nach THOMAS 1976 [118] zwischen 174 und 182 mg KOH/g Fett.

Die Jodzahl (JZ) ist ein Maß für den Grad der Sättigung der Fettsäuren, also für die Zahl der Doppelbindungen im Fettmo-lekül. Sie lag im Bereich von 94 - 110 g Jod/100 g Öl [96, 118] bei erucasäurehaltigem Rapsöl und steigt bei den neueren 0-Sorten wegen des größeren Ölsäureanteils auf 110 - 115. Mit diesen Werten wird das Rapsöl unter die "nicht trocknenden" Öle eingeordnet, d.h. unter die Pflanzenölgruppe, die nur geringe Neigung zur Oxidation gegenüber Luftsauerstoff zeigt.

Tab. 1: Fettsäurezusammensetzung von Rapsöl und anderen Pflanzenölen nach Angaben verschiedener Autoren

Pflanzenöl [Quelle]	Fettsäureanteile in Gew.-% (Zahl Kohlenstoffe ; Zahl der Doppelbindungen)							
	Palmitins. (16:0)	Stearins. (18:0)	Ölsäure (18:1)	Linolsäure (18:2)	Linolens. (18:3)	Eicosans. (20:0)	Eicosens. (20:1)	Erucas. (22:1)
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Rapsöl [61]	1 - 5	1 - 4	13 - 38	10 - 22	1 - 10			40 - 64
2 Rapsöl [80]	3,2	1,1	14,8	12,7	-		17,7	46,7
3 Rapsöl ^s [80]	4,4	1,8	59,8	20,6	11,1		-	0,9
4 Rapsöl [105]	5,0	1,8	60,8	21,1	8,3	0,6	1,6	0,1
5 Rapsöl [134]	4,7	1,2	60,2	15,4	11,6	0,8		2,5
6 Rapsöl [134]	5,1		54,9	18,9	-	9,9	-	6,0
7 Rapsöl [35]	3,5	0,9	64,4	22,3	8,2	0	0	0
8 Rapsöl*	5,7	1,7	61,6	21,9	7,9	0,2		0,2
9 Rapsöl ^{oo*}	5,0	1,4	60,9	21,1	10,7	0,2	0	0
10 Rapsöl [61]	4 - 5	1 - 2	55 - 63	20 - 31	9 - 10		-1	-3
11 Sojaöl [61]	2 - 10	2 - 6	23 - 31	49 - 52	2 - 11			
12 Sojaöl [25]	10,5	3,2	22,3	54,5	8,3	0,2	0,9	
13 Sonnenblumenöl [61]	3 - 7	1 - 3	14 - 43	44 - 68				
14 Sonnenblumenöl [25]	7,6	5,1	22,0	63,2	0,3	0,5	0,1	

* eigene Untersuchungen; ^{oo} OO-Sorte; ^s = Sommerraps

Der Bestimmung des Gehaltes an freien Fettsäuren in Ölen dient die Säurezahl (SZ). Aus ihrem Wert kann sowohl auf den Reifezustand und den Reifegrad der ursprünglichen Öl Saat als auch auf das Alter bzw. die Lagerbedingungen eines Pflanzenöls geschlossen werden. Bei raffinierten Ölen liegt die Säurezahl unter 0,4 mg KOH/g Fett. Liegen die Werte bei frisch gewonnenen Ölen darüber, so handelt es sich meist um rohe bzw. nicht entsäuerte Öle.

Ebenfalls Maßzahlen für die Ölqualität sind die Peroxid- und die Anisidinzahl, die über die Degradierung des Öls Auskunft geben.

Die Peroxidzahl ist Gradmesser für den oxidativen Verderb von Ölen und Fetten. Sie wird als aufgenommene Milliäquivalente (meq) Peroxidsauerstoff pro 1 000 g Fett angegeben. Bei nicht raffinierten frischen, unverdorbenen Ölen liegt sie unter dem Wert 3, i. d. R. zwischen 0,5 und 1,5 meq/1 000 g. Durch die Raffination sinkt die Peroxidzahl fast auf Null und steigt erst langsam bei ungünstigen Lagerungsbedingungen wieder an [78].

Zur Bestimmung der bei der Autoxidation, d.h. langsamen Oxidation durch Luftsauerstoff entstehenden Carbonylverbindungen wird die Anisidinzahl (früher Benzidinzahl) herangezogen. Sie ist somit ein Mittel zur Beurteilung der Frische von pflanzlichen Ölen. Im Gegensatz zur Peroxidzahl verringert sich die Anisidinzahl bei der Raffination nicht, so daß dadurch eine Verwendung bereits stark voroxidiertes Rohöl nachgewiesen werden kann [78].

Die beiden erstgenannten chemischen Kennzahlen, die Verseifungs- und die Jodzahl, nehmen direkten Einfluß auf die physikalischen Größen Viskosität und Dichte.

Die kinematische Viskosität drückt eine intermolekulare Wechselwirkung der Fettsäureketten aus. Nach THOMAS 1976 [118] nimmt die kinematische Viskosität mit zunehmendem Sättigungsgrad (Jodzahl JZ) und zunehmender Kettenlänge (Verseifungszahl VZ) geringfügig zu. Diese Aussage wird bestätigt durch die Werte (bei 20 °C) von 98 und 86 mm²/s (früher cSt) bei eruca-

säurehaltigen Rapsorten (s. Tabelle 1, Zeile 3) und Werte von 65 - 76 mm²/s bei den hauptsächlich Ölsäure enthaltenden neueren Sorten.

Derselbe Zusammenhang gilt auch für die Dichte von Rapsöl. Sie sinkt mit zunehmender Molekülmasse (= Kettenlänge) und mit der Anzahl der Doppelbindungen. Zur Abschätzung der Dichte @ gilt nach THOMAS folgende Gleichung (I):

$$\text{@} = 0,8475 + 0,0003 \cdot \text{VZ} + 0,00014 \cdot \text{JZ} \quad (\text{I})$$

Bei 15 °C beträgt die Dichte @ zwischen 0,91 und 0,92 g/ml.

2.2 Energetische Verwertung von Rapsöl als Kraftstoff

Rapsöl wurde bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts als Brennöl für Lampen verwendet [61]. Auch Rudolph Diesel, der Konstrukteur des nach ihm benannten selbstzündenden Motors, hat um die Jahrhundertwende Erdnußöl als Kraftstoff für seine Motoren benutzt und somit die grundsätzliche Eignung der Pflanzenöle für Verbrennungsmotoren nachgewiesen [81].

2.2.1 Kraftstoffspezifische Kenngrößen von Rapsöl

Eines der Hauptkriterien für die Beurteilung eines Energieträgers ist der Heizwert H_U . Nach den Erdölprodukten weist Rapsöl, das hier als Vertreter für Fette und fette Öle steht, den höchsten Heizwert H_U mit 35,8 MJ/kg auf. Er liegt gewichtsbezogen 16 bzw. 18 % unter dem Wert für Dieselkraftstoff bzw. Benzin. Wird der Energiegehalt eines Stoffes auf sein spezifisches Gewicht @ bezogen so ergibt sich als volumenbezogene Größe die "Energiedichte". Mit 32,9 MJ/l liegt der Wert von Rapsöl nur 7 % unter dem Wert von Dieselkraftstoff und sogar 3 % über dem von Benzin.

Im Vergleich zu anderen alternativen flüssigen Kraftstoffen weisen Pflanzenöle die höchsten Energiedichten auf. In Tabelle 2 sind Summenformeln, Heizwerte und Dichten von verschiedenen

biogenen und konventionellen flüssigen Energieträgern angegeben.

Tab. 2: Summenformeln, Heizwerte und Dichten von flüssigen Energieträgern

	Einh.	Methanol	Äthanol	Rapsöl	Diesel	Benzin
Su.-formel		CH ₄ O	C ₂ H ₆ O	C ₅₄ H ₁₁₄ O ₆	C ₁₆ H ₃₄	C ₈ H ₁₈
Spalte 1	2	3	4	5	6	7
Heizwert H _U	MJ/kg	19,7	26,8	35,8	42,3	43,5
	MJ/l	15,5	21,1	32,9	35,2	31,7
Dichte ρ*	g/ml	0,79	0,79	0,92	0,83	0,73

Quelle: 230, 229, 226; * bei 15 °C

Die hohe Energiekonzentration bei Pflanzenölen ist im Vergleich zu Methanol und Äthanol durch den geringen Sauerstoffanteil im Molekül mit elf Gewichtsprozenten bedingt. Während die fossilen Energieträger Diesel- und Heizöl weitgehend frei von Sauerstoff sind, enthalten Methanol 50 % und Äthanol ca. 35 % Sauerstoff, was den Anteil an den brennbaren Elementen Kohlen- und Wasserstoff verringert. Die Energiedichte nimmt beispielsweise direkten Einfluß auf die konstruktive Gestaltung von Fahrzeugen bzw. die Dimensionierung der Kraftstoffvorratsbehälter und bestimmt darüber hinaus entscheidend die Transportkosten für die Verteilung des Kraftstoffes.

Neben der Energiedichte sind für die energetische Nutzung eines Stoffes noch weitere Kennwerte bedeutend. Für Kraft- und Brennstoffe sind diese Kennwerte in den DIN-Normen festgelegt. Nachfolgend werden diese Kennwerte und ihre Bedeutung besprochen und über die Betriebserfahrungen bei der Verwendung als Kraft- und Brennstoff berichtet, soweit sie für die Betrachtungen von Rapsöl als Energieträger relevant sind.

2.2.1.1 Reines Rapsöl

Ein Vergleich verschiedener technischer, in der DIN-Norm für Dieselkraftstoff (DIN 51 601) festgelegter Kennwerte mit den Werten des Rapsöls (s. Tabelle 3) zeigt starke Abweichungen bei der Viskosität, der Zündwilligkeit, der Flammpunkttemperatur und der Filtrierbarkeit bei niedrigen Temperaturen.

Tab. 3: Normanforderungen an Dieselöl und entsprechende Kennwerte von Rapsöl nach verschiedenen Autoren

Kennwert	Einh.	Diesel ¹	Rapsöl						
			4	5	6	7	8	9	10
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dichte @ (15 °C)	g/ml	0,815 - 0,855	0,92	0,921	0,91	0,921	0,911	0,914 - 0,922	0,92
Kin. Viskosität (20 °C)	mm ² /s	2 - 8	75	76	86	-	-	66 - 72	75
Flammpunkt	°C	> 55	265	-	-	232	246	303-318	240
Filtriergrenze	°C	02- < -12 ³ > 45	-	-	-	-	-3,9	12 - 18	-9
Cetanzahl CZ			> 42	-	-	-	37,6	37,6	33,5
Koksrückstand	%	< 0,1	-	-	-	0,224	0,30	-	-
Schwefelgehalt	%	< 0,30	-	-	-	-	-	-	-
Autor			[79]	[134]	[80]	[105]	[35]	[77]	[113]

1) nach DIN 51 601; 2) Sommer; 3) Winter

Die Dichte von Rapsöl mit 0,91 - 0,92 g/ml ist sechs bis elf Prozent höher als es die Norm DIN 51 601 für Dieselkraftstoffe vorgibt.

Die kinematische Viskosität von Rapsöl bei 20 °C übersteigt den geforderten Mindestnormwert um den Faktor 9 - 14. Sie wird auch als Zähigkeit bezeichnet und ist ein Maß für den Widerstand, den zwei benachbarte Teilchen eines Stoffes gegenüber ihrer Verschiebung aufweisen [2]. Der Kennwert läßt auf Pump-, Fließ- und Zerstäubungsverhalten einer Flüssigkeit schließen. In Abbildung 5 ist der Viskositätsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Pflanzenöle und Diesel aufgetragen.

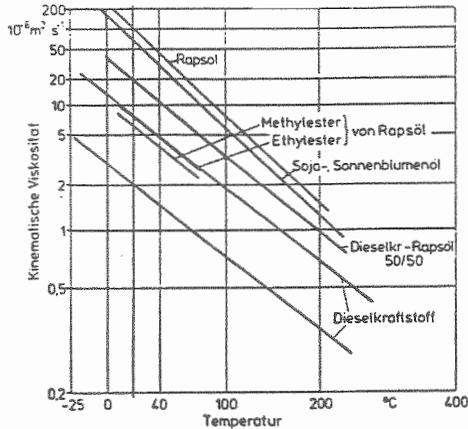


Abb. 5: Viskositätsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur bei Pflanzenölen und Dieselöl (nach VELLGUTH [122])

STECHER 1981 [110] bestimmte für den Viskositätsverlauf von Rapsöl in Abhängigkeit von der Temperatur folgende Gleichung (II), deren Geltungsbereich 20 - 100 °C umfaßt:

$$v = 133 - 4,7 \cdot t + 0,074 \cdot t^2 - 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 \quad (\text{II})$$

Hierin sind:

v = kinematische Viskosität in mm^2/s
 t = Temperatur in °C

Der Flammpunkt dient meist als ein Kennwert zur Einordnung in Gefahrenklassen von Stoffen. Er ist als diejenige Temperatur definiert, bei der die Gase über der erwärmten Flüssigkeitsoberfläche mit deutlicher Flammenbildung zünden. Bei Rapsöl liegt der Flammpunkt durchwegs über 200 °C und übersteigt damit den geforderten Mindestnormwert von 55 °C bei weitem. Pflanzenöle sind als schwer entflammare Flüssigkeiten eingestuft und keiner Gefahrenklasse zugeordnet.

Der Grenzwert der Filtrierbarkeit (CFPP), meist auch mit dem optisch ermittelten Trübungspunkt (engl. Cloudpoint) gleichgesetzt, ist diejenige Temperatur, bei der die Ölprobe Paraffin und/oder andere feste Körper ausscheidet. Von praktischer Bedeutung sind diese Grenzwerte im Hinblick auf mögliche Filter- und Leitungsverstopfungen, die die Funktionssicherheit des Motors bei niedrigen Temperaturen beeinträchtigen.

Für den Grad der Zündwilligkeit in Dieselmotoren steht die in einem Prüfmotor ermittelte Cetanzahl. Mit einem Wert von ca. 52 [121] übertrifft handelsüblicher Dieselkraftstoff den Mindestnormwert (>45), während Rapsöl mit ca. 37 rund acht Punkte darunter liegt und somit nicht so zündfreudig ist, was sich insbesondere beim Starten mit kaltem Motor negativ bemerkbar macht.

Durch die Vorgabe von Siedegrenzen kann aus dem Rohöl ein gewünschter Fraktionsbereich mit eng begrenzten Eigenschaften definiert werden. Die Siedeverlaufskurve von Rapsöl liegt bis zu 100 K über der von Dieselkraftstoff, wie Abbildung 6 verdeutlicht.

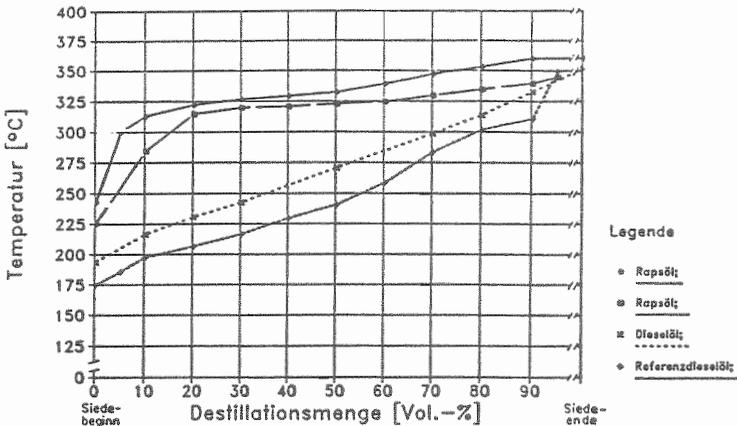


Abb. 6: Siedeverlauf von Rapsöl und Dieselkraftstoff [105, 35, 61, 130]

Der Siedepunkt (= Siedebeginn) von Rapsöl liegt 50 bis 80 K über dem von Dieselöl mit 150 bis 200 °C. Während beim fossilen Kohlenwasserstoff die Destillationskurve wegen der unterschiedlichen Kettenlängen fast linear bis etwa 360 °C ansteigt, ergibt sich ein sehr steiler Anstieg bis 20 Vol.-% und ab 320 bis 360 °C ein sehr flacher Verlauf beim Pflanzenöl. Der größte Teil (Triglyceride) des pflanzlichen Öls verdampft demnach erst bei hohen Temperaturen, was vermutlich durch die hohe Molekülmasse bedingt ist. Die DIN 51 601 fordert eine maximal verdampfte Menge von 65 Vol.-% bis 250 °C und eine minimal verdampfte Menge von 85 Vol.-% bis 350 °C. Diese Vorgaben werden von Rapsöl erreicht.

Die Neigung von Mineralölen zur Bildung von Koksrückständen wird nach einem von Conradson entwickelten Testverfahren ermittelt. Dabei wird eine Probe unter Luftabschluß verdampft und der verbleibende Rest als Koksrückstand definiert. Nach DIN 51 601 soll der Massenanteil 0,1 Gew.-% nicht überschreiten. Für rohes Rapsöl gibt SIMS 1982 [105] einen Wert von 0,224 % und GOERING et al. 1982 [35] für entschleimtes Rapsöl 0,30 % an. Nach letzterem Autor weisen zehn andere Pflanzenöle Verkokungsrückstände von 0,22 bis 0,27 Gew.-% auf. Im Gegensatz zu den deutschen Normwerten gibt die American Society for Testing and Materials (ASTM) in ihrem Standard für Dieselkraftstoff No. 2 einen Anteil von weniger als 0,35 % Koksrückstand vor. Wird berücksichtigt, daß von der Bundesrepublik Deutschland in die USA exportierte Dieselmotoren mit der Qualität Diesel No. 2 problemlos betrieben werden können, so dürfte auch der bei Pflanzenölen höhere Wert keine Betriebsstörungen verursachen.

Ein Punkt, der sehr für den Einsatz des Pflanzenöls als Energieträger spricht, ist der nur in Spuren vorhandene Schwefel im Rapsöl (12 - 500 ppm; [58]) gegenüber einem zulässigen Höchstwert nach DIN von maximal 0,3 % (= 3000 ppm) bei Dieselöl. Seit dem 01. April 1988 darf der Schwefelgehalt im Dieselkraftstoff nur noch 0,2 % betragen.

Da reines Rapsöl die Werte der DIN-Kraftstoffnorm in mehreren Punkten überschreitet, sind Probleme beim Einsatz als Diesel-

kraftstoffersatz nicht auszuschließen. Aus diesem Grunde könnte eine Änderung des Fettmoleküls eine geeignete Abhilfemaßnahme sein.

2.2.1.2 Rapsölester

Um Pflanzenöle bezüglich Viskosität und Dichte, aber auch hinsichtlich ihres Zerstäubungsverhaltens und der Zündwilligkeit stärker an Dieselkraftstoff anzupassen, muß das Fettmolekül umgebaut werden. Dabei wird ein Mol Triglyzerid mit drei Molen eines einwertigen Alkohols (eine OH-Gruppe) unter Beisein eines Katalysators zu drei Molen Monoalkoholester und einem Mol Glycerin umgesetzt. Da bei diesem Prozeß nur ein dreiwertiger Alkohol gegen drei einwertige Alkohole ausgetauscht wird und die Bindungsform die gleiche bleibt, wird dieser Prozeß als Umesterung bezeichnet. In Abbildung 7 ist die chemische Reaktion dargestellt.

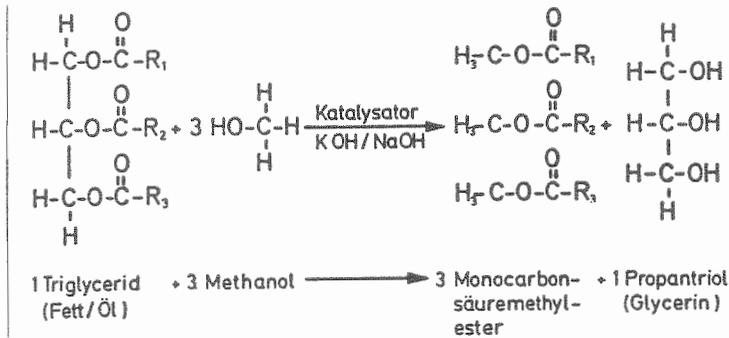


Abb. 7: Umesterung eines Triglyzerids mit Methanol

Aus den Molekulargewichten der verwendeten Stoffe läßt sich das stöchiometrische Massenverhältnis berechnen. Bei Verwendung von Methanol entstehen aus

100 kg Rapsöl + 11 kg Methanol \longrightarrow 100 kg Methylester + 11 kg Glycerin.

Wird Äthanol als einwertiger Alkohol verwendet, so entstehen aus

100 kg Rapsöl + 16 kg Äthanol \implies 105 kg Äthylester + 11 kg Glycerin.

Zur Beschleunigung der Reaktion werden 60 - 70 % mehr Alkohol zugegeben als stöchiometrisch notwendig ist. Um die Reaktion in Gang zu bringen, kann Natrium- [30] oder Kaliumhydroxid [67] als Katalysator verwendet werden. PULS 1983 [30] berichtet auch von Untersuchungen mit Schwefelsäure und Para-Toluol-Schwefelsäure, die gute katalytische Wirkung zeigen, jedoch schwer aus den Lösungen zu entfernen sind; Spuren dieser Säuren wirken sehr korrosiv auf Metalle und bereiten deshalb Probleme bei der Verwendung als Kraftstoff.

Derzeit versuchen mehrere Firmen und Institute in der Bundesrepublik Deutschland, Österreich und der Republik Südafrika, weitgehend automatisierte Umesterungsanlagen für Tagesdurchsatzleistungen von ca. 3 000 kg Öl zu entwickeln. Die in großtechnischem Maßstab erzeugten Pflanzenölester finden momentan ausschließlich in der chemischen Industrie Verwendung.

Das durch den Prozeßschritt der Umesterung mit einwertigem Alkohol entstehende Rapsölester weicht nur noch bezüglich Dichte und Filtrierbarkeit von den Normwerten für Dieselkraftstoff ab, wie aus Tabelle 4 hervorgeht. Viskosität und Cetanzahl liegen im Geltungsbereich der DIN-Norm.

Durch den molekularen Umbau kann die Dichte von Rapsölmethylester um ca. 5 %, auf 0,88 kg/l gegenüber Rapsöl mit 0,92 kg/l verringert werden. Damit liegt sie nur rund 3 % über dem höchstzulässigen DIN-Wert für Dieselöl.

Die größte Veränderung ergibt sich bei der Viskosität. Mit 6 - 8 mm²/s bei RME wird sie um den Faktor 10 reduziert und entspricht damit noch knapp den für Dieselkraftstoff geforderten Werten.

Tab. 4: Normanforderungen an Dieselöl und entsprechende Kennwerte von Rapsölmethylester (RME) nach verschiedenen Autoren

Spalte 1	Kenzwerte	Einh.	Diesel ¹							Rapsölmethylester (RME)						
			2	3	4	5	6	7	8	9	10					
Dichte @ (15 °C)	kg/l	0,815 - 0,855	0,88	0,885	0,886	0,885	0,884	0,876	0,880							
Heizwert H _u	MJ/kg	-	37,2	37,09	37,40		37,41	37,02	37,70							
Kin. Viskosität (20 °C)	mm ² /s	2 - 8	6,3 - 8,1	7,8	-	-		7,19	7,52							
Flammpunkt	°C	> 55	-	130	-	22,5 ²			188							
Filtriergrenze	°C	0 ³ - < -12 ⁴ > 45	-	-7	-	-	-4,5		-3							
Cetanzahl CZ			54 - 55	49,9	-			54	48,7							
Koksrückstand	%	< 0,1	-	-	-	0,027	-	-	0,50							
Schwefelgehalt	%	< 0,30	-	-	-	-	-	-	-							
Autor			[122,121]	[67,66]	[64]	[105]	[51]	[130]	[39]							

1) nach DIN 51 601; 2) wahrscheinlich wegen Restalkohol so niedrig; 3) Sommer;
4) Winter

Die Flammpunkte des Esters liegen mit 130 - 190 °C weit über der Mindestforderung von 55 °C. Der Grenzwert der Filterbarkeit reicht nur zwischen -3 bis -7 °C. Er erreicht damit den Wert für Sommerdieselmotoren und verfehlt den Richtwert für Winterdiesel nur knapp.

Die Cetanzahl erhöht sich durch eine Umesterung um etwa zehn Punkte auf fast 50 und liegt damit über dem in DIN 51 601 geforderten Mindestwert von 45. Somit könnte RME sogar als Zündverbesserer verwendet werden.

Die Conradsonzahl (Koksrückstand) wird durch die Raffinations- und Aufbereitungsschritte im Vergleich zu Rapsöl zumeist verringert (0,027 und 0,024 Gew.-%, nach SIMS [105]), liegt jedoch bei der Untersuchung von GUBET 1987 noch bei 0,50 % [39].

Wird das Rapsöl vor der Umesterung raffiniert, so liegen die Schwefelgehalte bei den Estern noch unter den in Kapitel 2.2.1.1 angegebenen Werten.

Trotz der mit Dieselkraftstoff vergleichbaren Viskosität und der Verringerung des Molekulargewichtes auf ein Drittel weisen die Destillationskurven einen ähnlichen Verlauf wie bei reinem Rapsöl auf. Die Werte anderer Autoren [105, 67] befinden sich zwischen den in Abbildung 8 dargestellten Methylesterkurven.

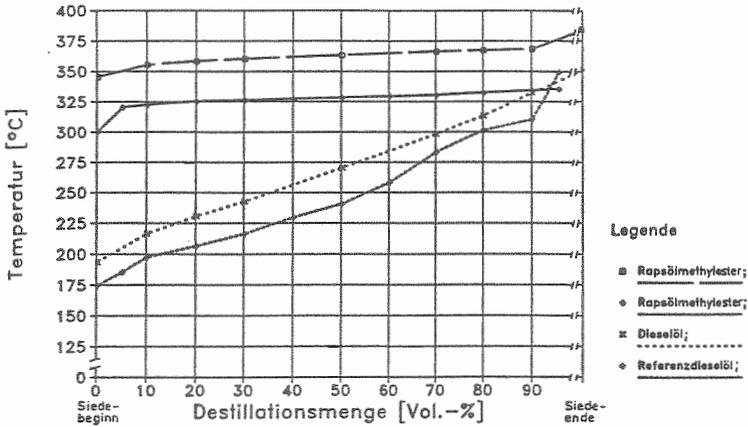


Abb. 8: Destillationskurven von Rapsölestern und Dieselöl [130, 67]

Die Verbesserung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) und die Verringerung der Viskosität durch die Verkleinerung des Rapsölmoleküls war zu erwarten. Für den nicht erwarteten Anstieg der Destillationstemperaturen bei Rapsölmethylester gegenüber reinem Rapsöl gibt es keine Erklärung.

2.2.2 Rapsölverwendung als Kraftstoff in Dieselmotoren

Nach der zweiten Ölpreiskrise Ende der 70er Jahre wurden in zahlreichen Ländern der Welt Versuche zur Verwendung von verschiedenen Pflanzenölen als Dieselmotorkraftstoffersatz durchgeführt. Am umfassendsten wird dabei aus den USA, Kanada, der Republik Südafrika, aus Neuseeland, Australien, Österreich, Finnland, Schweden und der Bundesrepublik Deutschland berichtet.

Da zu Beginn der Versuche meist das Bestreben stand, Dieselmotorkraftstoff ganz oder zumindest zu einem sehr großen Teil zu ersetzen, begannen die Untersuchungen meist mit reinen Pflanzenölen als Kraftstoff. Nachfolgend werden Ergebnisse von Versuchen mit unterschiedlichen Motorenbauarten zusammengestellt und besprochen. Auch die Frage der notwendigen Aufbereitungsschritte für die Öle wird in diesem Kapitel angesprochen.

2.2.2.1 Reines Rapsöl

Von Versuchen mit Rapsöl wird hauptsächlich aus Ländern mit gemäßigten oder kühleren Klimaten berichtet, da dort vor allem Winterrapsorten hohe und gesicherte Erträge bringen. Dagegen fanden die Untersuchungen in wärmeren Vegetationszonen meist mit Soja-, Sonnenblumen- oder Safloröl statt.

Zu Beginn der Untersuchungen stand meist die Frage im Vordergrund, ob sich Rapsöl aufgrund der hohen Viskosität und der geringen Cetanzahl generell als Ersatz für Mitteldestillate aus der Rohölraffination eignen würde. Diese Fragestellung war in erster Linie für die Landwirtschaft nahestehende Institutionen und Firmen von Interesse. Die Ergebnisse basieren deshalb meist auf Versuchen mit Schlepperdieselmotoren oder kleinen kostengünstigen Ein- und Zweizylindermotoren (s. Tabelle 7). Im folgenden werden die Ergebnisse der direkteinspritzenden Dieselmotoren und der Vor- und Wirbelkammer-Dieselmotoren dargestellt.

Direkteinspritzende Dieselmotoren (DI-Dieselmotoren)

Heute werden in Nutzfahrzeugen wegen des geringen spezifischen Treibstoffverbrauches nahezu ausschließlich Dieselmotoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung verwendet. Deshalb wurden die ersten Tastversuche mit dieser Motorenbauart durchgeführt. Dabei fehlen den in der Literatur angegebenen und in Tabelle 7 zusammengefaßten Ergebnissen häufig Angaben zur Versuchsanstellung, so daß ein direkter Vergleich der Meßwerte nur bedingt möglich ist. Es wurden beispielsweise Motoren kleinerer Leistung meist auf Motorenprüfständen, in Schlepper eingebaute Motoren jedoch an einem Zapfwellenprüfstand untersucht. Die gemessene Zapfwellenleistung entspricht dabei nur der Motorleistung abzüglich der Getriebeverluste bis zur Kraftabnahme an der Zapfwelle.

- Motorkennwerte

Es zeigte sich, daß die maximale Motorleistung im Vergleich zum Dieselmotor höher, aber auch niedriger lag. Die Veränderungen schwankten im Bereich von plus fünf Prozent bis minus zwölf Prozent. Mengenmäßig (gewichtsbezogen) war der minimale spezifische Kraftstoffverbrauch bei Rapsölbetrieb unverändert, jedoch auch bis 21 Prozent höher, was in der geringeren Energiedichte des Rapsöls begründet liegt. In Tabelle 5 sind die in der Literatur dargestellten Versuche mit Rapsöl als Kraftstoff in direkteinspritzenden Dieselmotoren zusammengestellt.

Der hohe Leistungsverlust, bis 22 % nach Messungen der Landwirtschaftskammer Kiel 1979 [70], könnte eventuell daher rühren, daß die eingespritzte Kraftstoffmenge zu gering war. Von diesem Problem berichtete nämlich auch VAN DER WALT und HUGO 1981 [120] bei Versuchen mit Sonnenblumenöl. Abhilfe brachte der Austausch der Verteiler-Einspritzpumpe durch eine Reihen-Kolbenpumpe, die das höher viskose Pflanzenöl in ausreichender Menge zudosieren konnte.

Tab. 5: Versuche mit Rapsöl und Dieselöl als Kraftstoff in direkteinspritzenden Dieselmotoren

Hersteller/ Zylinderzahl	Motorleistung			spz. Verbrauch			Autor
	max. R.-öl kW	D.-öl kW	ΔP_{\max}^1 %	min. R.-öl g/kWh	D.-öl g/kWh	Δb_{\min}^1 %	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
KHD /6	51,8	67,1	-22,7	312	258	+21,1	N.N. [70]
KHD /6 ²	63,7	67,1	- 5,0	294	259	+13,5	N.N. [70]
- /-	-	-	- 8	300	263	+14	SCHOEDDER [102]
- /-/T	-	-	-12	290	271	+ 7	SCHOEDDER [102]
Hatz/1/	3,4	3,4	0	307	267	+15,0	VELLGUTH [122]
Ford/4	28,9	28,1	+ 2,8	330	330	0	PETERSON [81]
Petter/2	8,7	8,3	+ 5,4	339	336	+ 0,9	STRAYER [113]
Elko/3/T/LLK	-3	-		249 ³	210	+18,3	ELSBETT [27]

1) Prozentuale Veränderung gegenüber Dieselbetrieb; 2) Rapsöl : Diesel = 1 : 1; 3) Sonnenblumenöl; T = Abgasturbolader; LLK = Ladeluftkühlung;

- Ablagerungen

Die in Tabelle 5 angegebenen Werte wurden z.T. nach längerer Betriebsdauer nicht mehr erreicht, und es kam schon ab 50 h Laufzeit zu Betriebsstörungen, die sich in unrundem Motorlauf oder schlechten Starteigenschaften äußerten. Die Ursache waren meist koks- oder lackartige harte Ablagerungen im Verbrennungsraumbereich und in angrenzenden Bereichen, wie Einspritzdüsen, Kolbenböden, Kolbenringen, Zylinderkopf, Zylinderseitenwänden und an den Ventilen. Aus diesen Ablagerungen ergaben sich folgende Probleme:

- a) Trompetenförmige Ablagerungen um die Einspritzöffnungen. Diese führten schnell zu einem Leistungsabfall des Motors, da der Kraftstoff nur noch unvollständig zerstäubte und eine unvollständige Gemischbildung den Verbrennungsprozeß negativ beeinflusste.

- b) **Rückstandsbildungen im Bereich der Kolbenringe.** Diese führten häufig zu deren Festklemmen, was Kompressionsabfall und verstärkten Ölverbrauch nach sich zog und starken Motorenverschleiß bedeuten würde.
- c) **Ablagerungen an den Ventilschäften.** Diese führten zu einem schlechten Abschluß des Verbrennungsraumes, verbunden mit Kompressions- und Motorleistungsverlusten.

Die Rückstände bei Pflanzenölen werden nicht nur durch Ruß- und Koksbildung aufgrund unvollständiger Verbrennung verursacht, sondern auch durch Polymerisate, die bei hohen Temperaturen und hohem Druck entstehen, wie sie im Brennraum auftreten. Polymerisate sind große Moleküle, die durch chemische Verbindungen aus zwei oder mehr Molekülen entstehen [74], was sowohl bei Anwesenheit von Sauerstoff (Trocknung von Farben; Kunststoffproduktion) als auch bei hohen Temperaturen erfolgen kann. Die Polymerbildung bei Luftabschluß und einer Temperatur von 300 °C weist KORUS 1982 [56] nach. Dabei wird eine Molekülvergrößerung durch die Viskositätszunahme nachgewiesen, die umso schneller erfolgt, je höher die Zahl der Doppelbindungen im Pflanzenöl ist. Auf diese Weise kann aus der Jodzahl eines Pflanzenöls bereits auf die Neigung zur Makromolekülbildung geschlossen werden. Praktische Bestätigung finden diese Erkenntnisse in den Versuchen von PETERSON et al. 1982 [81], der beobachtete, daß Sonnenblumen- und Safloröl im Vergleich zu Rapsöl mehr Ablagerungen ergaben.

- Kraftstoffzusätze

FULS et al. 1986 [31] berichteten von Versuchen mit mehr als 40 Kraftstoffadditiven zu reinem Sonnenblumenöl bzw. zu einem Beimischungsanteil von 20 % Sonnenblumenöl zu Dieselmotorkraftstoff. Hoffnungsvolle Ergebnisse aus Kurzversuchen erwiesen sich bei Dauertests als nicht reproduzierbar. Auch Versuche mit wassergekühlten Einspritzdüsen zur Vermeidung der thermischen Polymerbildung, die obiger Autor anspricht, führten nur zu graduellen Verbesserungen, nicht jedoch zur Verhinderung des Rückstandsbaus an den Düsen.

- Kraftstoffgemische

Eine Verringerung der Ablagerungsproblematik wurde von einer Kraftstoffmischung aus Rapsöl und herkömmlichem Dieselöl erwartet. WAGNER/PETERSON et al. [128, 81], SCHOEDDER [102], VELLGUTH [122], JOHANSSON et al. [48], SCHÄFER [97] u.a. führten sowohl Prüfstands-, als auch Praxistests durch.

Bezüglich der Motorleistungsveränderungen ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie bei reinem Rapsölbetrieb. Ein Kraftstofffilterwechsel war im Vergleich zu reinem Dieselbetrieb zwei- bis dreimal öfter notwendig [48]. Die durch Ablagerungen an Motorenteilen hervorgerufenen Betriebsstörungen verringerten sich durch die Mischung mit Diesel. Nach VELLGUTH 1985 [123] verlängern sich die störungsfreien Laufzeiten etwa proportional zum Dieselkraftstoffanteil.

Da zur Beseitigung der Ablagerungen eine totale Motorreinigung erfolgen muß [123], wird eine Rapsölbeimischung zum Dieselöl auch in geringen Mengen (< 25 %) nur in Ausnahmesituationen sinnvoll sein.

Diese Ergebnisse werden auch durch bis Mitte der 80er Jahre langfristig angelegte Versuche in den USA mit Zumischung von 25 % Sonnenblumenöl zum Dieselkraftstoff von KAUFMAN et al., GERMAN et al., und ZIEJEWSKI et al. 1985 [50, 33, 135] und SCHLAUTMAN et al. 1986 [99] bestätigt.

- Elsbett-Motor

Die einzige Dieselmotorvariante mit direkter Kraftstoffeinspritzung in den Zylinderraum, die nach Herstellerangaben störungsfrei über längere Zeit betrieben werden kann, ist der ELKO-Motor. Die Angaben in Tabelle 5 (Zeile 8) stammen zwar von Versuchen mit Sonnenblumenöl, sind jedoch auch auf den Betrieb mit Rapsöl übertragbar. Hauptgründe für die Vermeidung von störenden Ablagerungen sind vermutlich die Einstrahlzapfeneinspritzdüse und die kugelförmig ausgebildete Verbrennungszone im Kolbenboden, die bei tangentialer Kraftstoffeinspritzung Anlagerungen von unverbrannten Kraftstoffteilen an Zylinderwänden verhindern. Abbildung 9 zeigt die Anordnung der Einspritzdüse und die Kolbenausformung.

Der ELKO-Dieselmotor wird derzeit nur in kleinen Stückzahlen gefertigt, was zwar eine hohe Fertigungsqualität ermöglicht, aber die notwendige Massenverbreitung des pflanzenöлтаuglichen Dieselmotors verhindert. Eine abschließende Beurteilung der Pflanzenöлтаuglichkeit des ELKO-Motors ist erst nach einem großangelegten Praxisversuch möglich.

DUOTHERMISCHES BRENNVERFAHREN VON ELSBETT

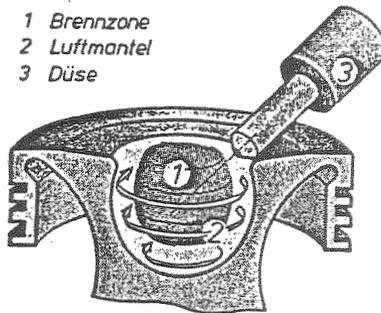


Abb. 9: Schematische Darstellung von Einspritzdüse und Kolben beim ELKO-Dieselmotor [27]

Vor- oder Wirbelkammer-Dieselmotoren (IDI-Dieselmotoren)

Vor- oder Wirbelkammermotoren stellen im Vergleich zu direkt einspritzenden Dieselmotoren keine so hohen Anforderungen an die Kraftstoffqualität. Sie haben jedoch im Durchschnitt einen ca. 10 % geringeren Motorwirkungsgrad [123] und somit einen um diesen Prozentsatz höheren Kraftstoffverbrauch.

- Motorkennwerte

Ähnlich wie bei den DI-Dieselmotoren sinkt die Motorleistung bei Verwendung von Vorkammer-Dieselmotoren nur geringfügig um bis zu 4,5 % ab. Der gewichtsbezogene, minimale spezifische Kraftstoffverbrauch erhöht sich bis zu 34 % und liegt im Bereich von 255 - 295 g/kWh mechanischer Arbeit. Zum besseren Vergleich sind die Einzelwerte in Tabelle 6 zusammengestellt. Alle Ergebnisse stammen von Messungen auf Motorprüfständen.

Tab. 6: Versuche mit Rapsöl und Dieselöl als Kraftstoff in indirekt einspritzenden Dieselmotoren

Hersteller/ Zylinderzahl	max. Motorleistung			min. spz. Verbrauch			Autor
	R.-öl kW	D.-öl kW	ΔP_{\max}^1 %	R.-öl g/kWh	D.-öl g/kWh	Δb_{\min}^1 %	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Hatz/12/5	3,2	3,2	0	365	290	+25,8	VELLGUTH [122]
Hatz/12/6	3,2	3,2	0	374	290	+29,0	VELLGUTH [122]
Yanmar/13/4	-	-	- 4,5	-	-	+16,5	PETERSON [81]
Hatz/14	8,7	8,9	-2,3	295	253	+16,6	VELLGUTH [123]
Hatz/15	9,3	9,4	- 1,1	295	220	+34,0	VELLGUTH [123]
KHD /3 ⁴	-	-	-	256	234	+ 9,4	VELLGUTH [123]
KHD /3 ⁵	-	-	-	255	234	+ 9,0	VELLGUTH [123]

1) Prozentuale Veränderung gegenüber Dieselbetrieb; 2) Die Werte gelten für eine Motorbelastung von ca. 70 % der Nennleistung; 3) Rapsöl : Diesel = 7 : 3; 4,5,6) Aufbereitungsstufen des Rapsöls: roh, entschleimt, raffiniert

- Ablagerungen

Erwartungsgemäß gab es bei den Versuchen mit Vorkammer-Dieselmotoren wesentlich geringere Ablagerungsprobleme als bei den DI-Dieselmotoren. Dieses Ergebnis belegen insbesondere die systematisch angelegten Grundlagenversuche von VELLGUTH 1982 [122] in Braunschweig-Völkenrode. Nach einem zur Eignung von Schmierstoffen für Motoren angewandten Beurteilungsverfahren (nach DIN 51 361 [143]) untersuchte er die Kolbensauberkeit nach jeweils 50 Betriebsstunden. Bei Vollastbetrieb ergab sich bei den in Tabelle 6, Zeile 2 angeführten Versuchen bei Dieselbetrieb eine Kolbensauberkeit von 100; bei raffiniertem Rapsöl von 97. Ein Wert von 100 besagt völlige Sauberkeit von Ruß und anders gearteten Ablagerungen, ein Wert von 50 bedeutet bereits erhebliche Beläge an verschiedenen Kolbenstellen. Es zeigt sich eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Direkteinspritzermotor (s. Tabelle 5, Zeile 5), wo bei 75 % der maximalen Motorbelastung mit Diesel eine Kolbensauberkeit von nur 74 und bei raffiniertem Rapsöl von nur 56 erzielt wurde. Nach 50-Stunden-Betrieb mit voller

Motorbelastung war auch bei Dieselkraftstoff nur ein Wert von 86 und bei Rapsöl von 50 zu erreichen.

Bei den 100-Stunden-Läufen nach einem vom amerikanischen Motorenherstellerverband vorgeschlagenen Versuchsprogramm ergaben sich für die in Tabelle 6, Zeile 5 (Hatz) und Zeile 7 (KHD) angegebenen Motoren Sauberkeitswerte von 86 und 99 mit entschleimtem, entsäuertem Rapsöl. Bei einem nach gleichem Verfahren geprüften Perkins-Vorkammermotor ergab sich nach 100 Stunden für das Pflanzenöl ein Wert von nur 70.

Die Bewertung der Kolbensauberkeit nach VELLGUTH kann allerdings nur ein grober Anhaltspunkt zur Beurteilung der Eignung eines Kraftstoffes sein, da dabei nur die flächenmäßige Belegung, nicht aber die Art der Verunreinigung beurteilt wird. So ist beispielsweise ein dünner, lockerer Rußbelag, der durch Lastwechsel meist wieder abgelöst wird, unbedenklich, während grobe, zähe Verkrustungen sich nach und nach aufbauen und langfristig Störungen hervorrufen können. Diese Frage kann nur durch längerfristig angelegte Versuche geklärt werden.

Langzeitversuche wurden mit dem Motorentyp KHD F3-6 L912/W, einem Wirbelkammermotor mit sogenannter "Zweistufenverbrennung", in der Republik Südafrika durchgeführt [31]. In der Testreihe waren zwei baugleiche, in DEUTZ-Schlepper eingebaute 3-Zylindermotoren mit entschleimtem Sonnenblumenöl betrieben worden.

Ein Schlepper wurde 2 300 Stunden konstant mit 70 % seiner maximalen Motorleistung an einer Zapfwellen-Wirbelstrombremse belastet. Kompressionsverluste an jeweils einem Zylinder bei 1 000 und ca. 2 000 Stunden waren nach Reinigung der Auslassventile behoben. Verschleiß und Leistungsverluste bewegten sich innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Grenzwerte. Bei "guter Schmierölqualität" sind aufgrund der Untersuchungen Ölwechselintervalle von 350 Stunden sowohl bei Pflanzenöl- als auch bei Dieselmotoren möglich [120, 30].

Mit der zweiten Maschine erfolgten drei 600-Studentests mit unterschiedlicher Motorbelastung nach einem vom Hersteller vor-

geschlagenen Testzyklus, der etwa 8 000 Stunden praktischen Betriebsverhältnissen entspricht [30]. Nach VAN DER WALT und HUGO 1981 [120] verliefen die 1 800 Stunden ohne Probleme. Es ergab sich ein Verlust an maximaler Motorleistung von 3,2 %; alle sonstigen Motorkennwerte entsprachen den Herstelleranforderungen. Nach diesem Versuch sind maximale Ölwechselintervalle von 660 Betriebsstunden möglich, ohne übermäßigen Motorenverschleiß zu verursachen, also keine Verkürzungen gegenüber Dieselbetrieb.

Aufgrund der guten Testverläufe gibt die Firma KHD, Köln, Herstellergarantien für diesen Motorentyp bei Betrieb mit entschleimtem Sonnenblumenöl. Ebenso garantiert die Südafrika-Vertretung der Firma Hatz, Ruhstorf, für den bereits von PAK und ALLEXI [77] getesteten Vorkammer-Seriendieselmotor E89G nach erfolgreich verlaufenem 1 700-Stunden-Test mit entschleimtem Sonnenblumenöl [31]. Auch mit einem Perkins-Vorkammer-Dieselmotor (Typ 3.152) waren nach FULS et al. 1986 [31] keine kraftstoffbedingten Schwierigkeiten aufgetreten, ebenso bei dem in Tabelle 6 (Zeile 3) von PETERSON et al. 1983 [81] getesteten Yanmar-IDI-Dieselmotor nach einer Laufzeit von 800 Stunden mit erucasäurehaltigem Rapsöl.

Von erfolgreich verlaufenen 200-h-Prüfstandstests und 1 000-h-Praxistests mit rohem, entschleimtem Sojaöl und Vorkammer-Dieselmotoren der Baureihe 3 300 berichtet auch McCUTCHEN 1981 [64] von der Firma Caterpillar Tractors Co., USA. Bei reinem Sojaölbetrieb und mit einer 30 %igen Beimischung gab es weder Schmieröl- noch Motorenverschleißprobleme. Leichte Ablagerungen in der Vorkammer und an den Einspritzdüsen lösten sich immer wieder von selbst ab.

Die Ergebnisse aus den Langzeitversuchen mit entschleimtem Sonnenblumenöl können aufgrund vergleichbarer chemischen Zusammensetzung (s. Kap. 2.1) auch auf entsprechend aufbereitetes Rapsöl übertragen werden. Bestätigt wird diese Annahme auch durch die mit Rapsöl durchgeführten Versuche von PAK und ALLEXI 1984 [77], die "insgesamt als sehr zufriedenstellend bezeichnet werden" und durch den störungsfreien Einsatz zweier Deutz-Trakto-

ren mit Wirbelkammermotoren (ca. 500 und 300 Betriebsstunden) auf Bayerischen Versuchsbetrieben im Jahr 1987.

Es stellt sich die Frage, ob die guten Ergebnisse der Dauerver-
suche auch mit wenig aufbereiteten Ölen erzielt werden könnten.
Desweiteren soll die Untersuchung dieser Frage Klarheit darüber
ergeben, ob rohes, nur feststoffgereinigtes Rapsöl eingesetzt
werden könnte, da sich diese Qualitätsstufe mit sehr kleinen
Ölgewinnungsanlagen erzeugen läßt und somit eine dezentrale
Kraftstoffversorgung möglich wäre. Nachfolgend soll deshalb auf
die für den Motorenbetrieb notwendigen Aufbereitungsgrad des
Rapsöls eingegangen werden.

Rapsölaufbereitung

Der Frage nach dem für den Motorenbetrieb notwendigen Aufbe-
reitungs- und Raffinationsgrad von Rapsöl ging VELLGUTH 1982/85
[122, 123] nach.

Sind bei den Meßgrößen **maximale Motorleistung** und **minimaler
spezifischer Kraftstoffverbrauch** kaum Unterschiede festzustel-
len (s. Tabellen 5 und 6), so sind bei der Beurteilung der Kol-
bensauberkeit bereits negative Auswirkungen bei der nur mecha-
nisch gereinigten "Rapsöl roh"-Variante nachweisbar. Die Ver-
besserung in der Sauberkeit beim Übergang zur Teilraffination
reicht von einem bis elf Bewertungspunkte, wobei mit den Vor-
kammermotoren Werte von 83 bis 99 erreicht wurden. In Tabelle 7
sind Versuche zu diesem Fragenkomplex zusammengestellt. Dabei
werden jeweils die Kolbensauberkeit und die Ablagerungen an den
Einspritzdüsen beurteilt.

Die Werte der Kolbensauberkeit und die verstärkten Ablagerungen
an den Einspritzdüsen bei den nach 50 bzw. 100 Stunden beende-
ten Versuchen machen deutlich, daß ein Betrieb mit rohem oder
nur entschleimtem Rapsöl mehr Probleme bereitet als mit teil-
raffiniertem bzw. vollraffiniertem Öl. Zwischen Teil- und Voll-
raffinaten stellte VELLGUTH 1985 [123] keinerlei Unterschiede
fest; bei der letzteren Variante sind zusätzlich noch Ge-
schmacks-, Geruchs- und Farbstoffe entfernt.

Tab. 7: Kolbensauberkeit und Düsenzustand bei unterschiedlich aufbereitetem Rapsöl (Beurteilung nach VELLGUTH [122])

Hersteller/ Quelle	Ölaufbereitung	Laufzeit h	K.-sauberk. Punkte	Aussehen Düse/srst.
Spalte 1	2	3	4	5
Hatz, DI [122]	roh	5	(55)	-/ Versuch abgebrochen
"	roh, entschleimt	5	-	-/ Versuch abgebrochen, Kolbenring klemt
"	raffiniert	50	56	harte, grobe Verkrustung / -
Hatz, IDI [122]	roh, entschleimt	33	(86)	dicke Krusten, Schlamm, Düsenadel fest nach 33 h / -
"	raffiniert	50	97	dünn, schwarz belegt, Schaft verkrustet / -
Hatz, IDI [123 u. [77]	roh	100	83	dicke grobe Krusten, Düsenreinigung / Drehzahlschwankungen, Kaltstartprobleme
"	teilraffiniert ¹⁾	100	86	dünnere Belag um Düsenöffnung / -
"	roh	100	87	Einspritzdüse versetzt, leichte Krusten / Ergebnisse fast wie bei Öl teilraff.
KHD, IDI [123]	roh	100	88	Verkrustungen / Ablagerungen an Einlaß- ventilen
"	teilraffiniert	100	99	- / -

¹⁾ teilraffiniert = entschleimt und entsäuert

Ihren Ursprung haben auftretende Probleme meist in den Verunreinigungen der Einspritzdüsen. Dadurch wird der Kraftstoff vermutlich unzureichend mit der notwendigen Verbrennungsluft vermischt und kein vollständiger Ausbrand erreicht. Belege hierfür sind Startschwierigkeiten, starke Drehzahlschwankungen sowie stark schwankende Rußzahlen [122, 77]. Eine Säuberung der Düsen erbrachte meist wieder die ursprünglichen Betriebszustände.

Unterschiede waren jedoch auch im Umfang der Verkokung in der Vor- oder Wirbelkammer und in der Konsistenz der Ablagerungsprodukte (Weichheit, Feinheit, Entfernbarekeit) zu erkennen. Die Ursache der stärkeren Verkokungsneigung bei rohem Rapsöl aus Extraktionsanlagen dürfte darin zu suchen sein, daß mit dem Aufbereitungsprozeß der Entschleimung und Entsäuerung vor allem Aschebestandteile, d.h. hauptsächlich Phosphate, der Hauptanteil des in Spuren enthaltenen Schwefels (- 50 ppm) und Eiweiß-

stoffe entfernt werden, die für die Rückstandsbildung im Motor verantwortlich sind [118].

Daß durch konstruktive Maßnahmen eine Verringerung oder Beseitigung der Schwierigkeiten zu erreichen ist, belegen Ergebnisse und Erfahrungen von PAK und ALLEXI und ELSBETT.

PAK und ALLEXI stellten fest, daß bei dem untersuchten Serien-vorkammermotor der Firma Hatz (s. Tabellen 6 und 7) die Spitze der Einspritzdüse gegenüber der Wirbelkammerwand um ca. 2 mm zurückversetzt war. Nach einer Änderungsmaßnahme waren die Wand der Wirbelkammer und die Düsenspitze planeben. Ein Testlauf mit rohem Rapsöl erbrachte annähernd dieselben Ergebnisse bezüglich Kaltstartverhalten, Laufruhe und Kolbensauberkeit wie bei teilraffiniertem Öl (s. Tabelle 6). Als weitere Verbesserungsmaßnahme erwies sich die Unterbrechung der Luftkühlung bei einem Absinken der Wirbelkammertemperatur unter 1 000 °C. PAK [77] faßt die positiven Ergebnisse zusammen: "Der Betrieb verlief ohne jegliche Störung. Die Motorkennlinien sind vergleichbar mit denen beim Betrieb mit entschleimtem und entsäuertem Rapsöl. Die Ablagerungen in der Wirbelkammer und die Krustenbildung an der Düse sind geringfügig. Der Kolben ist sauberer als im Betrieb mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl" [77].

Bei der Firma Elsbett, Hilpoltstein, wurde Rapsöl mit kleinen mechanischen Ölpresen gewonnen. Das Zentrifugieren und ein Absetzenlassen der Feststoffe waren die einzigen Reinigungsschritte. Der Betrieb mehrerer Motoren mit dem rohen Rapsöl erwies sich als möglich [27]. Bezüglich der Ablagerungen im Bereich der Kolbenringe kommt diesem Motorenkonzept zugute, daß Kolben und Zylinder aus demselben Material bestehen (Gußeisen), daher den gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten haben und die Passung Kolben-Zylinder enger sein darf als bei herkömmlichen Dieselmotoren. Durch die enge Passung werden Ablagerungen eventuell mechanisch beseitigt und die Gefahr der Schmierölverdünnung im Kurbelgehäuse durch unverbrannten Kraftstoff verringert.

In diesem Zusammenhang muß noch erwähnt werden, daß rohes und wasserentschleimtes Rapsöl aus der chemischen Extraktion deut-

lich höhere Phosphatgehalte bzw. Schleimstoffgehalte aufweist als nur mechanisch gewonnenes Öl, bei dem die Rapssaat nicht vorgewärmt wurde und die Temperatur des austretenden Öls maximal 50 °C beträgt [100]. Nach Untersuchungen von SCHMIDT 1982 [100] wurde aus nicht erwärmter Rapssaat Öl mit nur 18 - 43 ppm Phosphorgehalt gewonnen. Diese Werte werden bei extrahiertem Rapsöl nur nach Säureentschleimung und z.T. nur nach einer Teilraffination erreicht [118]. Bei Vorwärmung der Saat auf 100 °C ermittelte SCHMIDT Phosphorgehalte von 254 - 275 ppm; bei extrahiertem Öl werden nach THOMAS 1972 [118] diese Werte nach der sich an den Extraktionsprozeß anschließenden Wasserentschleimung erreicht.

Aufgrund der von VELLGUTH und PAK gemachten Erfahrungen wird von beiden Autoren empfohlen, Vorkammer-Dieselmotoren erst einem 100-Stunden-Test zu unterziehen, um als erstes die grundsätzliche Eignung auf die Pflanzenölverträglichkeit zu erproben und bei zufriedenstellenden Ergebnissen einen Langzeitversuch mit ca. 1 000 Betriebsstunden anzuschließen. Diese Empfehlung gibt auch WÖRGETTER 1981 [134] als Resümee der Versuche in Österreich.

- Abgasemissionen

Literatur über Abgasemissionen bei definierten Testzyklen mit Vorkammer-Dieselmotoren liegt nicht vor. Es ist nur von einigen Versuchen die Ermittlung der Rußzahl bekannt, die jedoch nur eine optische Beurteilung des quantitativen Partikelaustritts darstellt. Bei maximaler Drehmomentabgabe stellte QUICK 1980 [85] eine mehr als 30 %ige Rußzahlabnahme (Rußzahlmessung nach Bosch) bei einem japanischen Kubota-Motor fest. Bei anderen Versuchen [123, 113, 77] waren, je nach Versuchsanstellung, bei unterschiedlicher Motordrehzahl und -belastung die Werte teilweise bei Rapsölbetrieb, manchmal auch bei Dieselbetrieb, geringer. Tendenziell schnitt jedoch der Betrieb mit Pflanzenöl günstiger ab. Im Vergleich zu Dieselöl entfallen die Schwefelemissionen im Abgas, da Pflanzenöle dieses Element nur in geringen Spuren enthalten.

Da die Verwendung von reinem Rapsöl in konventionellen Motoren sehr problembehaftet ist und neue oder abgeänderte Motoren er-

fordern würde, empfehlen manche Fachleute, kurzfristig den Schritt einer Kraftstoffanpassung an den Motor zu gehen.

2.2.2.2 Rapsölester

Mit Rapsölester, dem Produkt aus der Umesterung, wird versucht, das Pflanzenöl den Eigenschaften von Dieselkraftstoff anzupassen. Vor allem die Reduzierung der Viskosität um den Faktor 10 auf einen Wert von ca. $7 \text{ mm}^2/\text{s}$ erhöht die Fließfähigkeit, führt damit zu besseren Zerstäubungseigenschaften und läßt eine bessere Verträglichkeit in konventionellen DI-Dieselmotoren erwarten.

- Motorkennwerte

Bezüglich der Motorkennwerte ergeben sich bei Rapsölmethylester (RME) kaum Unterschiede zum Motorenbetrieb mit reinem Rapsöl. Die maximale Motorleistung wird 5 % über und bis zu 9 % unter den Versuchswerten von Dieselöl angegeben. Der gewichtsbezogene minimale spezifische Kraftstoffverbrauch erhöht sich, vor allem wegen des ca. 12 % geringeren Heizwertes von Rapsölestern, um 9 - 15 % (s. Tabelle 8).

- Motorenfunktion

Keiner der Autoren berichtet über Betriebsstörungen während der Versuche. VELLGUTH 1985 [121] fand heraus, daß ein Kaltstart bis $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ ohne zusätzliche Maßnahme möglich ist; bei $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ genügte ein kurzer Aufenthalt in einem warmen Raum für einen problemlosen Start. Durch 15 - 20 % Normalbenzin- oder Petroleumzugabe soll eine Wintertauglichkeit bei $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich sein [121]. Bei Startversuchen bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$ in einer Kältekammer ergab sich bei Rapsölmethylester in den ersten 40 s ein höheres Kaltstartgeräusch; die "Summe der Lautheit" bei 20minütiger Warmlaufphase ist für beide Kraftstoffe gleich (WEIDMANN [130]). Mit den in Tabelle 8, in Zeilen 1, 3, 4 und 8, angeführten Motoren bzw. baugleichen Typen betragen die Laufzeiten 300, 200, ca. 1 000 und 2 000 Stunden. Der Steyr- und der MWM-Motor waren in landwirtschaftlich genutzten Schleppern eingesetzt.

Tab. 8: Versuche mit Rapsölmethylester und Dieselöl als Kraftstoff in Dieselmotoren

Hersteller/ Zylinderzahl/ Einspritzung	max. Motorleistung			min. spz. Verbrauch			Autor
	R.-öl kW	D.-öl kW	ΔP_{max}^1 %	R.-öl g/kWh	D.-öl g/kWh	Δb_{min}^1 %	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Hatz/1/DI ^{2,3}	2,4	2,4	0	355	311	+14,1	VELLGUTH [122]
Petter/2/DI	8,0	8,1	- 1	366	336	+ 8,9	STRAYER [113]
Steyr/4/DI	44,3	42,2	- 5,0	254	234	+ 8,5	MITTELBACH [66]
VW/4/IDI	37,9	38,4	- 1,4	322	281	+14,6	WEIDMANN [130]
VW/4/IDI/T	47,3	49,5	- 4,5	308	288	+ 7,0	WEIDMANN [130]
VW/4/DI	32,7	35,8	- 8,7	270	235	+14,9	WEIDMANN [130]
MM/4/DI ⁴	42,7	42,7	0	291	249	+17	VELLGUTH [121]
-/-/DI	18,6	18,6	0	302	262	+15,3	GUIBET [39]

1) Prozentuale Veränderung gegenüber Dieselbetrieb; 2) Kraftstoff Raps-
ethylester; 3) Werte bei ca. 75 % der max. Motorleistung; 4) Werte bezie-
hen sich auf gemessene Zapfwellenleistung; T= Abgasturbolader;

VELLGUTH 1982 [122] berichtet zwar von Krustenbildung an den Einspritzdüsen und damit einhergehend von schlechter werdenden Rußzahlen (von 0,7 - 2,8 nach Bosch), aber von der Rückkehr zu dem Ursprungswert bei Entfernung der Krusten von der Düse. Bei Vorverlegung des Einspritzzeitpunktes um 4 °Kurbelwelle verbesserten sich bei einer Kraftstoffmischung aus Ester und Diesel (1 : 1) die Rußzahlen und die Kolbensauberkeit (von 75 auf 91 Punkte); auch der Kraftstoffverbrauch reduzierte sich um ca. 10 %. Auch andere Autoren, wie BACON 1981 [7], McCUTCHEN 1981 [64] und MITTELBACH 1983 [66] berichten von der Bildung von Ablagerungen um die Öffnungen der Einspritzdüsen, die jedoch das Zerstäubungsverhalten, auch nach bis zu 250 Betriebsstunden, kaum veränderten [64]. Bei den Praxisversuchen mit 200 und 2 000 Betriebsstunden (mit RME), die MITTELBACH und VELLGUTH erwähnen und Versuchen mit 2 000 und 400 Betriebsstunden, die mit Sonnenblumenölmethylester in der Republik Südafrika [12] durchgeführt wurden, waren keine Abweichungen im Vergleich zu Dieselbetrieb feststellbar. Die im Vergleich zu den Prüfstandsversuchen gerin-

geren Ablagerungen bei den Praxisversuchen mit längeren Einsatzzeiten lassen vermuten, daß sich bei wechselnder Belastung entweder weniger Polymere bilden oder diese durch häufigen Lastwechsel von Zeit zu Zeit wieder abgelöst werden.

- Schmieröl

Zwei in der Tabelle 8 genannte Autoren [122, 66, 121], aber auch andere Autoren [52, 41, 62, 12], berichten von unterschiedlich starken Schmierölverdünnungen mit dem Esterkraftstoff. Dabei sind zwischen Versuchen und Motoren sehr große Unterschiede zu verzeichnen. VELLGUTH 1985 [121] ermittelte nach 150 - 200 Betriebsstunden einen Rapsölesteranteil von 15 - 23 % und empfiehlt deshalb einen Ölwechsel in Intervallen von 100 - 150 Betriebsstunden statt 200 nach Herstellerangaben. Bei STRAYER 1983 et al. [114] sank die Viskosität des Schmieröls nach je 100 Stunden Versuchen auf dem Prüfstand von ursprünglich 120 mm²/s auf 30 bzw. auf 15 mm²/s ab. Mit einem Steyr-Schlepper war nach 200 Betriebsstunden auf einem landwirtschaftlichen Betrieb die Viskosität von ursprünglich 14,0 auf 9,5 mm²/s gefallen [112], was rechnerisch einen Esteranteil von ca. 30 % ergeben würde. Bei sehr starker Schmierölverdünnung durch Kraftstoffbestandteile besteht die Gefahr, daß die Schmiereigenschaften reduziert werden; die Folge ist höherer Motorenverschleiß. Zwar tritt diese Erscheinung auch bei Betrieb mit Dieselkraftstoff auf, jedoch meist langsamer als bei Estereinsatz, da sich ein Teil der leichter siedenden Dieselölbestandteile aus dem Kurbelgehäuse über die Entlüftung wieder verflüchtigt; bei Esterkraftstoffen geschieht dies aufgrund des konstant hohen Siedepunktes nicht (s. Kapitel 2.2.1.2).

KAUFMAN et al. [52], BLACKBURN et al. [12], GEOFFROY et al. [32], LINDSAY et al. [62], REGLITZKY et al. [89] und andere machten bei Versuchen in den 80er Jahren die Beobachtung, daß die Viskosität nach beständiger Abnahme plötzlich wieder sehr stark anstieg. Dieses Phänomen trat bereits bei 60 Versuchsstunden, meist jedoch zwischen 80 und 150 Stunden bei Dieselmotoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung auf. Nach der Viskositätszunahme wurden Verklumpungen und Schlamm- bildung sowie verstärkter Metallabrieb [62] festgestellt. BLACKBURN

[12] stellte eine Phasentrennung in Schlamm und eine leichte Ölfraktion fest, daraus resultierend die Verstopfung verschiedener Schmierölkanäle.

Als Erklärung für diese Probleme wird eine chemische Reaktion von Esterbestandteilen mit Antioxidantien, Dispergenzien und anderen Additiven im Schmieröl angegeben. Bestätigt wird diese Vermutung durch die beständige Abnahme der "total base number" (TAN) [84, 89] und den Abbau der Verschleißschutzadditive [122]. Mit der Zunahme von Linol- und Linolensäuregehalt im umgeesterten Pflanzenöl nimmt die Abbaugeschwindigkeit der Additive zu und verkürzt so den Zeitraum bis zur Viskositätszunahme, wie mehrere Autoren [32, 62, 89, 125, 104] nachweisen konnten. Bestätigt wird diese Aussage auch dadurch, daß sämtliche Versuche mit Verdickungserscheinungen mit Sojaöl- oder Sonnenblumenölestern durchgeführt wurden, während bei Umesterungsprodukten aus Rapsöl diese Erscheinungen nicht auftraten. Ob sich bei Rapsölestern tatsächlich aufgrund des höheren Sättigungsgrades der Fettsäuren Schmieröldegradierungen gänzlich ausschließen lassen, müßte durch weitere Versuche noch nachgewiesen werden.

Abhilfemaßnahmen zur Verringerung der Schmierölkontaminierung wurden bereits bei mehreren Versuchen erprobt. Es sind

- Änderung des Einspritzzeitpunktes; (Verlängerung der Verbrennungszeit [122, 125])
- Erhöhung der Kühlwassertemperatur; (Erhöhung der Brennraumtemperatur [121, 125])
- Änderung der Einspritzdüsen; (bessere Zerstäubung [125, 32])
- Erhöhung der Kolbenverdichtung [125]
- Reduzierung des Esteranteils durch Beimischung von Dieselmotorkraftstoff [83, 65]
- Beimengung geeigneter Additive; z.B. mehr Antioxidantien [83, 125]

Mit den beiden erstgenannten Maßnahmen erzielte VELLGUTH [122, 121] bereits 1982 und 1985 Erfolge. Bei einem Hatzmotor brachte die Verfrühung des Einspritzzeitpunktes um

4 °Kurbelwinkel bei einem 50-Stundenlauf eine Reduzierung der Ölverdünnung um 50 - 70 % (von 2,2 auf 0,4 - 0,8 %), einen geringeren Abbau der Verschleißadditive (von 18 auf 4 %) und eine Verringerung von festen Fremdstoffen (von 1,4 auf 0,2 - 0,9 Gew.-%). Bei der Praxiserprobung des MWM-Motors wirkte diese Maßnahme nicht, sondern die Erhöhung der Kühlwassertemperatur von 75 auf 87 °C mit einer teilweise erzielten Reduzierung des Estergehaltes von 15 - 20 % auf 5 - 7 % nach 150 Betriebsstunden. Durch die Reduzierung der Bohrungen an der Einspritzdüse von 0,29 auf 0,26 mm erzielte GEOFFROY et al. [32] eine zulässige Verlängerung der Ölwechselintervalle von 61 auf 156 Stunden bei Sojaölethylester.

Keinerlei Schmierölverdünnungs- oder Düsenverkokungsprobleme sind bei Vorkammer-Dieselmotoren mit Esterkraftstoffen bekannt. Bei der Bewertung der Kolbensauberkeit fand VELLGUTH 1982 [122] sogar bessere Werte (100 Punkte) als bei reinem Dieselmotorbetrieb vor. PISCHINGER et al. 1982 [83] und WEIDMANN 1984 [130] stellten mit baugleichen VW-Motoren weder starke Viskositätsänderungen noch unübliche Ölkennwerte oder erhöhten Metallabrieb im Schmieröl bei den vorgeschriebenen Wechselintervallen von 7 500 km fest. Auch bei einem Langzeitversuch über 20 000 km ohne Ölwechsel ergaben sich nur tendenziell ansteigende Viskositätswerte und Metallgehalte, die jedoch innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Grenzwerte liegen.

Neben den erfolgreichen Funktionsprüfungen ist für die Dieselmotorenhersteller auch die Frage der emittierten Abgase von Interesse, da von Seiten der Gesetzgebung immer strengere Auflagen zum Schutz der Umwelt gemacht werden.

- Abgasemissionen

Die gründlichsten Untersuchungen wurden auf PKW-Rollenprüfständen nach dem US-FTP-75-Abgastest durchgeführt. Mit Ausnahme der Stickoxide und der Aldehydemissionen lagen sämtliche Werte unter den Vergleichsergebnissen mit Referenzdieselmotor. Dabei unterscheiden sich die absoluten Werte z.T. um mehr als das Doppelte, die Emissionen polyzyklischer aromatischer Kohlenstoffe (PAK) sogar um den Faktor drei bis vier (s. Tabelle 9).

Tab. 9: Abgasemissionen mit Rapsölmethylester nach dem Testzyklus US-FTP-75; Kaltstart (in Klammer prozentuale Veränderung gegenüber Referenzdieselmotor)

Motor		VW/IDI/1,6 l	1/DI/T	
Spalte 1	2	3	4	5
Kohlenmonoxid CO	g/mi	0,84 (-18)	1,75 (-15)	1,90 (- 8)
Stickoxid NO _x	g/mi	1,22 (+29)	0,98 (+23)	0,91 (+13)
Kohlenwasserst.	g/mi	0,14 (-46)	0,24 (-24)	0,28 (-11)
Partikel ^{HC} gesamt	g/mi	0,23 (- 3)	0,24 (-25)	0,29 (- 9)
Aldehyde	mg/mi	33 (-25)	58 (+40)	57 (+37)
SPAK (10)	µg/mi	117 (-57)	28 (-33)	39 (- 5)
Autor		[130]	[674]	

1) Motorhersteller nicht bekannt; mi = mile

Die Ergebnisse mit dem VW-Vorkammer-Dieselmotor wurden in der Tendenz bei noch zwei weiteren Tests mit der baugleichen Maschine bestätigt. Bei einem ECE¹-Test lag der CO-Wert mit 3,6 g/Test ca. 20 % unter, und der NO_x-Wert mit 3,0 g/Test ca. 20 % über dem Vergleichswert mit Referenzdieselmotor. Im CDC²-Testzyklus ergaben sich bei PISCHINGER et al. 1982 [83] mit Sojaölmethylester eine 40 %ige CO-Reduzierung (0,69 g/km) und bei Stickoxiden ein unveränderter Wert von 0,69 g/km. Widersprüchlich sind die Ergebnisse beim Aldehydausstoß. Einem Wert von nur 33 mg/mi beim Vorkammermotor, mit einer Abnahme gegenüber dem Referenzkraftstoff von etwa 25 %, stehen Werte von knapp 60 mg/mi dem turbogeladenen Direkteinspritzermotor mit 40 %iger Zunahme gegenüber dem Referenzkraftstoff entgegen. Eventuell ist dieser Gegensatz durch das Motorenprinzip bedingt, da GEYER et al. 1984 [34] und STRAYER et al. 1983 [114] bei Messungen an DI-Dieselmotoren sogar von vier- bis zehnfach höheren Werten, verglichen mit Dieselmotorbetrieb, berichteten.

¹ ECE: Economic Commission for Europe (UNO)

² CDC: City Driving Cycle

Die Partikelemissionen im Bereich von 0,23 - 0,29 g/mi bewegen sich bei allen drei Tests mit Rapsölderivaten in derselben Größenordnung. Trotz der starken Abnahme der PAK beim Vorkammermotor von mehr als 50 % ist der Wert mit 117 µg/mi noch drei- bis viermal höher als beim turbogeladenen Direktspritzer.

"Der Geruch des Abgases ist charakteristisch (ähnlich heißem Fritierfett), aber nicht so unangenehm wie bei Dieseldieselkraftstoff." so VELLGUTH [121]. Ebenso berichtet MITTELBACH [67]: "Der Traktorfahrer empfand sowohl den Abgasgeruch als auch den des lagernden Pflanzenöls als angenehmer als den des Dieselöls."

Die wenigen Emissionsmessungen lassen den Schluß zu, daß in der Summe bei Verwendung von Esterkraftstoffen weniger Schadstoffe entstehen als bei Verwendung von Dieselöl. Insbesondere bei den als am meisten gesundheitsgefährdend geltenden (gesamten) Kohlenwasserstoffen (HC_{gesamt}) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sind beträchtliche Reduzierungen feststellbar, zumal davon ausgegangen werden kann, daß die verwendeten Motoren nicht speziell auf Kraftstoffe mit Pflanzenölsprung optimiert waren.

2.3 Energetische Verwertung von Rapsöl als Brennstoff

Diesel- und Heizöl unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung kaum; der Kraftstoff enthält lediglich zusätzlich Additive. Da sich bei der Verwendung von Rapsöl in Motoren vor allem Ablagerungs- und zum Teil auch Schmierölprobleme ergaben, war zu vermuten, daß sich bei der Verbrennung mit einfacher gebauten Geräten, wie Zerstäubungsölbrennern, im Vergleich zu Dieselmotoren weniger Schwierigkeiten bei der Energieumsetzung ergeben würden. Literaturangaben zur Verbrennung von Rapsöl waren nicht zu finden. Auch die Anfrage bei verschiedenen Brennerherstellern ergab, daß mit Pflanzenölen keinerlei Betriebserfahrungen vorlagen.

Nachfolgend wird, wie bereits beim Kraftstoff, ein Vergleich von Rapsöl mit den Kennwerten von Heizöl EL (extra leicht) durchgeführt. Anschließend werden die in einem Herstellerwerk für Öl- und Gasbrenner von den Versuchstechnikern durchgeführten Funktionsversuche und Testläufe mit reinem Rapsöl und mit Heizöl-Rapsöl-Gemischen auf einem Kleinkesselprüfstand besprochen.

2.3.1 Brennstoffspezifische Kenngrößen von Rapsöl

Ein Vergleich verschiedener technischer, in der DIN-Norm für Heizöl EL (DIN 51 603) festgelegter Kennwerte mit den Werten des Rapsöls (s. Tabelle 10) zeigt starke Abweichungen bei der Viskosität und der Flammtemperatur. Dichte und Heizwert von Rapsöl weichen nur bis maximal 15 % von den geforderten Normwerten ab.

Tab. 10: Normanforderungen an Heizöl EL und entsprechende Kennwerte von Rapsöl nach verschiedenen Autoren

Kennwert	Einh.	Heizöl ¹		Rapsöl				
		3	4	5	6	7	8	9
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dichte @ (15 °C)	g/ml	< 0,860	0,92	0,921	0,921	0,911	0,914 - 0,922	0,92
Heizwert H ₁	MJ/kg	> 42,0	-	35,8	37,4	37,0	35,8	36,8
Flammpunkt	°C	> 55	265	-	232	246	303-318	240
Kin. Viskosität (20 °C)	mm ² /s	< 6,0	75	76	-	-	66 - 72	75
Pourpoint	°C	≤ -6	-	-	-24	-31,7	-	-
Koksrückstand	%	< 0,1	-	-	0,224	0,30	-	-
Schwefelgehalt	%	< 0,30	-	-	-	-	-	-
Autor			[79]	[134]	[105]	[35]	[77]	[113]

1) nach DIN 51 603, Heizöl EL

Die Dichte von Rapsöl mit 0,91 - 0,92 g/ml liegt ca. sieben Prozent höher, als der von der Norm DIN 51 603 für Heizöl geforderte Höchstwert.

Der untere Heizwert H_U von Rapsöl wird von verschiedenen Autoren mit 35,8 - 37,4 MJ/kg angegeben. Diese Werte liegen 11 - 15 % unter dem Mindestwert von Heizöl. Volumenbezogen ist der Energiegehalt von Rapsöl nur 5 - 9 % geringer als der von Heizöl.

Die Norm-Grenzwerte für den Flammpunkt und den Schwefelgehalt werden deutlich erfüllt. Seit dem 01. April 1988 darf der Schwefelgehalt im Heizöl EL nur noch 0,2 % (= 2 000 ppm) betragen.

Die kinematische Viskosität von Rapsöl bei 20 °C übersteigt den geforderten Mindestnormwert von 6 mm²/s um den Faktor 11 - 14. Die starke Temperaturabhängigkeit der Viskosität wurde bereits in Punkt 2.2.1 angesprochen.

Der Pourpoint von Rapsöl bewegt sich zwischen -20 bis -30 °C. Diese Werte sind günstiger als die Normvorgaben von -6 °C. Unter dem Pourpoint wird die um 3 K erhöhte Temperatur verstanden, bei der eine Probe beim Abkühlen nicht mehr fließfähig ist [2]. Von praktischer Bedeutung ist dieser Grenzwert im Hinblick auf mögliche Filter- und Leitungsverstopfungen, die die Funktionssicherheit der Verbrennungsanlage bei niedrigen Temperaturen beeinträchtigen könnten.

Die DIN 51 603 fordert beim Siedeverhalten eine maximal verdampfte Menge von 65 Vol.-% bis 250 °C und eine minimal verdampfte Menge von 85 Vol.-% bis 350 °C. Diese Begrenzungen gelten auch für Dieselmotoren (s. Kapitel 2.2.1.1) und werden auch von Rapsöl eingehalten.

Nach DIN 51 603 soll der Massenanteil an Koksrückständen (nach Conradson) 0,1 Gew.-% nicht überschreiten. Für rohes Rapsöl gibt SIMS 1982 [105] einen Wert von 0,224 % und GOERING et al. 1982 [35] für entschleimtes Rapsöl 0,30 % an. Nach letzterem Autor weisen zehn andere Pflanzenöle Verkokungsrückstände von 0,22 bis 0,27 Gew.-% auf. Eine Abhängigkeit zum Grad der Pflanzenölraffination ist festzustellen [25]. Bei einem teilraffiniertem Rapsöl geben HEGGER et al. 1988 [42] 0,12 Gew.-%

an. Für SCHMIDT et al. 1988 [101] ergeben sich jedoch auch bei Werten bis 0,3 Gew.-% keine Probleme beim Einsatz als Heizöl EL.

Rapsöl weicht aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung in der Dichte, dem Heizwert und der kinematischen Viskosität von den in DIN 51 603 für Heizöl EL geforderten Normwerten ab. Damit erfüllt Rapsöl eher die an Heizöl als die an Dieselöl gestellten Normforderungen.

Die Durchführung von Verbrennungsversuchen schien trotz der Abweichungen von den Normvorgaben angebracht. Die auf dem Prüfstand eines Brennerherstellers erzielten Ergebnisse werden nachfolgend erläutert.

2.3.1.1 Reines Rapsöl

Erste Versuche mit 100 % Rapsöl (raffiniert) wurden mit einem Zerstäubungsölbrenner für "extra leichtes" Heizöl EL (nach DIN 51 603) durchgeführt. Erst ab einem Pumpendruck von 21 bar war eine leichte Zerstäubung des Öls festzustellen. Bei 25 bar bildete sich erst eine Flamme, "wobei aber eine Flammenstabilität nicht zustande kam". Im Versuchsbericht [91] wird gefolgert, daß für den Betrieb mit reinem Rapsöl ein Brenner für Heizöl EL nicht geeignet ist.

Bezüglich seiner Viskosität ist Rapsöl etwa mit "mittelschwerem" Heizöl M nach DIN 51 603 (bis 75 cSt bei 50 °C) vergleichbar. Mit einem Brenner für diese Heizölkategorie wurden weitere Verbrennungsversuche durchgeführt. Nach Erprobung unterschiedlicher Einspritzdüsen und Luftmischeinrichtungen sowie Ölvorwärmtemperaturen konnten gute bis sehr gute Verbrennungskennwerte erzielt werden. Bei 20 bar Ölpumpendruck und Brennstoffvorwärmtemperaturen von 90 - 130 °C wurden konstante Kohlendioxidwerte (CO₂) von 13,5 Vol.-% (Maximalwert 15,4 Vol.-%), Stickoxidwerte von 100 - 120 ppm und kein Kohlenmonoxid (CO) gemessen. In Tabelle 11 sind die Meßwerte für drei Ölvorwärmstufen bei konstanten Betriebsverhältnissen vergleichend gegenübergestellt. Nach DIN 4 787 [141] zur Prüfung von Öizerstäubungsbrennern liegen dann konstante Betriebsverhältnisse vor,

wenn bei Durchführung von zwei Untersuchungen im Abstand von einer Viertelstunde sich der CO₂-Gehalt um nicht mehr als 0,2 %-Punkte und die Rußzahl sich nicht um mehr als ± 0,5 verändert.

Tab. 11: Verbrennungskennwerte bei Verbrennung von Rapsöl auf einem Prüfstand mit einem Ölbrenner für Heizöl M [91]

Ölvorwärm- temperatur	Verbrennungskennwerte					Ruß- zahl	Öldurch- satz
	CO ₂	CO	O ₂	NO _x			
°C	Vol.-%			ppm	mg/m ³		kg/h
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
90	13,5	0	3,6	118	251	0,6	2,94
110	13,5	0	3,7	98	209	0,8	2,77
130	13,4	0	3,7	99	211	0,8	2,83

Druckzerstäubungsbrenner, Düse: 0,5 Gallonen/h, Ölpumpendruck 20 bar; Kesselleistung 22 - 27 kW, "Heiße Brennkammer"; mg/m³ angegeben bei 3 Vol.-% O₂

Es war nur leichter Koksansatz an der Stauscheibe zu beobachten. Die Stickoxidwerte mit 210 - 250 mg/m³ wurden von RIEGER 1987 [91] im Versuchsbericht verglichen mit Heizölbetrieb als hoch bezeichnet; aus der Literatur werden bei Messungen an bestehenden Ölfeuerungen Werte von 180 - 280 mg/m³ (ϕ 215 mg/m³) [63] und 160 - 240 mg/m³ (ϕ 190 mg/m³) [69] angegeben. In der TA-Luft sind für genehmigungsbedürftige Anlagen im Leistungsbe-
reich 5 - 50 MW Werte bis 250 mg/m³ erlaubt [15]. Dieser Grenzwert, der für kleine Ölfeuerungen nur als Orientierungswert dient, wurde bei den Versuchen ähnlich wie bei den Heizöl-
feuerungen nur einmal erreicht und ansonsten unterschritten. Die in der Heizanlagen-Verordnung von 1978 [45] festgesetzten Mindestwerte von 9,5 Vol.-% bei CO₂ und die maximale Rußzahl (nach Baccarach) von 3 werden bei Befuerung mit Rapsöl weit unterboten.

Bei Prüfstandsdauerversuchen im Herstellerwerk [91] über fünf Tage betragen die Schaltintervalle je fünf Minuten Betrieb und Nicht-Betrieb (ca. 1 400 Schaltvorgänge). Am Ende des Versuches waren Feuerraum und Flammkopf sauber; an der Stauscheibe zeigte sich im Mittelloch eine leichte Verschmutzung, die vermutlich

durch Abtropfen von Brennstoff beim Abschaltvorgang herrührte. Düse und der Vorderteil des Düsenkopfes sowie die Zündelektroden waren mit einer halbdurchsichtigen, klebrigen Masse überzogen, die jedoch keine Störungen zur Folge hatte. Der Öldurchsatz war, wie auch bei den kurzzeitigen Prüfstandsversuchen, mit knapp 3 kg/h bewußt so gering wie möglich gehalten, da Probleme i.d.R. bei kleinen Wärmeleistungen verstärkt auftreten. Aus diesem Grunde lautete auch die Schlußfolgerung aus dem Fünf-Tage-Test, daß sich bei größerer Öldurchsatzleistung oder einem größeren Brenner die Probleme der Düsen- oder Stauscheibenverschmutzung von selbst lösen.

Diese Annahme traf nur bedingt zu. Bei der Praxiserprobung des Mittelöl-Brenners an einer Heizungsanlage auf dem landwirtschaftlichen Lehrgut des Bezirks Oberfranken traten trotz Verdoppelung des Öldurchsatzes (Düse 1,0 Gallonen/h) anfänglich erhebliche Verunreinigungen an den Zerstäubungseinrichtungen auf; diese konnten durch Erprobung verschiedener Mischeinrichtungen und Brennerdüsen behoben werden [5, 68].

Messungen der feuerungstechnischen Kenngrößen an obiger Anlage ergaben sogar noch einen höheren CO_2 -Wert mit durchschnittlich 13,9 Vol.-% (12,6 - 14,2 Vol.-%) als bei den Vorversuchen erzielt wurde. Es entstand kein Kohlenmonoxid; die Rußzahl lag bei 1 - 2 [5]. Im Dauerbetrieb über ein Jahr ergaben sich zwar keine brennstoffbedingten Störungen mehr, es bildeten sich jedoch im Kesselraum weiche, bitumenartige Beläge, die in geringerem Maße auch an den Brennerbauteilen auftraten. Diese Ablagerungen ließen sich im Vergleich zu Rückständen aus dem Heizölbetrieb schwieriger entfernen, so daß bei Rapsölverbrennung mit erhöhtem Reinigungsaufwand gerechnet werden muß. Gründe für die von den Prüfstandsergebnissen abweichenden Ergebnisse und Probleme dürften zum einen in den veränderten Strömungsverhältnissen bei der Praxisanlage (z.B. Kaminunterdruck mit 3,5 mbar zu hoch; zu hoher Luftdurchsatz im Kessel) liegen. Zum anderen trägt sicherlich der Umstand, daß die Brennkammer des verwendeten Kessels (70 kW) außen wasserführend ist, zu diesen Ergebnissen bei. Bei Heizkesseln neuerer Bauart sind die Wände des Feuerungsraumes beidseitig gasführend, und die heißen Verbrennungsgase kommen erst nach ihrer Umlenkung mit was-

serführenden Kesselteilen in Berührung. Diese Kesselkonstruktion mit einer sogenannten "heißen Brennkammer" ermöglicht höhere Feuerraumtemperaturen und somit einen besseren Ausbrand der Schwelgase, resultierend in geringerer Ruß- und Rückstandsbildung. Bestätigung erfahren diese Annahmen durch die bei den Vorversuchen mit einem Heizkessel mit "heißer Brennkammer" beobachteten Reinheit des Kesselraums sowie die mit Rapsöl-Heizöl-Gemischen gemachten Vergleichsversuche mit zwei Kesselbauarten (s. Kap. 2.3.1.2).

Zu Beginn der Praxisversuche traten Probleme mit der Brennstoffzuführung auf. In der Brennstoffansaugleitung aus dem Vorratstank wurde ein Ansaugunterdruck von 0,9 bar gemessen, während nach Herstellerangaben maximal 0,4 - 0,5 bar nicht überschritten werden sollten [131]. Trotz des starken Unterdruckes war keine ausreichende Brennstoffmenge mehr zum Brenner gelangt. Der Ersatz der Zuleitung von 10 mm Durchmesser durch eine mit 15 mm behob die Störung. Die Anwärmung der bestehenden Brennstoffzuleitung bzw. des Rapsöls zur Verringerung der Viskosität wäre vermutlich ebenfalls eine Problemlösung gewesen; zum Zeitpunkt der Störung herrschten im Tankraum Temperaturen unter 10 °C.

2.3.1.2 Gemisch Heizöl-Rapsöl

Aus den Vorversuchen zur Verfeuerung von reinem Rapsöl zeigte sich, daß die Verwendung in Ölbrennern für Heizöl EL aufgrund mangelnder Brennstoffzerstäubung nicht möglich ist. Deshalb sollte in einer weiteren Versuchsreihe ermittelt werden, welches Mischungsverhältnis erforderlich ist, um einen problemlosen Brennerbetrieb zu ermöglichen. Die Versuche wurden bei demselben Brennerhersteller durchgeführt [91].

Schrittweise wurde der Rapsölanteil von 75 auf 50 Gew.-% gesenkt. Erst ab einer Zumischung von 50 Gew.-% Heizöl war bei vorgeschriebenem Ölpumpendruck von 12 bar [131] eine gute Stabilisierung der Flamme zu beobachten. Das Brennstoffgemisch war auf 64 °C vorgewärmt, was einer Viskosität von 5,5 - 6,0 mm²/s

spricht (bei Rapsöl ca. $16 \text{ mm}^2/\text{s}$). Ohne Vorwärmung war "kein sicheres Betriebsverhalten" möglich.

An die Einstell- und Experimentierphase schloß sich ein Prüfstandsdauerversuch von 26 Stunden an, aufgeteilt in Intervalle von 10 Minuten Betrieb und 20 Minuten Pause (ca. 110 Schaltungen). Es ergaben sich zufriedenstellende feuerungstechnische Kennwerte von etwa 13 Vol.-% CO_2 , 0,0 % CO und 208 - 214 mg/m^3 NO_x (gemessen als NO_2). In Tabelle 12 sind die Werte bei 50 %iger Rapsölbeimischung zum Heizöl bei Versuchsbeginn und Versuchsende sowie Vergleichswerte mit demselben Brenner mit Heizöl EL angegeben.

Die Kennwerte veränderten sich nach dem 26-Stunden-Versuch nur geringfügig. Probleme mit Düsen- oder Mischeinrichtungverschmutzung waren nicht erkennbar. Nach RIEGER 1987 [91] ist der Anstieg der Rußzahl von 0 bei Versuchsbeginn auf 1,1 (gelb) bei Versuchsende vermutlich auch für den "hauchdünnen gelben Belag" im Feuerraum verantwortlich, der sich "jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach nicht aufbaut".

Tab. 12: Verbrennungskennwerte bei Verbrennung mit einem Gemisch aus Rapsöl und Heizöl EL (1 : 1) auf einem Prüfstand mit einem Ölbrenner für Heizöl EL [91]

Brennstoff	Verbrennungskennwerte					Rußzahl	Öldurchsatz
	CO_2	CO	O_2	NO_x			
	Vol.-%			ppm	mg/m^3		kg/h
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Heizöl EL	13,0	0	2,9	77	158	0,2	2,50
Versuchsbeginn	13,0	0	3,6	98	208	0,0	2,60
Vers.-ende	12,4	0	4,6	95	214	1,1	2,64

Druckzerstäubungsbrenner, Düse: 0,6 Gallonen/h, Ölpumpendruck 12 bar, Vorwärmtemperatur $64 \text{ }^\circ\text{C}$; Kesselleistung: 21 - 28 kW, "Heiße Brennkammer"; mg/m^3 angegeben bei 3 Vol.-% O_2

Die Erfahrungen bei 100 %igem Rapsölbetrieb in unterschiedlichen Kesselbauarten veranlaßten die Wiederholung der Versuche mit dem Rapsöl-Heizöl-Gemisch von 1 : 1 mit einem Kessel, der wasserführende Wände zum Feuerungsraum (sog. "kalte Brennkammer").

mer") besitzt. Bei gleicher Brenneinstellung wie oben (s. Tabelle 12) ergaben sich mit dieser Heizkesselbauart bereits nach 30 Stunden (ca. 400 Schaltintervalle) erhebliche Verschmutzungen an Mischeinrichtung und Feuerraum.

Als Abhilfemaßnahme wurde ein passendes Metallrohr in den Feuerraum gestellt zur Simulierung einer "heißen Brennkammer". Nach Wiederholung des 30-Stunden-Laufs waren die Ergebnisse mit denen aus dem Versuch bei konstruierter "heißer Brennkammer" vergleichbar; an den Bauteilen war keine Verschmutzung festzustellen. Eine zweite Lösungsmöglichkeit nach RIEGER ist in der Reduzierung des Rapsölanteils zu sehen (bei Originalbrennkammer). Ab einem Mischungsverhältnis von einem Teil Rapsöl und vier Gewichtsteilen Heizöl EL war ein zufriedenstellender, problemloser Betrieb über einen Zeitraum von 53 Stunden (465 Schaltintervalle) möglich.

RIEGER 1987 [91] folgert, daß unter der Bedingung einer Vorwärmung des Brennstoffgemisches auf mindestens 64 °C bezüglich der "Verbrennungskomponenten wie Rußzahl, CO, CO₂, NO_x und Kohlenwasserstoffen allgemein und auf Standzeiten und Betriebssicherheit ohne Berücksichtigung der Feuerraumverhältnisse im einzelnen von Normalbedingungen auszugehen ist". Konventionelle Brenner älteren Herstelldatums verfügen nicht über diese Vorwärmeinrichtung.

Ein Testlauf mit Rapsölmethylester (100 %) ergab sowohl mit als auch ohne Brennstoffvorwärmung (114 Stunden; 1477 Schaltungen) Ergebnisse, die mit Heizölbetrieb vergleichbar sind (s. Tabelle 13). Es bildete sich lediglich ein leichter, gelblicher Belag im Feuerraum.

Trotz günstiger Ergebnisse bei der Verbrennung von Rapsölmethylester wird dieses Produkt als Heizölersatz wegen der hohen Umesterungskosten (0,30 - 0,50 DM/kg, [36]) vermutlich keine Verwendung finden.

Tab. 13: Verbrennungskennwerte bei Verbrennung von Rapsölmethylester (100 %) mit und ohne Brennstoffvorwärmung auf einem Prüfstand mit einem Ölbrenner für Heizöl EL

Brennstoff	Verbrennungskennwerte					Ruß- zahl	Öldurch- satz
	CO ₂	CO	O ₂	NO _x			
	Vol.-%			ppm	mg/m ³		kg/h
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Heizöl EL	13,0	0	2,9	77	158	0,2	2,50
RME /64 °C	13,4	0	3,3	86	180	0,1	2,59
RME /ohne	13,1	0	3,4	91	190	0,1	2,84

Druckzerstäubungsbrenner, Düse: 0,6 Gallonen/h, Ölpumpendruck 12 bar;
Kesselleistung 21 - 28 kW; mg/m³ angegeben bei 3 Vol.-% O₂

Aus den Versuchen zur Verbrennung von Rapsöl und Rapsöl-Heizöl-Gemischen läßt sich folgendes ableiten:

- a) Rapsöl eignet sich aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung und seiner physikalischen Eigenschaften als Brennstoff für Zerstäubungsbrenner.
- b) Für reinen Rapsölbetrieb sind Ölbrenner für Heizöl M und S mit Brennstoffvorwärmung notwendig.
- c) Rapsölbeimischungen von 20 - 50 Gew.-% zum Heizöl EL sind in Ölbrennern für Heizöl EL einsetzbar. Rapsölmethylester kann in diesen Brennern unverdünnt eingesetzt werden.

Je nach Heizkesselbauart und Rapsölanteil können sich Verunreinigungen des Kessels durch unverbrannte Brennstoffteile ergeben.

Bei gleichen verbrennungstechnischen Kennwerten sind zur Erzielung gleicher Heizleistungen entsprechend dem Heizwert der Brennstoffe bei reinem Rapsöl 11 - 15 Gew.-% höhere Mengen als bei Heizöl EL aufzuwenden.

2.4 Lagerung von Rapsöl

Die Möglichkeit, Rapsöl als Kraft- und Brennstoff einsetzen zu können, macht es notwendig, den Energieträger bis zum Verbrauch zu lagern. Während der Lagerung und bis zum Verbrauchsort kommt das Rapsöl mit verschiedenen Materialien in Berührung. Nachfolgend sollen deshalb mögliche Lagerbedingungen, die Mischbarkeit und die Materialverträglichkeit von Rapsöl angesprochen werden.

2.4.1 Lagerungsbedingungen und Mischbarkeit

Pflanzenöle verändern ihre Eigenschaften bei der Lagerung. So tritt beispielsweise bei Vorhandensein von Metallionen Oxidation auf. Für diese katalysierende Wirkung sind Metalle, wie Blei, Kobalt, Mangan, Eisen, Zink, Vanadium, Kupfer, Nickel und Chrom bekannt.

Darüberhinaus führen auch Sauerstoffeintrag, Lichteinwirkung und Erhitzen zu Oxidationsprozessen und sogar zur Polymerisation von Öl [74, 25].

Aufgrund dieser Zusammenhänge haben sich in der Lebensmittelindustrie für die Lagerung von Pflanzenölen zu Nahrungszwecken nachfolgend angeführte Lagerbedingungen als zweckmäßig erwiesen [118, 161]:

- Lagerbehälter und Leitungssysteme in Edelstahl- oder Aluminiumausführung
- Lagertemperatur 10 - 15 °C über dem Schmelzpunkt
- Wassergehalt unter 0,2 %
- Luftraumfüllung im Lagertank durch Kohlendioxid (CO₂) oder Stickstoff (N₂)

Für eine Verwendung als Motorenkraftstoff ist weniger die oxidative Veränderung der Öle, als vielmehr eine Zunahme der Viskosität durch die Verkettung (Polymerisierung) der Fettmoleküle, die Bildung von festen Stoffen oder die Veränderung der Verbrennungseigenschaften von Bedeutung.

Versuche von ANJOU 1972 [4] weisen eine hochgradige Oxidation von Rapsöl nach drei- bis viermonatiger Lagerung bei 25 - 30 °C nach; es fehlt jedoch ein Hinweis auf sonstige Veränderungen im Öl. KUSY 1982 [59] verweist auf die Lagerung von Soja- und Sonnenblumenmethylester über acht Monate, wobei zwar leichte Ranzidität, jedoch kein Feststoffniederschlag oder Ausfällungsprodukt beobachtet wurde.

Von Lagerversuchen mit einer volumenmäßigen Beimischung von 33 % Raps- zu Dieselöl über 18 Monate berichtet SCHÄFER 1986 [97] aus Finnland. Dabei wurde das Gemisch in je 30-l-Kunststoffkanistern in einem beheizten Raum, einer Klimakammer, einem unbeheizten Lagerraum und an einem schattenlosen Platz im Freien gelagert. Als Ergebnis stellte SCHÄFER fest, daß "die deutlichsten, hinsichtlich der Kraftstoffqualität aber unbedeutendsten Änderungen sich in der Probe ergaben, die auf dem schattenlosen Platz gelagert worden war". Die Säurezahl verdoppelte sich von anfänglich 0,044 auf maximal 0,08 mg KOH/g Öl, während sich die Viskosität bei 20 °C nur von 13,55 auf maximal 13,73 mm²/s erhöhte (+ 1,3 %).

Desweiteren erwähnt SCHÄFER, daß das Gemisch mit 67 % Dieselölanteil nach längerer Lagerdauer (18 Monate) homogen bleibt. Diese Beobachtung bestätigt ebenfalls BALDWIN 1983 [10] aus den USA mit Gemischen aus Sojaöl und Dieselöl mit Mischungsanteilen von 10 bis 40 % des Pflanzenöls. Das Gemisch war durch einstündiges Umpumpen der beiden Komponenten in einen 2 000-l-Tank hergestellt worden. Bei Dichtebestimmungen von Proben aus dem oberen und unteren Tankinhalt ergab sich kein Hinweis auf eine Entmischung der Komponenten. RAMDEEN et al. 1982 [86] berichtet von Versuchen, ein Gemisch aus 50 % Sonnenblumenöl und 50 % Dieselöl mittels Zentrifuge zu trennen. Die homogene Mischung erlaubte keine Phasentrennung.

Auch JOHANSSON und NORDSTRÖM 1982 [48] verweisen auf ein mehr als zwölf Monate lang gelagertes, stabil verbliebenes Gemisch aus rohem Rapsöl und Dieselöl mit einem Mischungsverhältnis bis 1 : 1. Es zeigte sich, daß sich leichter eine homogene Mischung herstellen läßt, wenn das Pflanzenöl dem Dieselöl beigemischt wird als umgekehrt. Der Umstand, daß sich bei 40 % Rapsölanteil

nach einer Woche eine kleine Menge und bei 50 % eine etwas größere Menge Ablagerungen am Behälterboden absetzten, dürfte damit zusammenhängen, daß rohes Rapsöl verwendet wurde und die enthaltenen Schleimstoffe durch die Beimischung von Dieselöl nach und nach ausflockten.

Die oben angeführten Versuche bestätigen die von THOMAS 1976 [118] in einem Standardwerk gemachten Angaben zur Löslichkeit von Fetten und Fettsäuren. Danach sind Öle in organischen Lösungsmitteln, wie Kohlenwasserstoffen, chlorierten Kohlenwasserstoffen, Äther, Aceton usw., nicht aber in Alkoholen löslich.

Die umfangreichsten, im Schrifttum zu findenden Arbeiten zur Pflanzenöllagerung sind aus der Republik Südafrika bekannt. DU PLESSIS 1982 [25] beschreibt einen "Schnellagertest" (accelerated storage test) für Fette und Öle. Dabei werden definierte Mengen für eine festgelegte Zeitspanne auf eine Temperatur von 85 °C erwärmt und intervallmäßig Proben zur Peroxid-, Säurezahl- und Viskositätsbestimmung gezogen. Die Temperaturerhöhung beschleunigt Alterungsprozesse bei flüssigen Kohlenwasserstoffen. Bei flüssigen Kraft- und Brennstoffen wird die Oxidationsbeständigkeit ebenfalls durch zeitlich vorgegebene Wärmebehandlung bei Temperaturen von 80 bis 100 °C getestet und aus Farbveränderungen und Sedimentbildung auf die Lagerfähigkeit geschlossen [148, 150, 139]. Es wurden rohe, entschleimte und raffinierte Öle von Sonnenblumenkernen und Sojabohnen sowie jeweils eine Mischung dieser Öle mit Dieselöl (1 : 1, volumenbezogen) untersucht (s. Abbildungen 10 - 12).

Trotz stärkeren Anstiegs der Peroxidzahl von 0 auf bis zu 500 meq/kg und der Säurezahl von etwa 1 mg KOH/g auf teilweise 10 bis 14 mg KOH/g bei ca. 100 Stunden Versuchsdauer, ist bis auf eine Ausnahme nur eine Viskositätszunahme von 40 auf maximal 50 mm²/s zu verzeichnen.

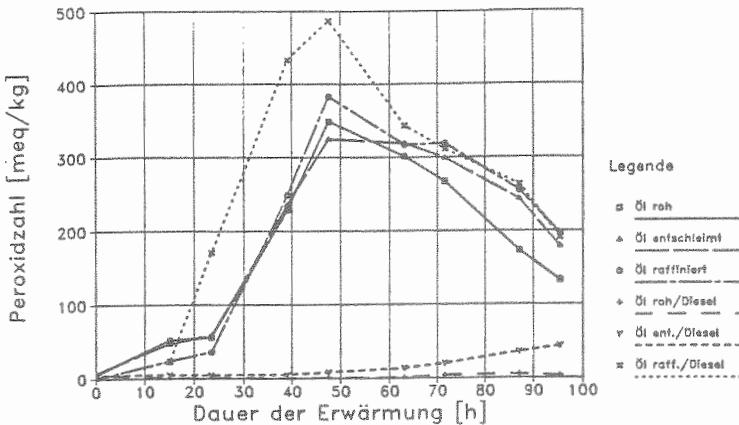


Abb. 10: Entwicklung der Peroxidzahl von Sonnenblumenöl bei konstanter Erwärmung auf 85 °C (nach DU PLESSIS [25])

Bis etwa 50 Stunden erfolgt der Anstieg der Peroxidzahl durch die Wärmebehandlung zunächst kontinuierlich, wobei die starke Zunahme von etwa 50 auf 300 bis 400 meq/kg erst ab 25 Stunden verzeichnet werden kann. Während jedoch die Peroxidzahl nach 40 - 50 Stunden Erwärmung bereits mit 300 bis 400 meq/kg ihr Maximum erreicht und danach stetig abfällt, beginnt die Säurezahl ab diesem Zeitpunkt erst kräftig anzusteigen. Der Anstieg von etwa 1 mg KOH/g Öl erreicht am Schluß der Versuche nach 93 Stunden Wärmebehandlung maximal 10 - 14 mg KOH/kg Öl. Nach der starken Oxidation an den Doppelbindungen der ungesättigten Fettsäuren nach etwa 50 Stunden findet nach und nach eine Abspaltung von Fettsäuren statt, die sich durch einen verstärkten Anstieg der Säurezahl ab diesem Zeitpunkt ausdrückt.

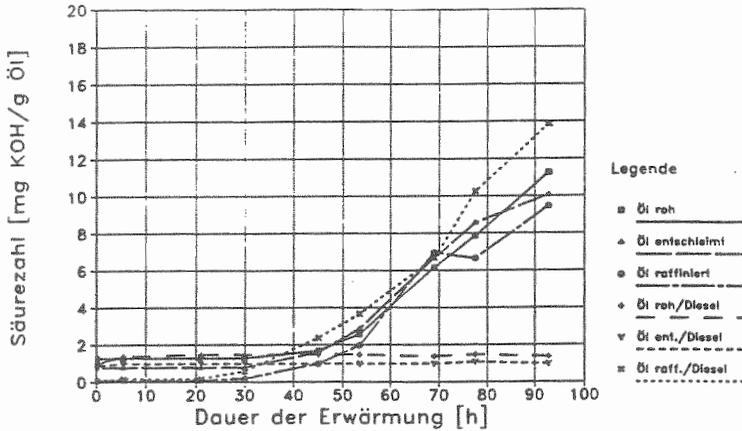


Abb. 11: Entwicklung der Säurezahl von Sonnenblumenöl bei konstanter Erwärmung auf 85 °C (nach DU PLESSIS [25])

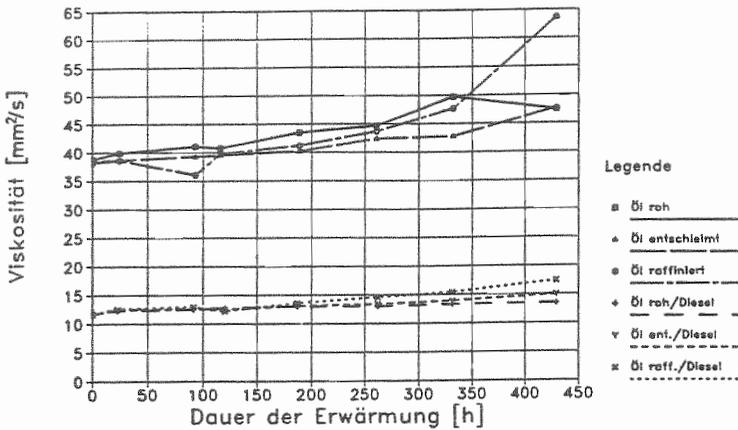


Abb. 12: Entwicklung der Viskosität (Messung bei 40 °C) von Sonnenblumenöl bei konstanter Erwärmung auf 85 °C (nach DU PLESSIS [25])

Entscheidend ist jedoch für den Kraftstoffeinsatz, daß die Viskosität der Öle bzw. der Pflanzenöl-Dieselmischungen sich während der gesamten Versuchsdauer von 430 Stunden nur geringfügig erhöhte und keine Ausfällprodukte gebildet wurden.

Die von DU PLESSIS erzielten Ergebnisse sind auch auf Rapsöl übertragbar. Es ist sogar mit geringeren Veränderungen der Kennzahlen zu rechnen, da Rapsöl mehr Öl- und weniger Linolsäure enthält (Jodzahl ca. 110) als das untersuchte Sonnenblumenöl (Jodzahl 130; s. Kapitel 2.1). Die Annahme ist insofern berechtigt, da bei Fettmolekülen mit drei Ölsäureketten im Vergleich zu solchen mit drei Linolsäureketten die Rate der oxidativen Reaktion sich wie 1 : 120 verhält [74].

Aber auch bei Umgebungstemperaturen von 20 °C und dem Beisein verschiedener Metallionen können Pflanzenöle stark oxidieren, wie verschiedene Autoren [25, 74, 97, 59] nachweisen. In keinem Fall wird jedoch von Veränderungen berichtet, die die Kraftstoffigenschaften beeinflussen könnten.

Die Ergebnisse des "Schnellagertestes" und der von anderen Autoren gemachten Beobachtungen lassen den Schluß zu, daß bei der Lagerung von Rapsöl im Vergleich zu Diesel- und Heizöl keine Abweichungen zu erwarten sind.

Es wirken jedoch nicht nur verschiedene Stoffe und Umgebungsbedingungen auf Pflanzenöle ein, sondern auch die Öle können verschiedene Materialien, mit denen sie in Berührung kommen, beeinflussen. Für die Verwendung auf dem Energiesektor stellt sich hierzu die Frage, ob die in Motoren, Lager- und Fördereinrichtungen verwendeten Metalle, Gummi- und Kunststoffteile beständig gegen pflanzliche Öle und Fette sind.

2.4.2 Materialverträglichkeit von Rapsöl

Versuche zur Materialverträglichkeit von Raps- und Sonnenblumenöl und deren Estern sind nur aus drei Literaturquellen bekannt.

Aus Neuseeland berichtet SIMS 1982 [105] von einem "Schwefel-Korrosions-Test". Dabei wurden polierte Kupferfolienstreifen drei Stunden lang in die auf 50 °C erwärmte Prüfflüssigkeit gelegt und der Grad der Verfärbung im Vergleich zu den Startbedingungen betrachtet. Bei Vorhandensein von Schwefel bilden sich Kupfersalze und bedingen eine Farbveränderung an den Folienoberflächen, die in einer Bewertungsskala von 0 - 10 beurteilt wird.

Für Dieselöl ergab sich ein Wert von 1,0 und für rohes Rapsöl von 0,5 ebenso wie für Rapsölethylester. Für Rapsölmethylester und einen Ester aus Butanol und Rindertalg gab es mit der Bewertungszahl 2,0 den höchsten Wert von insgesamt 18 untersuchten Ersatzkraftstoffen und diversen Gemischen mit Dieselöl. Nach dem amerikanischen ASTM D 130-Standard soll der Wert 3,0 nicht überstiegen werden [35].

Diese rein optische Beurteilung ist allerdings nur bedingt als Maßstab für Korrosivität zu verwenden. Wesentlich aussagekräftiger sind die Ergebnisse der Untersuchungen an Metallen, Kunststoffen und Gummiteilen, die FULS 1983 [30] und PISCHINGER et al. 1982 [83] veröffentlichten.

Aus der Republik Südafrika berichtet FULS von Versuchen mit rohem Sonnenblumenöl und mit Sonnenblumenölethylestern. Nur bei Grauguß (cast iron) und Walzstahl (mild steel) wurde bei Temperaturen von 25 und 50 °C eine Korrosionsrate von 1 µm/a festgestellt (NACE Standard TM-01-69). Bei hochwertigeren Stählen, Aluminium, Messing und Kupfer lagen die Ergebnisse unter diesem Wert.

PISCHINGER beschreibt Messungen, bei denen Materialproben von Aluminium, Messing und Stahl sechs Tage lang bei einer Temperatur von 50 °C Sojaölmethylester und Dieselöl ausgesetzt waren (ASTM D-525-Methode). Im Vergleich zum Referenzkraftstoff Dieselöl waren keine Unterschiede bei den untersuchten Proben festzustellen. Nur bei sehr stark oxidiertem Ester war bei Messing und Stahl die Korrosion höher als bei Dieselöl. Ein sechsmonatiger Versuch mit einem mit Ester gefüllten Kraft-

stofftank verlief "zufriedenstellend", wobei an vereinzelten Stellen leichter Korrosionsbefall feststellbar war.

An modernen Fahrzeugen werden heute aus Gründen der Gewichts- einsparung viele, auch kraftstoffführende Teile aus Kunststoffen und Gummitteilen gefertigt. Sollen pflanzliche Öle als Kraftstoffe eingesetzt werden, so muß untersucht werden, ob die verwendeten Materialien gegenüber den Alternativkraftstoffen beständig sind.

FULS 1983 [30] berichtet von Versuchen, bei denen thermoplastische Kunststoffe (ASTM D 534) und Gummimaterialien (ASTM D 471) bei 25 und 50 °C 670 Stunden in rohes Sonnenblumenöl und dessen Methylester eingebracht und die relative Massenveränderung (Δm), die Zugspannungsveränderung (Δt) und die Volumenveränderung (ΔV) gemessen wurden.

An Kunststoffen waren Polyamid (Nylon), Polyethylen H.D., Polypropylen, Poly-tetrafluorethylen-perfluorpropylen (Teflon) und Polyvinylchlorid (PVC) in die Versuche einbezogen. Bei den meisten Varianten war eine Massenabnahme im Bereich von 0,5 bis maximal 1,8 Gew.-% zu verzeichnen. Bei Polyethylen H.D. und bei Polypropylen erhöhte sich die Masse geringfügig um 2,2 bzw. 6,7 %. Bei diesen beiden Kunststoffen reduzierte sich auch die Zugspannung um 3,1 bzw. 7,6 %, während bei allen anderen Stoffen eine Zunahme der Zugspannung in einem Bereich bis 10 %, bei Teflon bis 20 % zu verzeichnen war (s. Anhangstabelle 1). Die Erhöhung der Zugspannung führt zu einer Zunahme der Reißfestigkeit, kommt allerdings auch einer Versprödung des Materials gleich und verringert somit die Schlag- und Bruchfestigkeit. Polyvinylchlorid weist eine Verdoppelung der Zugspannung auf und wird im Kunststoff-Taschenbuch von SAECHTLING-ZEBROWSKI [95] als unbeständig gegenüber Fettsäureestern eingestuft. Da eine Versprödung nicht gleichzeitig die Undichtigkeit eines Stoffes bewirkt, könnte PVC bei Bauteilen, die nicht stoß- oder druckbelastet sind, zumindest für reine Öle Verwendung finden.

In Fahrzeugen werden zur Abdichtung und für Leitungsschläuche unterschiedliche Kautschukarten verwendet. Nach Angaben von FULS [30] wurden Butyl-, Fluor-, Natur-, Nitrilkautschuk,

Polychloropren und Polyethylen nach obigem Verfahren untersucht. Von wenigen Ausnahmen abgesehen kam es bei fast allen diesen Kautschukarten zu Massen- und Volumenzunahmen, die sich in der Reihenfolge Öl-25-°C, Öl-50-°C, Ester-25-°C, Ester-50-°C erhöhten. Die Einzelergebnisse sind der Anhangstabelle 2 zu entnehmen. Mit Ausnahme von Butyl- und Naturkautschuk können für reine Pflanzenöle alle anderen untersuchten Gummiarten verwendet werden. Für die entsprechenden Ester sollten nach FULS nur Fluorkautschukarten eingesetzt werden, obwohl sich auch bei Versuchen mit Esterkraftstoff über 1 500 Stunden mit Nitrilkautschuk als Dichtungsmaterial keine Probleme ergaben. Dieses positive Ergebnis könnte eventuell auf die beim Prüfstandsduertest vorherrschenden höheren Temperaturen zurückgeführt werden, denn bei dem Materialprüftest waren bei 50 °C mit einem Prozent Massenzunahme und etwa sieben Prozent Volumenvergrößerung günstigere Werte erzielt worden, als bei einem Temperaturniveau von nur 25 °C. Im Gegensatz hierzu halten PISCHINGER et al. 1982 [83] Nitrilgummi für ungeeignet. Dieser Autor stellte auch fest, daß Polyformaldehyde, Asbest, Ebonite und Epichloridrine sich gegenüber Sonnenblumenölester und Dieselkraftstoff gleich verhalten.

Die Lagerung von Pflanzenölen und deren Estern ist auch in Behältern möglich, die für Dieselkraftstoff und Heizöl Verwendung finden (Eisen, Polyethylen). Gravierende Materialbeeinträchtigungen sind nicht zu erwarten. Kunststoffleitungen und Gummidichtungen sollten bei Verwendung von Esterkraftstoffen aus Fluorkautschuk bestehen.

3. Energieträger Rapsstroh

Neben der Verbrennung gibt es für geerntetes Rapsstroh wenig Verwertungsmöglichkeiten. Von der Verfütterung an Wiederkäuer rät CHOMYSZYN 1980 [17] wegen der schlechten Verdaulichkeit der organischen Substanz (34 %) und des geringen Futterenergiegehaltes von nur 20 StE/kg ab. Verantwortlich dafür ist die stark inkrustierende Rohfaser, die den Futterwert erniedrigt. Nach CHOMYSZYN enthält 1 kg Rapsstroh nur 0,07 - 0,1 Haferstroheinheiten.

Die Nutzung von Rapsstroh zur Energiegewinnung wurde bisher noch nicht untersucht. Die Wärmebereitstellung ist technisch am einfachsten über die Verfeuerung zu bewerkstelligen. Aus diesem Grunde soll für die energetische Verwertung von Rapsstroh nur die Verbrennung berücksichtigt werden, thermische und biologische Vergasung bleiben also unberücksichtigt.

Für die erzielbaren Energiemengen aus Rapsstroh ist die Ertrags-
höhe und der Energiegehalt mitbestimmend. Nachfolgend werden deshalb Untersuchungen zu Rapsstroherträgen, deren Erntbarkeit und Lagerung sowie die Aufbereitung als Brennstoff und die Verbrennung näher untersucht.

3.1 Erträge bei Rapsstroh

3.1.1 Rapsstroherträge in der Literatur

In der Literatur sind sehr unterschiedliche Angaben über Rapsstrohmengen zu finden. Eine Zusammenstellung des verfügbaren Zahlenmaterials wird in Tabelle 14 vorgenommen. Es werden Erträge zwischen 26 und 151 dt TS/ha angegeben. Ebenso schwankt das Korn-Stroh-Verhältnis zwischen 1 : 2,1 und 1 : 5,9*. Nur die Ergebnisse von ORLOVIUS 1982 [75] sind veröffentlicht. Die restlichen Daten beruhen auf persönlichen Mitteilungen von FRAUEN, PFAHLER, SCHELLER und SPIESS.

* HI = 0,32 und 0,14

Tab. 14: Rapsstrohmengen und Korn-Stroh-Verhältnis zum Erntezeitpunkt

Autor	Ort/Erntejahr	Ertrag dt TS/ha	K : Str 1 : ...	Methode/Art der Probenahme
Spalte 1	2	3	4	5
ORLOVIUS	Schl.-Holst. 77	151	3,6	1-qm-Parzellen
	Schl.-Holst. 79	113	3,5	
	Hessen/Bay. 79	101	3,2-4,3	
FRAUEN	Hohenlieth 83	109-126	2,2-2,4	Einzelpflanzen- auswertung Praxisversuch 10-qm-Parzelle Parzellen- mähdrescher Praxisversuche zur Verlust- messung beim Rapsdrusch
	Schl.-Holst.			
PFAHLER	Freising 83	26-58	-	
SCHELLER	Freising 83	98-112	4,1-5,9	
	Kaltenberg 83	123-149	4,3-5,4	
SPIESS	(Bay.)			
	Zollikofen 80	57	2,1	
	Tänikon 81	50	2,1	
	" (Schweiz) 82	39	1,2	
	" 83	35	1,0	
" 86	41	1,4		

TS = Trockensubstanz

Aufgrund der unterschiedlichen Probenahme und -flächen (s. Spalte 5), der verschiedenen Standorte und der zum Teil nicht bekannten Rapsorten lassen sich die Ergebnisse nicht direkt vergleichen. Auffällig ist der große Ertragsunterschied zwischen den in Praxisbeständen ermittelten Ertragszahlen von PFAHLER und SPIESS und den Werten aus Kleinflächen.

Wegen der unterschiedlichen Ertragsdaten und der geringen Zahl an Literaturhinweisen sind für genauere Aussagen mehr und besser gesicherte Ertragszahlen notwendig.

Für die Ermittlung weiterer Daten erschien folgende Vorgehensweise sinnvoll:

1. Ermittlung von Sorten- und Jahreseinflüssen auf Korn- und Strohertrag in Parzellenversuchen und darüber hinaus auf Rapsflächen im feldmäßigen Anbau
2. Durchführung von Bergeversuchen auf größeren Versuchsflächen

3.1.2 Methode der Ertragsermittlung von Rapsstroh

3.1.2.1 Sortenvergleichsversuche

Im Gegensatz zu Getreide sind für die Lagerfähigkeit bei Rapskorn und Rapsstroh unterschiedliche Feuchtegehaltsgrenzen einzuhalten. Bei Rapskorn sind 6 - 8 % notwendig; für Stroh reicht eine Spanne von 15 - 20 % aus. Zur Vereinfachung der Berechnungen wurden deshalb sämtliche Ertragswerte auf der Basis der wasserfreien Substanz (Trockensubstanz) verwendet und im Text auch so angegeben.

Im Rahmen der jährlich von der Bayerischen Landesanstalt für Pflanzenbau und Bodenkultur, Weihenstephan, durchgeführten Versuche zur Ermittlung des Korn-ertrages verschiedener Winterraps-sorten wurden in dieser Arbeit für die Jahre 1983, 1985 und 1986 auch die Rapsstrohmengen erfaßt. Das Versuchsfeld war jedes Jahr in vier Versuchsblöcke unterteilt, in denen jede Sorte mit einer Parzelle vertreten war. Die gesamte Strohmenge einer Parzelle, inklusive Schoten und Kurzstroh wurde aufgefangen, in einem Probenhäcksler zerkleinert und das Gewicht der Frischmasse ermittelt. Sofort nach der Wiegung wurde eine Mischprobe von dem Material entnommen und davon der Trocken-substanzgehalt bestimmt (3 Proben).

Zur Klärung der Frage des Sorten- und Jahreseinflusses auf Korn- und Strohertrag bzw. Korn-Stroh-Verhältnis wurde eine Varianzanalyse mit dem Statistikprogrammpaket von SAS³ 1985 [155] durchgeführt. Das Berechnungsmodell sieht wie folgt aus (Gleichung III):

$$Y_{ijkl} = \mu + \text{Sorte}_i + \text{Jahr}_j + \text{Block}_{jk} + e_{ijkl} \quad (\text{III})$$

Hier in bedeuten:

- Y_{ijkl} = Korn-, Stroherträge bzw. Korn-Stroh-Verhältnis der Sorten im jeweiligen Jahr
 μ = Ertragsmittel
 Sorte_i = fixer Effekt der i-ten Sorte ($i = 1 - 8$)
 Jahr_j = fixer Effekt des j-ten Jahres ($j = 1983, 1985, 1986$)

³) Statistic Analysis System

Block_jk = fixer Effekt des k-ten Blocks (k = 1 - 4) innerhalb des j-ten Jahres
 e_{ijkl} = zufälliger Restfehler

Da nicht jedes Jahr dieselben Sorten in den Versuch einbezogen waren, handelt es sich um ein unbalanciertes Modell.

3.1.2.2 Versuche in Rapsbeständen im feldmäßigen Anbau

Bei der Wahl der Versuchsbestände bzw. -betriebe war neben mehrjähriger Anbauerfahrung der Betriebsleiter in diesem pflanzlichen Produktionsverfahren vor allem der zu erwartende Erntezeitpunkt das Hauptkriterium. Die Organisation der Versuche war sehr aufwendig und dauerte jeweils zwei bis drei Tage, wobei der Erntezeitpunkt auf den Betrieben abgewartet werden mußte. Die Betriebe wurden so ausgewählt, daß über eine längere Zeit gestaffelte Erntezeitpunkte erwartet werden konnten.

Es wurde nur der Mähdrusch berücksichtigt, da er das verlustärmere Kornernteverfahren darstellt [108] und weniger Arbeit verursacht. Der Schwaddrusch ist in Schleswig-Holstein bereits unter die 30 %-Marke gesunken [71].

Bei der Ermittlung von Rapsstrohmengen wurde in die

- vom Mähdrescher aufgenommene Strohmenge Str_(auf) und
- erntbare Strohmenge Str_(ernt)

unterteilt.

Die vom Mähdrescher aufgenommene Strohmenge wurde mit der bei Verlustmessungen üblichen Planenmethode [82] bestimmt. Dabei waren das ganze aus dem Mähdrescher kommende Stroh und Kaff mit einer Plane über eine 20 - 30 m lange Meßstrecke aufgefangen worden. Der Auffangversuch begann jeweils erst nach einer bestimmten Vorlaufzeit während der Fahrt durch Einsetzen der Plane und endete nach der beabsichtigten Meßstrecke mit dem Absetzen. Der normale Druschverlauf wurde dabei nicht beeinflusst. Über die ermittelte Schnittbreite war eine flächenmäßige Zuordnung der aufgefangenen Gutsmenge möglich. In Abbildung 13 wird das Vorgehen verdeutlicht.

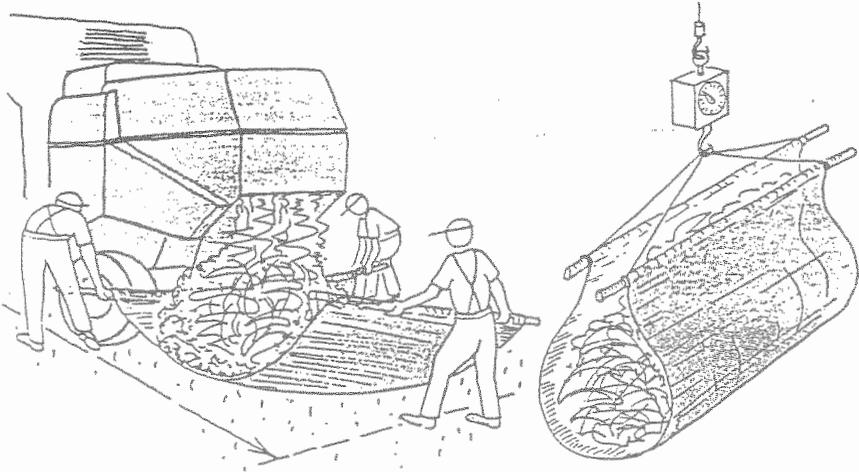


Abb. 13: Rapsstrohauffangversuch nach der Planenmethode

Bei Vorversuchen im Erntejahr 1984 wurde der notwendige Stichprobenumfang für statistisch gesicherte Mittelwerte ermittelt. Für einen Mittelwert \bar{x} (Genauigkeit 10 %) erwiesen sich bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit P von 95 % sechs Auffangversuche als ausreichend [152]. Soll das Rapsstroh geerntet werden, so ist der Anbauhäcksler des Mähdeschers auszuschwenken, damit das Stroh nicht zu stark zerschlagen wird.

Von jedem Auffangversuch wurde eine Mischprobe zur Bestimmung des Feuchtegehaltes gezogen und der sich daraus ergebende Mittelwert für die weiteren Berechnungen verwendet.

Die Ermittlung der Rapskornmengen erfolgte jeweils von den Flächen, von denen das Rapsstroh geerntet wurde. Hierzu war eine Entleerung des Mähdescherkorntanks vor und nach dem Drusch der Versuchsfläche notwendig. Die Kornmengen wurden gewogen und zur Bestimmung des Feuchtegehaltes eine Mischprobe gezogen.

Die Vorgehensweise bei den großflächigen Beständen beinhaltet durch das Probenahmeverfahren größere Fehlerquellen als bei den Parzellenversuchen. Aus diesem Grunde werden die Stroherträge in ganzen Einheiten (dt) und das Korn-Stroh-Verhältnis nur mit einer Stelle hinter dem Komma angegeben. Durch die Rundung der Ergebnisse bei den Stroherträgen kann ein Fehler in einer Größenordnung von 1 - 2 % entstehen.

Zur Ernte des Rapsstrohs kamen Bergegeräte zum Einsatz, wie sie derzeit üblicherweise für die Heu- und Getreidestrohbergung Verwendung finden. Den Bergeversuchen ging eine Bodenvortrocknung im Schwad voraus. Versuche hierzu sind in Kapitel 3.2 beschrieben. Die Bergequote Bq wurde als Verhältnis von geerntetem Stroh Str(ernt) zu dem beim Drusch erfaßbaren Stroh Str(auf) definiert (s. Gleichung IV) und in Prozent angegeben. Die vom Mähdrescher erfaßbare Rapsstrohmenge ergibt sich aus den jeweiligen Mittelwerten der oben beschriebenen Auffangversuche.

$$Bq = (\text{Str(ernt)} : \text{Str(auf)}) \cdot 100 \quad (\text{IV})$$

Hierin bedeuten:

Bq = Bergequote (in %)

Str(ernt) = geerntete Rapsstrohmenge (dt TS/ha)

Str(auf) = vom Mähdrescher aufnehmbare Rapsstrohmenge (dt TS/ha)

Erst durch die Erfassung der Verluste ist eine Bewertung des Verfahrens bezüglich Energieertrag und ökonomischer Kriterien möglich.

Ein Rapsbestand weist zum Druschzeitpunkt sowohl bereits abgestorbene braune Stengel als auch noch sehr grüne Stengel auf. Während die physiologisch bereits abgereiften braunen Stengelteile von der Dreschtrommel stark zerschlagen werden, sind die grünen Halme meist nur gequetscht und nicht abgeschlagen. Dieser Umstand kann bei der Probenziehung zur Ermittlung des Feuchtegehaltes zu einem erhöhten Anteil an grünen Stengelteilen führen, was einen geringeren Trockensubstanzanteil bei der Messung ergeben würde, als er tatsächlich in dem Strohgemisch aus dünnen und grünen Strohteilen vorliegt. Proben zur Bestimmung des Feuchtegehaltes wurden deshalb direkt von dem den Mähdrescher verlassenden Strohschwad gezogen, um auch alle

trockenen Stengelteile zu erfassen. Dazu wurde der Schwad in eine aus Aluminiumprofilen gefertigte, 15 cm breite Schwadzange eingeklemmt und die überstehenden Strohteile abgeschnitten. Abbildung 14 verdeutlicht die Vorgehensweise.

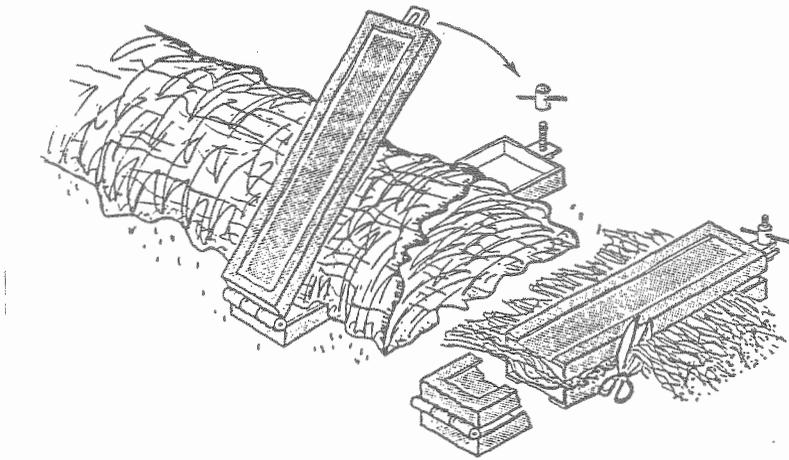


Abb. 14: Probenahme von Rapsstroh mit der Schwadzange

Die aufgeklappte Schwadzange konnte entweder während der Fahrt unter den Strohauswurf gelegt werden oder ließ sich auch unter den bereits am Boden liegenden Schwad einschieben. Dieses Vorgehen ermöglichte eine repräsentative Materialprobe zur Bestimmung des Feuchtegehaltes und zur Ermittlung bestimmter Stoffeigenschaften. Sämtliche Materialproben wurden vor der Trocknung in einem Probenhäcksler zerkleinert. Auf diese Weise ergab sich bereits bei drei Trocknungsproben eine Genauigkeit für die Standardabweichung um den Mittelwert von kleiner als 5 %.

3.1.3 Ergebnisse der Ertragsermittlungen

3.1.3.1 Parzellenversuchsergebnisse

Bei den in 10-qm-Parzellen angelegten Versuchen waren insgesamt acht Winterrapssorten in die Untersuchungen einbezogen worden, wobei die Sorten in jedem der drei Erntejahre in vier Versuchsblöcken (Wiederholungen) standen. Während der drei Aufwuchsperioden wurden neue Rapssorten in die Versuche miteinbezogen und eine ältere Sorte aus der Prüfung genommen. Aussaat- und Erntezeitpunkt, Düngung und Standort waren für alle Sorten innerhalb eines Jahres gleich, um zu gewährleisten, daß sämtliche Proben gleichen Umwelteinflüssen ausgesetzt waren.

Beim Drusch von Raps wird normalerweise das Gewicht und der Feuchtegehalt der Rapskörner gemessen. Bei konstantem Korn-Stroh-Verhältnis, wie es bei Getreide unterstellt wird, könnte bei bekanntem Kornertrag somit auf einfache Weise der Rapsstrohertrag ermittelt bzw. errechnet werden.

Bei den Versuchen zur Ermittlung der Rapsstrohmengen wurden auch die Kornerträge erfaßt. Deshalb kann die Frage untersucht werden, ob durch die Kornertragsbestimmung und das Korn-Stroh-Verhältnis eine vereinfachte Methode zur Ermittlung des Rapsstrohertrages möglich ist. Die Varianzanalyse nach dem in Gleichung III beschriebenen Modell läßt ebenfalls Aussagen über den Einfluß von Rapssorte und Erntejahr auf die gesuchte Verhältniszahl zu.

Aus den Einzelergebnissen der Sortenversuche errechnet sich ein durchschnittlicher Rapsstrohertrag von 75,0 dt TS/ha und ein Kornertrag von 28,9 dt TS/ha (s. Tabelle 15). Effektbereinigt ergeben sich Durchschnittserträge bei Stroh von 78,9 dt TS/ha und bei Korn von 29,7 dt TS/ha. Die Unterschiede ergeben sich dadurch, daß von den ertragsstarken neueren Rapssorten (BELINDA, KORINA, LIRAKOTA) nur vom letzten bzw. von den beiden letzten Erntejahren Versuchsergebnisse vorliegen.

Tab. 15: Signifikanztest und Least-Squares-Mittelwerte für die untersuchten Rapsernteerträge (n = 64, Gewichtsangaben in Trockensubstanz)

Kennzahl	Korn	Stroh	Korn/Stroh	Masse
Spalte 1	2	3	4	5
\bar{x} ¹	28,9 dt/ha	75,0 dt/ha	1 : 2,90	103,9 dt/ha
s	2,2 dt/ha	8,7 dt/ha	0,37	9,8 dt/ha
B	0,94	0,86	0,95	0,82
Rapssorte	***	*	**	*
BELINDA: \bar{x}	32,5 dt/ha	86,8 dt/ha	1 : 2,97	119,3 dt/ha
ELVIRA: \bar{x}	28,6 dt/ha	80,1 dt/ha	1 : 3,12	108,7 dt/ha
JET NEUF: \bar{x}	32,3 dt/ha	69,6 dt/ha	1 : 2,66	101,9 dt/ha
KORINA: \bar{x}	31,8 dt/ha	83,9 dt/ha	1 : 2,78	115,7 dt/ha
LIBRADOR: \bar{x}	24,8 dt/ha	75,4 dt/ha	1 : 3,61	100,2 dt/ha
LIRAKOTA: \bar{x}	34,1 dt/ha	81,6 dt/ha	1 : 2,71	115,7 dt/ha
QUINTA: \bar{x}	27,1 dt/ha	75,1 dt/ha	1 : 3,21	102,2 dt/ha
RUBIN: \bar{x}	25,0 dt/ha	75,4 dt/ha	1 : 3,41	103,8 dt/ha
Erntejahr	***	***	***	***
'83 (4 Sort) \bar{x}	21,9 dt/ha	03,9 dt/ha	1 : 5,07	125,8 dt/ha
'85 (5 Sort) \bar{x}	40,5 dt/ha	73,1 dt/ha	1 : 1,73	113,6 dt/ha
'86 (7 Sort) \bar{x}	26,3 dt/ha	59,7 dt/ha	1 : 2,37	86,0 dt/ha
Block (Jahr)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Sicherheitswahrscheinlichkeit P: n.s. = nicht signifikant; * = 95 %;

** = 99 %; *** = 99,9 %

1) arithmetisches Mittel aller Einzelbeobachtungen

Für das gewählte Berechnungsmodell (Gleichung III) ergeben sich hochsignifikante Einflüsse (P = 99,9 %) des Erntejahres auf die Stroh- und Kornerträge bei Raps bzw. auf die aus diesen beiden Erträgen errechneten Größen Korn-Stroh-Verhältnis und Gesamtmasse der Pflanze. Diese hohe Signifikanz (P = 99,9 %) ergibt sich auch beim Einfluß der Rapssorten auf die Rapskornerträge. Das war zu erwarten, da neue Rapssorten i.d.R. meist aufgrund eines höheren Ertragspotentials gegenüber älteren Sorten amtlich zugelassen werden. Der Einfluß der Rapssorte auf den Rapsstrohertrag und die Gesamtmasse ist mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit P von 95 % gegeben. Die Unterschiede zwischen den Blöcken der einzelnen Erntejahre sind nicht signifikant, d.h. Ertragsunterschiede innerhalb des Versuchsfeldes sind nicht auf unterschiedliche Bodenverhältnisse zurückzuführen.

Das Bestimmtheitsmaß B liegt für das verwendete Berechnungsmodell zwischen 0,82 und 0,94. Somit können 82 - 94 % der Gesamtstreuung durch das Modell erklärt werden [94]. Die Bestimmtheitsmaße sind sehr hoch und weisen auf eine gute Übereinstimmung des Modells mit den Versuchsergebnissen hin. Der geringe Restfehler kann beim Rapskornenertrag mit dem hohen Stand der Ertragszüchtung erklärt werden. Desweiteren wird der Faktor "Erntejahr" nicht stärker untergliedert. Einflüsse wie Niederschlagshöhe, Temperaturverlauf usw. werden dabei nicht gesondert berücksichtigt.

Sorteneinfluß

Es zeigen sich signifikante Sortenunterschiede sowohl beim Stroh- als auch beim Kornenertrag. Die durchschnittlichen Stroh- und Korneträge der einzelnen Sorten aus den Untersuchungsjahren sind in Abbildung 15 übersichtlich vergleichend aufgetragen. Der durchschnittliche Rapsstrohertrag aller Sorten von 75,0 dt TS/ha wird bis zu 7 % unter-, aber auch bis zu 15 % überschritten. Mit Ausnahme der Sorte JET NEUF weisen die kornertragsstarken Sorten BELINDA, KORINA und LIRAKOTA auch hohe Stroherträge auf.

Mit der Vergleichszahl von 93 besitzt die Sorte JET NEUF das geringste Strohbildungsvermögen. Der Spitzensorte BELINDA mit 116 folgen KORINA und LIRAKOTA mit Relativerträgen von 112 und 109. Die Prüfung dieser Ergebnisse mit dem Programm SAS [155] ergab bei vier Sorten einen signifikanten Ertragsunterschied (t-Test [153]). Es unterscheiden sich die Erträge von KORINA und BELINDA von QUINTA sowie die von LIBRADOR und JET NEUF von KORINA mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit P von 95 %. Der Unterschied zwischen der strohertragsstärksten Sorte BELINDA und der ertragschwächsten Sorte JET NEUF ist sogar hochsignifikant (P = 99 %).

Da das Rapskorn den Ausschlag über den möglichen Ölertrag gibt, wurde der Kornenertrag ebenfalls festgehalten und in Abbildung 15 als punktierte Säulen dargestellt.

Der Sortendurchschnittsertrag liegt bei 28,9 dt Korntrockensubstanz pro Hektar. Auch hier nehmen die Sorten LIRAKOTA mit 118, BELINDA mit 113 und KORINA mit 110 wie schon beim Stroh-

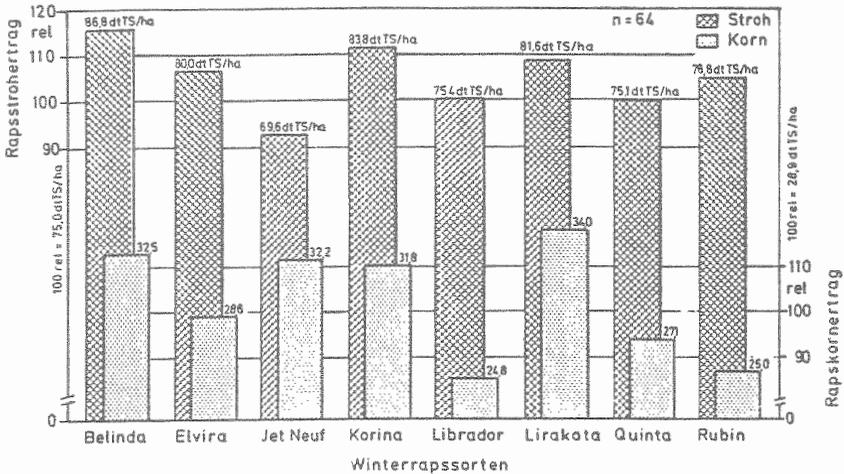


Abb. 15: Stroh- und Kornertäge von Winterrapssorten - Sortenvergleich Weihenstephan; Jahrgänge '83, '85, '86

ertrag die ersten Plätze ein. Die Sorte JET NEUF liegt mit einem Relativertrag von knapp 112 ebenfalls in dieser Spitzengruppe, obwohl sie bei der Strohbildung am schlechtesten abschneidet. Die Prüfung auf Signifikanz der Unterschiede weist die Sorten QUINTA, RUBIN und LIBRADOR als ertragsschwach aus (s. Tabelle 15). Dieses Ergebnis bestätigt auch die Erfahrungen der letzten Jahre der Sortenvergleiche durch die Bayerische Landesanstalt für Pflanzenbau und Bodenkultur, daß gerade die ersten erucasäure- und glucosinolatarmen, sog. 00-Rapssorten LIBRADOR und RUBIN im Kornertag deutlich schwächer sind, als die derzeit am häufigsten ausgesäten glucosinolatreichen Sorten, wie BELINDA, JET NEUF und LIRAKOTA [129].

Das durchschnittliche Korn-Stroh-Verhältnis liegt bei 1 : 2,90. In Tabelle 15 sind die Einzelergebnisse der Quotientenbildung aus Stroh- und Kornertag aufgelistet. Für die korn- und strohertragsstarken Sorten KORINA, LIRAKOTA und BELINDA errechnet sich ein effektbereinigtes durchschnittliches Korn-Stroh-Verhältnis von 1 : 2,72 bis 2,97. Bei den anderen Sorten über-

trifft die Strohproduktion die Kornbildung um das dreifache. Das Verhältnis liegt zwischen 1 : 3,12 und 1 : 3,61, d.h. neben den geringeren Kornerträgen haben diese Sorten einen überproportional starken Stroh-wuchs. Dabei sind die Daten um den Jahres- und Blockeinfluß (innerhalb des Versuchsfeldes) bereinigt.

Die Sorte JET NEUF weist mit 1 : 2,66 den niedrigsten Korn-Stroh-Quotienten auf. Da JET NEUF bei der Kornertragsbildung mit in der Spitzengruppe liegt, ist der niedrige Quotient auf das geringere Stroh-bildungsvermögen gegenüber anderen Sorten zurückzuführen.

Statistisch gesicherte Unterschiede bestehen nur zwischen den Sorten mit hohem und niedrigem Korn-Stroh-Verhältnis (P = 95 % bzw. 99 %).

Für den Wert von Raps als Energieträger sind jedoch nicht nur die Einzelerträge von Korn und Stroh, sondern der Gesamtpflanzen-ertrag entscheidend. Es zeigt sich, daß auch hier die Raps-sorten BELINDA, KORINA und LIRAKOTA dominieren mit Trockenmas-senerträgen zwischen 115 und 119 dt TS/ha (s. Tabelle 15). Die kornbetonte Sorte JET NEUF liegt im Gesamtertrag bei 102 dt TS/ha. Die Unterschiede zwischen den gesamtertrags-starken und den restlichen fünf Sorten sind alle signifikant (P = 95 %). Bei einer Sortenwahl zur Erzielung höchster Ge-samtpflanzen-erträge könnte wie bisher die Kornertragshöhe als Auswahlkriterium dienen.

Jahreseinfluß

Kornertragsschwankungen bei Raps sind aus den jährlich durchge-führten Sortenvergleichsversuchen und produktionstechnischen Versuchen bekannt [129], nicht jedoch das Verhalten der Stroh-erträge. Deshalb wurden zur Klärung der Frage des Jahresein-flusses auf den Strohertrag die Versuche der Jahre 1983, 1985 und 1986 auf diesen Einflußfaktor geprüft (Parzellenversuche).

Es wird deutlich, daß der Jahreseinfluß wesentlich größere Er-tragsschwankungen bedingt als dies durch die Sorten geschieht (s. Abbildung 16). Um fast 39 % wurde 1983 der Durchschnitts-

strohertrag von 75,0 dt TS/ha übertroffen und 1986 um nahezu 20 % unterschritten.

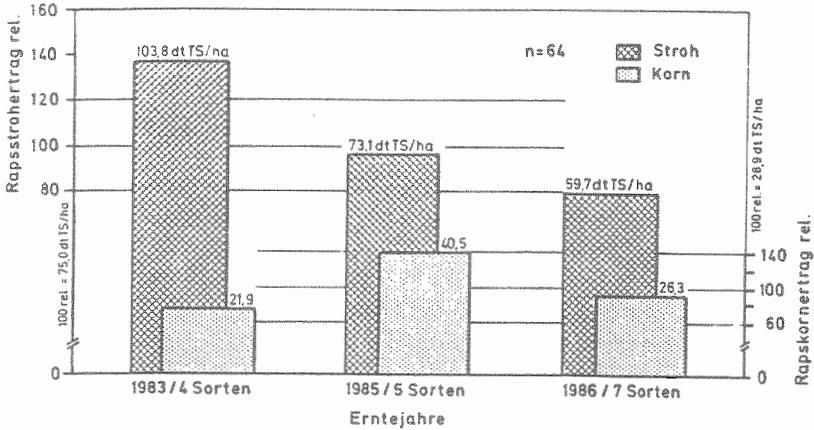


Abb. 16: Rapsstroh- und Kornertrag in den Erntejahren 1983, 1985 und 1986; 8 Sorten

Die Ergebnisse verdeutlichen, daß durch den Witterungsverlauf in den einzelnen Jahren sowohl die Korn- als auch die Strohentwicklung besonders begünstigt werden kann. Die Unterschiede sind sowohl bei den Stroh- als auch bei den Kornerträgen in den betrachteten Erntejahren mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99,9\%$ gesichert nachweisbar.

Der Einfluß der Versuchsblöcke ist in keinem der Versuchsjahre signifikant. Daraus folgt, daß keine statistisch gesicherten Unterschiede auf einem gleichmäßigen Versuchsfeld auftreten.

Die Wachstumsbedingungen in den einzelnen Erntejahren nehmen auch den stärksten Einfluß auf das Gewichtsverhältnis von Korn und Stroh, wie aus Tabelle 15 hervorgeht. Der Mittelwert des Quotienten aus Stroh und Korn von 2,90 wird 1983 um 75 % über-

troffen und zwei Jahre darauf um 40 % unterschritten. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Jahrgängen sind so groß, daß bei deren Prüfung die Sicherheitswahrscheinlichkeit P über 99,9 % liegt.

Ob die bei den Parzellenversuchen ermittelten Erträge bei Korn und Stroh auch in der Praxis erzielt werden können, läßt sich zumindest teilweise anhand der zur Ermittlung erntbarer Rapsstrohmengen durchgeführten Versuche nachprüfen.

3.1.3.2 Praxisversuchsergebnisse

Zur Ermittlung der erfaßbaren Rapsstrohmengen wurden an sechs Standorten in den Erntejahren 1985 und 1986 insgesamt acht Aufnahmversuche durchgeführt.

Im Jahr 1985 lagen die aufnehmbaren Rapsstrohmengen zwischen 48 und 65 dt TS/ha und im Jahr darauf unter 40 dt TS/ha. Die Rapsstroherträge und die Feuchtegehalte zum Druschzeitpunkt aus den Praxisversuchen sind zum besseren Vergleich in Tabelle 16 aufgelistet.

Tab. 16: Ergebnisse der Rapsstrohaufnahmversuche 1985 und 1986 (Angaben in Trockensubstanz)

Versuch Nr.	Ø aufn. Rapsstrohmengen dt/ha	Standardabweichung s dt/ha	Feuchtgehalt U beim Drusch %
Spalte 1	2	3	4
1	48	4,9	52,4
2	65	11,1	62,9
3	56	7,7	59,4
4	55	7,6	45,6
5	52	7,2	36,6
6	37	6,9	60,6
7	38	5,1	46,2
8	38	3,4	67,1

1 - 5 Erntejahr 1985

6 - 8 Erntejahr 1986

Die Ergebnisse der Versuche 1 - 5 stammen von vier unterschiedlichen Standorten und drei Winterrapsorten (s. Anhangstabelle 4). Der geringe Ertrag aus Versuch 1 liegt vor allem daran, daß die Rapspflanzen auf der Versuchsfläche sehr stark von dem tierischen Schädling Rapsstengelrüssler befallen waren, was zu einem verfrühten Abreifen (Notreife) führte. Dieser Schädlingsbefall senkt den Ertrag sowohl beim Korn- als auch beim Stroh erheblich.

Bei den drei Auffangversuchen 1986 lagen die Strohmenge knapp unter 40 dt/ha. Der geringere Strohaufwuchs im Jahre 1986 gegenüber 1985 stimmt tendenziell mit den Ergebnissen der Sortenversuche überein, die einen starken Jahreseinfluß auf die Erträge belegen (s. Abbildung 16).

Im Vergleich zu den in Parzellen angelegten Sortenversuchen sind bei den Praxisversuchen rund 22 bzw. 36 % geringere Rapsstroherträge zu verzeichnen. Wird berücksichtigt, daß in der Praxis meist die kornertragsstarke Sorte BELINDA angebaut war und bei Sortenversuchen auch ertragsschwächere Sorten, dürfte die Differenz zwischen Parzellen- und großflächigem Anbau noch größer ausfallen. Dieses Resultat ist jedoch sehr kritisch zu betrachten, da Standort, Saatzeitpunkt, Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen nicht einheitlich waren; zur stärkeren Absicherung dieser Aussage müßten noch mehr Auffangversuche durchgeführt werden. Der Vergleich mit den Literaturergebnissen in Tabelle 13 zeigt Übereinstimmung mit den durchgeführten Untersuchungen. Auch dabei liegen die unter praktischen Anbaubedingungen ermittelten Rapsstroherträge weit unter den bei Kleinflächen gemessenen Werten, die meist über der 100-dt-Marke angesiedelt sind. Bei den in der Schweiz durchgeführten fünfjährigen Erhebungen von SPIESS [109] war jeweils die als kurzstrohig bekannte Sorte JET NEUF im Versuch, so daß unter Einbeziehung der eigenen Versuchsergebnisse im mehrjährigen Durchschnitt von einem aufnehmbaren Rapsstrohertrag von 50 - 60 dt TS/ha ausgegangen werden kann.

Aus den vom Mähdrescher aufnehmbaren Strohmenge und den geernteten Kornerträgen läßt sich auch für die Praxisversuche

die Korn-Stroh-Konstante ermitteln. Als Strohertrag wird der Mittelwert eines Auffangversuches verwendet.

In beiden Versuchsjahren übersteigt der Strohertrag den Kornertrag nur um das 1,2- bis 1,9fache (s. Tabelle 17). Dabei ist die in den Parzellenversuchen beobachtete Tendenz für die Jahre 1985 und 1986 nahezu umgekehrt (s. Tabelle 15).

Tab. 17: Korn-Stroh-Verhältnis aus den Praxisversuchen 1985 und 1986

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
K : S = 1 : ...	1,6	1,9	1,7	1,5	1,4	1,8	1,2	1,2

1 - 5 Erntejahr 1985
6 - 8 Erntejahr 1986

Liegt im Jahre 1985 das Korn-Stroh-Verhältnis weitgehend bei den aus den Sortenversuchen für diese Jahre ermittelten Werten von 1 : 1,73, so liegen die Praxiswerte für 1986 mit 1 : 1,2 weit unter den Parzellenergebnissen. Auch bei dem Praxisversuch Nr. 6, der an die Vergleichsprüfung der Sorten direkt angrenzte, errechnete sich nur ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1 : 1,8. Sehr starke Abweichungen zwischen Parzellenanbau und Praxisbeständen dokumentiert auch die Zusammenstellung der Literaturergebnisse in Tabelle 13. Während FRAUEN 1983 bei Einzelpflanzenauswertungen ein Verhältnis von 1 : 2 und SCHELLER bei Parzellen ein Verhältnis bis 1 : 5 ermittelte, ergaben sich bei SPIESS im Praxisversuch gleichhohe Erträge bei Korn und Stroh.

Innerhalb der einzelnen Jahrgänge scheint jedoch eine gewisse Sortenstabilität bezüglich des Korn-Stroh-Verhältnisses zu herrschen. Bei den Versuchen 1, 3, 4, 7 und 8 war die Winterrapssorte BELINDA jeweils auf unterschiedlichen Standorten angesät; die Dünge- und Pflanzenschutzmaßnahmen waren ebenfalls uneinheitlich. Das Korn-Stroh-Verhältnis lag 1985 zwischen 1 : 1,5 und 1,7, 1986 bei 1 : 1,2.

Das Korn-Stroh-Verhältnis schwankt zwischen den einzelnen Jahren sehr stark. Zudem ergeben sich auch zwischen Parzellenanbau und Praxisbeständen sehr große Unterschiede. Es ist

aus diesem Grunde nicht möglich, beim Rapsanbau aus den Kornerträgen auf die aufwachsenden Rapsstrohmengen zu schließen.

Die durchschnittlichen Feuchtegehalte des Rapsstrohs der einzelnen Auffangversuche zum Zeitpunkt der Ernte lagen zwischen 37 und 67 %. Diese beiden Endpunkte der Ergebnisskala können jedoch als Extreme angesehen werden. Die beiden niedrigen Werte von 37 und 46 % ergaben sich nach einer fast dreiwöchigen Schlechtwetterperiode vor dem Erntezeitpunkt. Die verspätete Ernte führte dazu, daß der Bestand sehr gleichmäßig abgereift war und die deutliche Braunfärbung nahezu aller Stengel zum Druschtermin auf eine physiologische Totalreife der gesamten Pflanze hinwies.

Bei dem sehr hohen Feuchtwert hatten sich an den bereits voll ausgebildeten Rapspflanzen neue Seitensprosse gebildet, die sich zum Erntezeitpunkt noch in vollem Wachstum befanden und deshalb diesen hohen Feuchtegehalt verursachten. Diese Tatsache führte dazu, daß sogar erhebliche Störungen im Bereich der Reinigungsaggregate der Erntemaschine auftraten.

Abgesehen von diesen beiden Extremwerten ist zum Druschtermin bei normalem Witterungsverlauf mit einem Feuchtegehalt von 45 - 60 % zu rechnen. Bei diesem hohen Wassergehalt im Rapsstroh bedarf es vor der Bergung einiger Zeit zur Trocknung. Weiterführende Untersuchungen zur Trocknung waren deshalb notwendig.

3.2 Trocknung von Rapsstroh

Um Zersetzungs- und Fäulnisprozesse bei der Strohlagerung zu vermeiden und eine gute energetische Nutzung zu erreichen, sollte Rapsstroh möglichst trocken geborgen werden. Zum Druschzeitpunkt enthält Rapsstroh einen Wasseranteil von 50 - 65 Gew.-% (s. Kap. 3.1.3.2). Nur bei witterungsbedingten Ernteverzögerungen kann aufgrund der physiologischen Reife der Pflanze der Feuchtegehalt unter die 40 %-Marke sinken. Durch die Nachtrocknung auf dem Acker soll ein für die Lagerung und Verbrennung anzustrebender Feuchtegehalt von weniger als 20 % erreicht werden.

Da das Rapsstroh durch die Dreschwerkzeuge sehr stark angeschlagen und zerkleinert wird, sollte es nur im Schwad getrocknet werden. Ein Wenden des Materials läßt große Bröckelverluste erwarten. Bei Getreidestroh erfolgt eine Trocknung im Schwad bekanntermaßen nur sehr langsam, so daß bei Rapsstroh wegen der stark abweichenden Halmstruktur eigene Untersuchungen notwendig waren. In der Literatur sind zur Rapsstrohtrocknung keine Angaben zu finden.

3.2.1 Gleichgewichtsfeuchte

Die Trocknung wird durch Dampfdruckänderung im Trocknungsgut bewirkt. Die durch die Dampfdruckänderung mögliche Aufnahme oder Abgabe von Wasser wird als Sorption bezeichnet. Sie ist von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig. In Abbildung 17 wird dieser Zusammenhang für die Trocknung und Wiederanfeuchtung von Lieschgras verdeutlicht.

Da für Rapsstroh keine Literaturangaben zur Verfügung standen, mußten die Sorptionslinien als Grundlage zur Erklärung der Trocknungsvorgänge experimentell bestimmt werden.

Die Sorptionsisothermen wurden in einer Klimakammer bei Temperaturen von 20 und 30 °C ermittelt, da zum Druschzeitpunkt (Juli - August) von Raps am Tag Lufttemperaturen in dieser Höhe vorherrschten. Für den Erhalt der Desorptionslinie war eine Anfeuchtung und für die Adsorptionslinie eine schonende Nach-trocknung des lufttrockenen Ausgangsmaterials notwendig. Jeweils drei gehäckselte Strohproben lagerten in dünner Schüttung auf maschendrahtbespannten Rahmen und blieben bis zur Gewichtskonstanz in der Klimakammer. Die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit erfolgte in Schritten von 15 - 20 %-Punkten im Bereich von 20 - 90 % bei 30 °C und 35 - 85 % bei 20 °C Lufttemperatur. Ein größerer Meßbereich war mit der zur Verfügung stehenden Klimakammer nicht abzudecken.

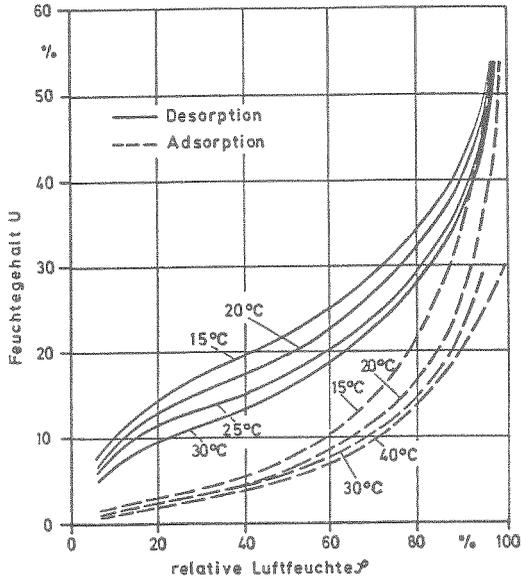


Abb. 17: De- und Adsorptionsisothermen für Lieschgras (nach TUNCER aus [133])

Bei Versuchsende wurde in der Klimakammer die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur der größeren Exaktheit wegen mit einem Aspirationspsychrometer nach ASSMANN bestimmt. Die Meßpunkte der in Abbildung 18 und 19 dargestellten Sorptionslinien bei 20 und 30 °C sind die Mittelwerte aus jeweils drei Einzelmessungen.

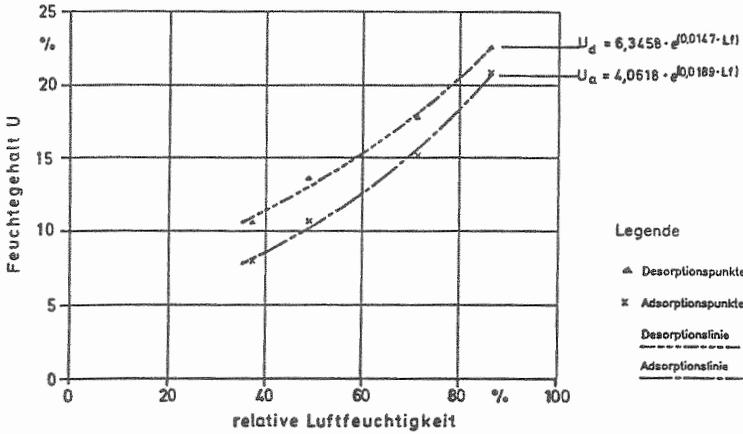


Abb. 18: Feuchtegleichgewicht von Rapsstroh bei ca. 20 °C

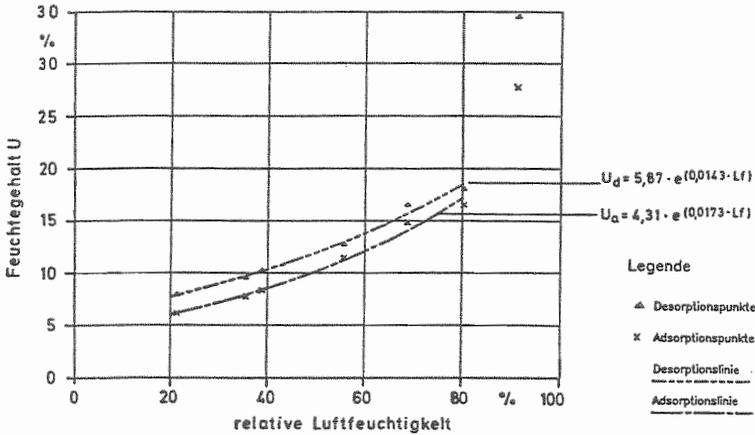


Abb. 19: Feuchtegleichgewicht von Rapsstroh bei ca. 30 °C

Bei Berechnung der Regressionsgleichung aus den Meßpunkten ergaben sich die höchsten Bestimmtheitsmaße B (Gleichungen V - VIII):

- bei 20 °C (40 - 85 % rel. Luftfeuchtigkeit):

- Desorption: $U_d = 6,34 \cdot e^{(0,01468 \cdot Lf)}$ $n = 4$; $B = 0,99$ (V)

- Adsorption: $U_a = 4,06 \cdot e^{(0,01887 \cdot Lf)}$ $n = 4$; $B = 0,99$ (VI)

- bei 30 °C (20 - 80 % rel. Luftfeuchtigkeit):

- Desorption: $U_d = 5,87 \cdot e^{(0,01437 \cdot Lf)}$ $n = 6$; $B = 0,99$ (VII)

- Adsorption: $U_a = 4,31 \cdot e^{(0,01726 \cdot Lf)}$ $n = 6$; $B = 0,99$ (VIII)

Hierin sind:

U = Gleichgewichtsfeuchtegehalt in %

Lf = rel. Luftfeuchtigkeit in %

Tendenziell zeigen die Meßwerte für die Sorptionslinien bei Rapsstroh mit den in Abbildung 17 dargestellten Werten für Lieschgras, aber auch für Holz und verschiedene Lebensmittel gute Übereinstimmung [57, 44]. Die errechneten Regressionskurven entsprechen im Bereich über 80 % relativer Luftfeuchtigkeit nicht dem in der Literatur für Lieschgras oder Holz angegebenen Verlauf, was mit der geringen Zahl der Meßpunkte für diesen Abschnitt erklärt werden kann. Hierin liegt auch der Grund, daß statt der erwarteten quadratischen Funktion eine Exponentialfunktion die Meßpunkte am besten darstellt. Mit der angewandten Methode ist jedoch die Messung im Bereich über 80 % relativer Luftfeuchtigkeit sehr zeitaufwendig. Ab 90 % konnte bereits Schimmelbildung auf dem Probenmaterial beobachtet werden, so daß bereits der Desorptionspunkt bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit (bei 30 °C) fehlerbehaftet sein dürfte. Da bei regengeschützter luftiger Lagerung die relative Luftfeuchtigkeit im Durchschnitt unter 85 % liegt, kann der abgedeckte Meßbereich jedoch als praxisgerecht angesehen werden.

Für alle Trocknungsvorgänge auf dem Feld, aber auch für die Nachtrocknung im Lager oder für eine Belüftungstrocknung, ist die Desorptionsisotherme von Bedeutung. Aus deren Werten läßt sich ableiten, bei welchen Lufttemperaturen und relativen Luftfeuchtigkeitsgehalten noch ein Trocknungseffekt erzielt werden kann. Bei einer mittleren Lufttemperatur von 20 °C und einer

mittleren Luftfeuchtigkeit von 60 %, wie sie während Schönwettertagen in den Monaten Juni bis August vorkommen (s. Anhangstabelle 4 und [133]), sind bei Rapsstroh Gleichgewichtsfeuchten von ca. 15 % möglich.

Für eine Wiederbefeuchtung von stark getrocknetem Material ist dagegen die Adsorptionsisotherme wichtig. So stellt sich theoretisch bei Verwendung der Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in Weihenstephan [20] bei freiem Luftzutritt, jedoch regengeschützter Lagerung, im August aufgrund obiger Gleichungen bei 70 % relativer Luftfeuchtigkeit ein Gleichgewichtsfeuchtegehalt von 16 - 18 % ein. Für den langjährigen Ganzjahres-Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit in Weihenstephan von ca. 80 % ergibt sich aus obigen Gleichungen eine Gleichgewichtsfeuchte von 17 - 19 %. Aufgrund der Hysterese ist erst bei einem Anstieg der durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von 6 - 8 %-Punkten mit einem Anstieg des Feuchtegehalts im Erntegut zu rechnen.

Nach LEHMANN 1971 [60] liegen die Lebensbereiche von Schimmelpilzen und Bakterien in Halmfutter bei einem relativen Luftfeuchtegehalt von 70 % und darüber. Unter der Annahme, daß diese Erkenntnisse auch auf die Lagerung von Rapsstroh übertragbar sind, ist es notwendig, daß Rapsstroh mit einem Feuchtegehalt von 17 % und weniger eingelagert wird. Für die Verwendung von Rapsstroh als Brennstoff stellt leichter Schimmelpilzbefall jedoch keine Qualitätsbeeinträchtigung dar.

3.2.2 Rapsstrohtrocknung im Schwad

Um den Verlauf der Rapsstrohtrocknung (Bodentrocknung) beobachten zu können, wurde eine Methode gewählt, die sich bei der Bestimmung des Trocknungsverlaufes im Bereich der Bodenheugewinnung an der Landtechnik Weihenstephan und Göttingen [88] bereits bewährt hat. Dabei wird ein Stück des Strohschwads auf einen mit Maschendraht bespannten Aluminiumrahmen gelegt und der Rahmen mit dem Stroh in bestimmten Zeitabständen gewogen. Eine Zeltvorrichtung über dem Meßgestell und den Proben gewährt

eine durch Windeinfluß unverfälschte Messung. Der Aufbau der Meßvorrichtung geht aus Abbildung 19 hervor.

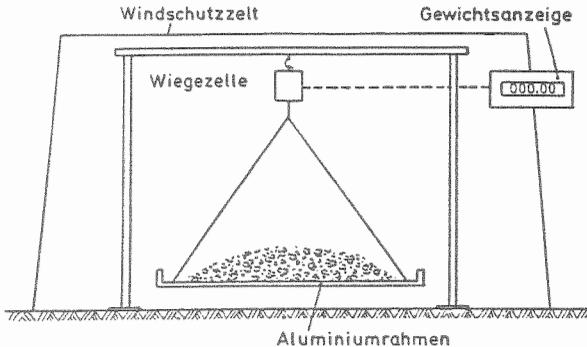


Abb. 20: Wiegevorrichtung zur Beobachtung des Trocknungsverlaufs

Nach der Wiegung kam der Rahmen jeweils wieder an die Entnahmestelle in den Schwad zurück. Die Verwendung von sechs Rahmen erwies sich als ausreichend, um statistisch gesicherte Mittelwerte mit einer Genauigkeit von 10 % zu erreichen ($P = 95 \%$).

Die Probenentnahme zur Bestimmung des Feuchtegehaltes erfolgte nach Beendigung der Versuche. Dabei wurde mit der Schwadzange von dem auf dem Rahmen befindlichen Material eine Probe entnommen, mit einem Probenhäcksler zerkleinert und im Trockenschrank der Feuchtegehalt bestimmt (3 Wiederholungen). Vom gemessenen Wert des Endfeuchtegehaltes erfolgte dann über die Daten der einzelnen Wiegungen die Rückrechnung auf die Feuchtegehalte zu den entsprechenden Meßzeitpunkten.

Die zum Zeitpunkt der Messungen vorherrschenden Witterungsverhältnisse sind aus den Aufzeichnungen der jeweils nächstgelegenen Wetterstation (Weihestephan, Oberschleißheim, Bamberg) zu ersehen. Ergebnisdaten sind der Anhangstabelle 4 zu entnehmen.

Nach RATSCHOW 1974 [88] ist die Wasserverdunstung bei der Bodenheutrocknung durch Sonneneinstrahlung doppelt so hoch wie

durch die Konvektion. Die Messung der Einstrahlungsintensität der Sonne und der Luftbewegungen (Windverhältnisse) im Trocknungsgutsbereich sowie der Wassernachlieferung durch den Boden erfordert jedoch einen sehr hohen apparativen Aufwand. Wegen fehlender Meßgeräte und aus organisatorischen Gründen war eine Erfassung dieser Kennwerte nicht möglich, deshalb wurde auf die Suche nach mathematischen Zusammenhängen zwischen dem Trocknungsverlauf und den Witterungsdaten verzichtet.

Insgesamt wurden sieben Meßserien zur Feststellung des Trocknungsverlaufs bei Rapsstroh durchgeführt. In Abbildung 21 ist beispielhaft der Trocknungsverlauf einer Messung mit Verlauf der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte aufgezeichnet. Der Witterungsverlauf und die Entwicklung des Feuchtegehaltes sind vergleichbar mit der Mehrzahl der anderen Versuche. Bei späteren Versuchen wurde die Zahl der Messungen reduziert. In dem Beispiel sinkt der Feuchtegehalt des Rapsstrohs am Tag nach dem Drusch unter 20 %. Die Feuchtegehalte des Rapsstrohs auf den einzelnen Rahmen unterschieden sich zu Versuchsbeginn um bis zu 10 %-Punkte. Mit der Abnahme des Feuchtegehaltes verringerte sich diese Spanne.

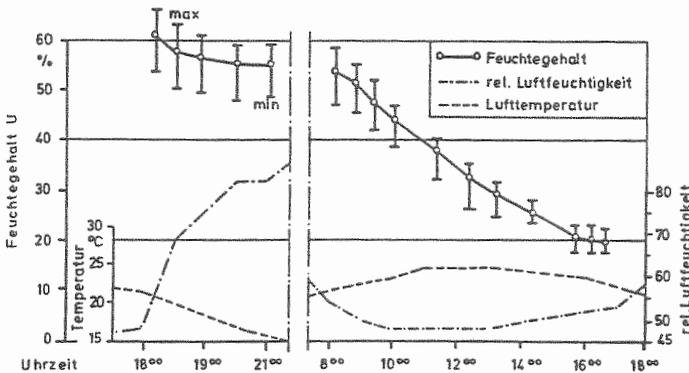


Abb. 21: Trocknungsverlauf von Rapsstroh im Schwad nach dem Drusch (Freising 1985)

Es wurden sieben Versuche zur Bestimmung des Trocknungsverlaufs von Rapsstroh durchgeführt (Abbildung 22). Um die Erntearbeiten der Versuchsbetriebe möglichst wenig zu beeinflussen als auch aufgrund der Versuchsvorbereitungen konnten die Messungen jeweils erst zwischen 12 und 18 Uhr begonnen werden; manchmal war aus organisatorischen Gründen nur eine begrenzte Zahl von Wiegungen möglich. Auch bei diesen Versuchen schwankten die Meßwerte aus sechs Wiegungen zu einem Meßzeitpunkt um bis zu 10 %-Punkte im Wassergehalt.

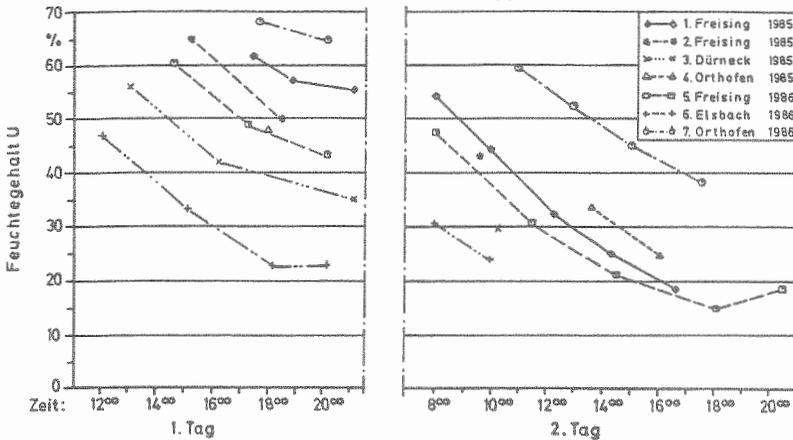


Abb. 22: Trocknungsverlauf von Rapsstroh im Schwad nach dem Drusch (Mittelwerte aus sechs Trocknungsrahmen)

In Abhängigkeit von Druschzeitpunkt und Anfangsfeuchtegehalt ist zunächst eine starke Abnahme der Strohfeuchte erkennbar, die durch das hohe Sättigungsdefizit erklärt werden kann. Insbesondere in den frühen Nachmittagsstunden führt dieses hohe Sättigungsdefizit durch die geringe relative Luftfeuchte (s. Abbildung 21 und Witterungsdaten in Anhangstabelle 4) und Feuchtegehalte nach dem Drusch bis zu 65 % zu Trocknungsgeschwindigkeiten von 0,20 bis 0,25 kg Wasserentzug/kg Trockensubstanz und Stunde bei den Versuchen 2 und 5. Bei geringeren Anfangsfeuchten (Versuch 3 und 6) oder einem Drusch nach 18.00 Uhr (Versuch 1 und 7) konnte nur noch ein Wasserverlust

von 0,10 bis 0,17 kg/kg TS·h verzeichnet werden. Sinkt der Feuchtegehalt auf weniger als 35 %, so nimmt die Trocknungsrate wegen des geringeren Sättigungsdefizits der Luft auf weniger als 0,10 kg Wasserentzug/kg TS·h ab.

Gegen Abend und in der Nacht nimmt bereits stark getrocknetes Material sogar wieder Feuchtigkeit auf. Die erneute Wasseraufnahme ist jedoch erst bei einem Wasseranteil von weniger als 50 % im Rapsstroh zu beobachten.

Steht für die Bodentrocknung an einem warmen Sommertag ein Zeitraum von etwa zehn Stunden zur Verfügung, so ist eine Reduktion des Feuchtegehaltes bis zu 30 %-Punkte möglich. Bei einer Vortrocknung des Rapsstrohs auf ca. 50 % Feuchtegehalt am Druschtag kann im günstigen Fall am späten Nachmittag des darauffolgenden Tages mit der Ernte des Halmgutes begonnen werden. Der Wassergehalt des Rapsstrohs kann zu diesem Zeitpunkt unter 20 % betragen; WIENEKE 1972 [133] empfiehlt Halmgut ab diesem Feuchtegehalt zu ernten.

Erfolgt der Drusch erst in den Abend- oder Nachtstunden, so beginnt der Trocknungsvorgang erst am nächsten Tag nach dem Abtrocknen der in der Nacht oberflächlich angelagerten Taufeuchte. Die Trocknung beginnt aber bereits in den Morgenstunden, so daß am ersten Trocknungstag mehr Zeit zum Wasserentzug zur Verfügung steht als beim Mähdrusch in den Nachmittagsstunden.

Bei günstiger, regenfreier Witterung ist die Ernte von Rapsstroh einen Tag bis zwei Tage nach dem Drusch mit einem ausreichenden Trocknungssubstanzgehalt von 80 % und mehr möglich. Wird davon ausgegangen, daß dem Druschtag mindestens ein regenfreier Tag zur ausreichenden Korntrocknung vorangegangen ist, so ist für die Bergung von Rapsstroh eine Schönwetterperiode von mindestens drei bis vier Tagen notwendig. Nach OLFE 1971 [73] kommen solche Perioden im 20-jährigen Durchschnitt in den Monaten Juli und August je zwei- bis viermal vor (s. Abbildung 23).

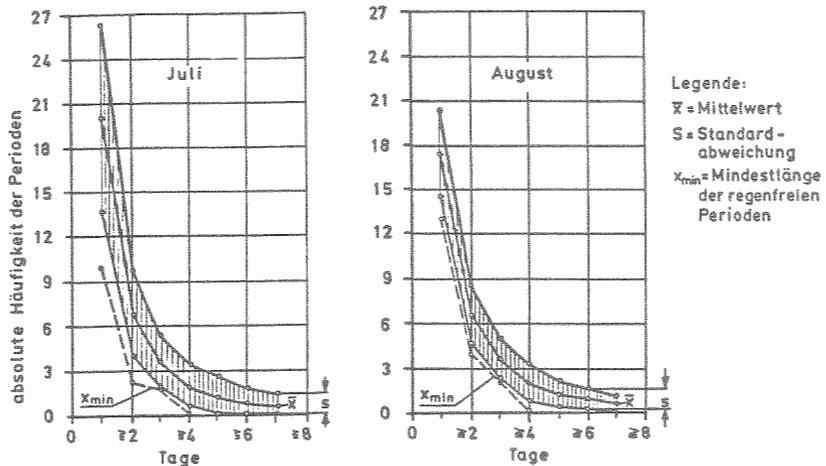


Abb. 23: Mindestlänge und Häufigkeit regenfreier Tagesperioden der Jahre 1948 - 1968 [73]

Im Gegensatz zur Grünfüttererkonservierung durch die Bodentrocknung ist das Witterungsrisiko insofern geringer einzustufen, als eine Abnahme bestimmter Inhaltsstoffe oder eine geringere Verdaulichkeit auf die Verwendung des Rapsstrohs als Brennstoff keinen Einfluß haben. Eine Befeuchtung durch Regen stellt, abgesehen von einem möglichen Massenschwund, keine Wertminderung dar.

3.3 Ernte von Rapsstroh

Bei Vorversuchen war zu beobachten, daß im Gegensatz zur Bergung von Getreidestroh ein hoher Anteil des im Schwad vorge-trockneten Rapsstrohs mit herkömmlichen Halmguterntegeräten nicht aufgenommen werden konnte. Daher war es notwendig weitere Versuche zur Bergung von Rapsstroh durchzuführen.

Es erschien folgende Vorgehensweise zweckmäßig: Für die Auf-fangversuche nach dem Mährescher waren in den jeweiligen Ver-

suchsflächen homogen erscheinende Teilstücke gewählt worden. Nach ausreichender Strohtrocknung wurden jeweils die Schwade geerntet, bei denen auch bereits die Auffangversuche durchgeführt wurden. Das aufgefangene Rapsstroh war zuvor wieder auf den Schwad verteilt worden. Bei diesem Vorgehen wird unterstellt, daß die ermittelten Stroherträge jeweils auf die gesamte Schwadlänge übertragbar sind.

Für die Strohbergung wurden zwei Rundballen-Pressen, drei HD-Ballenpressen und zwei Ladewägen eingesetzt. Mit allen Geräten war eine störungsfreie Strohaufnahme möglich. Es konnten in zwei Versuchsjahren acht Ernterversuche auf Flächen von 1 000 bis 3 000 m² durchgeführt werden. Die Ernteerträge schwankten bei Rapsstroh zwischen 24 - 38 dt TS/ha. In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der einzelnen Versuche zum besseren Vergleich zusammengestellt. Bezogen auf einen Feuchtegehalt von 17 % (lufttrocken) errechnen sich Erntemengen von 29 - 46 dt/ha. Die nach Gleichung IV (S. 65) errechnete Erntequote weist mit 46 - 85 % sehr starke Schwankungen auf. Die Schwadgewichte betragen zwischen 1,1 und 3,0 kg TS/lfm, je nach Strohertrag und Schnittbreite des Mähdeschers.

Tab. 18: Geerntete Rapsstrohmengen und Bergequote bei den Praxisversuchen (Bezug Trockensubstanz)

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Erntemenge dt TS/ha	26	38	28	25	29	31	24	32
Schwadgewicht kg TS/lfm	1,4	3,0	2,1	1,9	2,1	1,3	1,1	1,7
Bergequote %	54	57	50	46	55	83	63	85

1 - 5 Erntejahr 1985; 6 - 8 Erntejahr 1986

Die starken Unterschiede bei der Erntequote können mehrere Ursachen haben. Zum einen sind in den Bereichen, wo das Rapsstroh nicht aufgefangen wurde, Ertragsschwankungen möglich (s. Standardabweichungen bei Auffangversuchen in Tabelle 19). Zum anderen war das Rapsstroh nach dem Drusch z.T. sehr stark zerkleinert und lagerte deshalb sehr dicht am Boden, so daß nur noch rund die Hälfte des Strohs aufgenommen werden konnte (Versuch Nr. 4). Ein weiterer Grund könnte in der geringen Erfahrung der

Arbeitspersonen mit den verwendeten Bergegeräten zu sehen sein. Desweiteren war es nicht möglich, bei allen Versuchen gleiche Geräte zu verwenden. Aus diesem Grund können die in Tabelle 18 ermittelten Werte nur die mögliche Spanne für die zu erzielende Erntequote angeben. Unter günstigen Voraussetzungen dürfte die Quote bei rund 70 - 80 % liegen.

Aus den Ergebnissen der Bergeversuche läßt sich ableiten, daß sich für die Aufnahme des sperrigen und stark zerkleinerten Rapsstrohs besonders Geräte eignen, die einen möglichst geringen Durchmesser der Pick-up und kleine Federzinkenabstände aufweisen. Die beiden höchsten Erntequoten wurden bei der Strohaufnahme mit Ladewagen erzielt, die obige Konstruktionsmerkmale aufwiesen.

Mit den verwendeten Pressen ergaben sich feste und formstabile Rapsstrohbällen. Im Vergleich zur Getreidestroh- und Heubergung mußte beim Stroh der Ölsaat allerdings die Federspannung am Preßkanal erhöht werden, um vergleichbare Dichten zu erzielen. Bezogen auf die Trockensubstanz ergaben sich spezifische Ballendichten von 75 - 98 kg TS/m³ (s. Tabelle 19 und 20), entsprechend 90 - 118 kg/m³ bei lufttrockenem Rapsstroh (U = 17 %). Bei HD-Bällen lagen die Einzelgewichte im Durchschnitt zwischen 9,6 und 13,6 kg und bei den Rundbällen im Mittel bei 231 und 323 kg je nach Ballendurchmesser (1,55 und 1,70 m, U = 17 %).

Tab. 19: Gewichte und Dichte von HD-Rapsstrohbällen (Angaben in Trockensubstanz)

Pressenhersteller		Nr. 1	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 2	Nr. 3
Spalte 1	2	3	4	5	6	7
Ballenzahl		20	20	20	20	20
spez. Ballendichte	kg/m ³	77 (3,2)	76 (2,8)	88 (5,3)	91 (4,7)	87 (3,8)
Balleneinzelgewicht	kg	8,0 (0,5)	8,6 (0,4)	10,9 (0,8)	11,3 (0,8)	9,0 (0,6)

() = Standardabweichung s

Tab. 20: Gewichte und Dichte von Rapsstroh-Rundballen (Angaben in Trockensubstanz)

Preßkammerdurchmesser/-größe		variabel	konstant
Spalte 1	2	3	4
Ballenzahl		4	3
spez. Ballendichte	kg/m ³	98	85
Balleneinzelgewicht	kg	268 (15)	192 (11)
Ballendurchmesser	cm	170	155
Ballenvolumen	m ³ /B.	2,72	2,26

() = Standardabweichung s

Diese Werte liegen gleichauf mit den Ergebnissen von Getreidestroh, wie sie in Standardwerken der Literatur [92, 132] angegeben werden. Aus diesem Grund kann von gleichem Lagerraumbedarf ausgegangen werden.

Messungen zur Bestimmung des Arbeitszeitbedarfs waren während der Versuche zur Rapsstrohbergung nicht möglich, da jeweils nur sechs Strohschwade geborgen wurden (1 000 - 3 000 m²) und anfänglich meist mehrere Korrekturen an der Presseneinstellung vorgenommen werden mußten. Nach einer entsprechenden Einübungsphase des Pressenbetreibers traten kaum mehr Arbeitsunterbrechungen auf, so daß für die Rapsstrohernte ähnliche Bedingungen angenommen werden können wie bei der Getreidestrohernte.

Da Daten für Rapsstroherträge und effektive Mähdrescherschnittbreiten ermittelt wurden, ist es möglich, mit dem von AUERNHAMMER für die Getreidestrohbergung erstellten Arbeitszeitkalkulationsprogramm "KALAU" [151] die Bergeleistung für Rapsstroh zu errechnen.

Bei dem Programm KALAU können verschiedene Bergeverfahren und Schlaggrößen gewählt werden. Insbesondere der Einfluß des teilweise sehr geringen Rapsstrohertrags auf die Verfahrensleistung ist von Interesse, deshalb wurden der geringste (29 dt/ha) und der höchste (46 dt/ha) geerntete Strohertrag für die Berechnungen verwendet. Als Verfahren wurde für HD-Ballen das Pressen

auf das Feld (1 AK) und die Be- und Entladung von Hand als arbeitskräfteintensive Variante (3 AK) sowie das Pressen von Rundballen (1 AK) und die Be- und Entladung mit Frontlader (1 AK) als stark mechanisiertes Arbeitsverfahren angenommen (s. Tabellen 21 und 22).

Tab. 21: Arbeitszeitbedarf für die Rapsstrohbergung mit HD-Ballenpresse (1 AK), laden und einlagern von Hand (3 AK)

Strohertrag	dt/ha	29			46		
Schlaggröße	ha	1	2	5	1	2	5
Pressen	Akh/ha	0,96	0,77	0,65	1,19	0,99	0,93
	Akh/t	0,33	0,27	0,22	0,26	0,21	0,20
Laden, Transp. Einlagerung	Akh/ha	1,55	1,46	1,53	2,38	2,37	2,35
	Akh/t	0,53	0,50	0,53	0,52	0,52	0,51
gesamt	Akh/ha	2,51	2,23	2,18	3,57	3,36	3,28
	Akh/t	0,90	0,77	0,68	0,78	0,73	0,71

Entfernung Hof-Feld 1 km; 2 Wagen á 120 Ballen; absätziges Bergeverfahren: pressen auf Feld (1 AK), be- und entladen von Hand (3 AK)

Tab. 22: Arbeitszeitbedarf für die Rapsstrohbergung mit Rundballenpresse (1 AK), laden und ebenerdig einlagern mit Frontlader (1 AK)

Strohertrag	dt/ha	29			46		
Schlaggröße	ha	1	2	5	1	2	5
Pressen	Akh/ha	1,06	0,90	0,86	1,38	1,23	1,19
	Akh/t	0,37	0,31	0,30	0,30	0,27	0,26
Laden, Transp. Einlagerung	Akh/ha	1,24	1,09	1,02	1,87	1,63	1,59
	Akh/t	0,43	0,38	0,35	0,41	0,35	0,35
gesamt	Akh/ha	2,30	1,99	1,88	3,25	2,86	2,78
	Akh/t	0,80	0,69	0,65	0,71	0,62	0,61

Entfernung Hof-Feld 1 km; 2 Wagen á 11 Ballen; Ballengröße 1,20 x 1,50 m

Behält das Programm KALAUS seine Gültigkeit auch bei geringen erntbaren Stroherträgen von nur 29 dt/ha, so verringert sich der Arbeitszeitbedarf für das Pressen gegenüber einem erntbaren Ertrag von 46 dt/ha bei HD-Ballen je nach Schlaggröße um 19 - 29 %, bei Rundballen um 23 - 28 %, obwohl der Ernteertrag um 37 % abnimmt. Da das Arbeitszeitmodell auch Rüst- und Anfahr-

zeiten berücksichtigt, ist deren relativer Anteil bei der schnelleren Arbeitserledigung bei geringerem Ertragsniveau höher als bei hohem Ertrag.

Bezogen auf die geernteten Rapsstrohmengen ergibt sich beim Pressen von 29 dt/ha ein spezifischer Arbeitszeitbedarf von 0,22 - 0,33 A kh/t bei HD-Ballen und von 0,30 - 0,37 A kh/t bei Rundballenformung. Gegenüber einem Hektarertrag von 46 dt sind das 10 - 27 % bzw. 11 - 23 % längere Preßzeiten. Da beim Rundballenpressen für den Binde- und Ballenablagevorgang angehalten werden muß, ergibt sich eine 11 - 36 % geringere Preßleistung gegenüber der HD-Ballenbildung.

Beim Laden, dem Transport und der Einlagerung des Stroh werden mit dem geringen Hektarertrag die Arbeitszeiten in derselben Größenordnung wie der Strohertrag reduziert. Die HD-Ballenbergrung erfordert gegenüber dem Rundballenverfahren einen rund 30 % höheren spezifischen Arbeitszeitbedarf, obwohl die Bergrleistung mit dem Handarbeitsverfahren (HD-Ballen) mit 5 - 6 t/h etwa doppelt so hoch ist.

Untersuchungen zum Einfluß der effektiven Mähdrescherarbeitsbreite bzw. Schwadbreite auf die Bergrleistung zeigten nur geringe Arbeitszeiteinsparungen bei einer Variation der Arbeitsbreite von 2,90 auf 4,90 m; bei den angenommenen Modellen ergaben sich beim Pressen Veränderungen der Arbeitszeit von 5 - 6 %. Dieser geringe Einfluß ist vermutlich mit der möglichen Steigerung der Fahrgeschwindigkeit bei geringem Rapsstrohertrag zu erklären.

Je nach Feuerungssystem kann das Rapsstroh bereits in Ballenform verwendet oder durch die Brikettierung noch weiter aufbereitet werden.

3.4 Brikettierung von Rapsstroh

Da eine Verfeuerung von Rapsstroh in Form von Ballen verschiedene Nachteile aufweist, kann zur Erweiterung des Einsatzbereiches dieses Brennstoffs eine Brikettierung sinnvoll sein. Als Vorteile sind zu nennen:

- Verringerung des Transportvolumens und des Lagerraumbedarfs
- Erhöhung der Energiedichte
- Erhöhung der Manipulierfähigkeit

Diese Eigenschaften von Rapsstrohbriketts könnten das Einsatzspektrum dieses Brennstoffs wesentlich erweitern. In dieser Zustandsform ist Rapsstroh auch für die Betreiber von kleinen Feststofffeuerungen, wie Kachel- und Kaminöfen oder Heizungsherden und -kesseln, akzeptabel.

Für eine Brikettierung von Halmgütern ist zunächst eine Zerkleinerung und Homogenisierung zur gleichmäßigen Beschickung des Verdichtungsaggregates notwendig. Nach der Zerkleinerung wird das Häckselgut meist pneumatisch in einen Zwischen- bzw. Dosierbehälter befördert und von dort in die Preßwerkzeuge gefüllt.

Versuche zur Brikettierung wurden an zwei verschiedenen Anlagen durchgeführt. Bei den Messungen wurden in beiden Fällen jeweils die Halmzerkleinerung und die Kompaktierung des Materials getrennt erfaßt.

3.4.1 Halmgutzerkleinerung

Zum Auflösen von Rundballen wurden spezifische Gerätetechniken entwickelt, die gegenüber den Aggregaten für Hochdruckballen der Strohpresse abweichen. So besteht die Auflösevorrichtung für Rundballen aus einem horizontal drehbaren Trichter, der über einer feststehenden, schnellaufenden, mit Schlagwerkzeugen bestückten Trommel angeordnet ist. Durch die Drehung des Trichters wird der Trommel Halmgut zugeführt und aus dem Ballen gelöst. Danach wird das Stroh über eine Schnecke kontinuierlich

einer Stroh­mühle mit einem 12-mm-Rundlochsieb zugeführt. Nach der Zerkleinerung wird das Häckselgut mittels Gebläse in den Dosierbehälter der Brikettierpresse gefördert. Nach Herstellerangaben weisen der Rundballenauflöser und die Stroh­mühle folgende technische Daten auf:

Rundballenauflöser:

- Trichterdurchmesser	2240 - 2600 mm
- Antrieb Reißtrommel	37 kW _{el}
- Antrieb Trichter	0,75 kW _{el}
- Strohdurchsatz	bis 1500 kg/h

Stroh­mühle:

- Antrieb Mühle und Gebläse	30 kW _{el}
- Antrieb Zuführschnecke (Eigenbau)	1 kW _{el}
- Strohdurchsatz	500 - 1000 kg/h

Um die Leistungsaufnahme der gesamten Strohzerkleinerungseinrichtung zu erfassen, wurde in die Stromzuleitung ein Watt­schreiber, kombiniert mit einem xy-Koordinatenschreiber, eingebaut. Die Ergebnisse der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} bei zwei Rapsstrohbällen stammen jeweils von den Mittelwerten aus dem Häckselbeginn, der Mitte und des zu Ende gehenden Auflösevorgangs ($n = 6$). Vergleichsweise wurden zwei Weizenstrohrundballen zugeführt. Diese konnten wegen Verstopfungsgefahr nur in Teilstücken in den Auflöser gegeben werden, deshalb wurden bestimmte Aufzeichnungsbereiche bei der Auswertung nicht berücksichtigt ($n = 9$). Die Einstellung der Anlage entsprach den Erfahrungswerten des Anlagenbetreibers für Getreidestroh.

Bei Rapsstroh wurde mit bis zu 13 dt/h die doppelte Strohmenge gegenüber Winterweizenstroh aufgelöst und gehäckselt (s. Tabelle 23). Bei ähnlich hohem Leistungsaufnahmeniveau ergab sich beim Stroh der Ölsaart nur ein spezifischer Stromverbrauch von 2,7 kWh/dt im Vergleich zu 5,3 - 5,7 kWh/dt bei Getreidestroh.

Die Anlage war gegen Überlastung geschützt. Bei Überschreitung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Auflöse- und Häckselorgane von 40 kW stoppte der mit dem Strohbällen rotierende Trichter und begann sich erst unter diesem Wert wieder zu drehen. Aufgrund obiger Geräteschaltung lag die mittlere elektrische Leistungsaufnahme P_{el} im Bereich von 33 - 38 kW.

Tab. 23: Durchsatz, Leistungsaufnahme und Stromverbrauch für die Auflösung und Zerkleinerung von Strohrundballen (12-mm-Rundlochsieb)

Meßgröße	Einh.	Leerlauf	Rapsst. (JET)	Weizenstroh
Spalte 1	2	3	4	5
Strohdurchsatz q_m	dt/h	-	12,6 / 13,0	6,5 / 7,1
Leistungsaufnahme P_{el}	kW	15,9	33,3 (1,1)	37,3 (2,8)
spez. Stromverbrauch	kWh/dt	-	2,6 / 2,7	5,3 / 5,7

() = Standardabweichung s

Obige Zahlen geben keine Auskunft über die Schwankungen, die bei der Stromaufnahme auftreten. Ein Aufzeichnungsausschnitt zu Beginn der Auflösung von Rapsstroh- und Getreidestrohrundballen in Abbildung 24 zeigt Unterschiede in der Energieaufnahme auf.

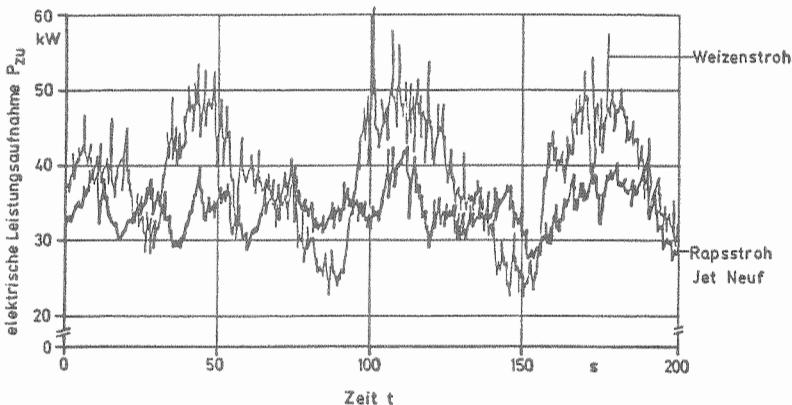


Abb. 24: Leistungsaufnahme P_{el} beim Auflöse- und Häckselvorgang von Raps- und Weizenstroh

Während die Leistungsaufnahme für die Auflösung und das Häckseln von Rapsstroh nur im Bereich von 28 - 42 kW schwankt, sind zu Beginn der Auflösung von Getreidestrohrundballen Sprünge in der Leistungsaufnahme von 23 - 61 kW zu registrieren. Die starken Schwankungen sind dadurch bedingt, daß die Auflösewalze jeweils ein großes ineinander verflochtenes Bündel Stroh aus dem

Ballen reißt, wodurch die Stromaufnahme stark ansteigt. Erst wenn diese Strohmenge die Auflösewalze passiert hat, wird wieder Stroh zugeführt. Bei Rapsstroh war die Strohzuführung (Rotation des Trichters) nahezu kontinuierlich. Die Sprünge bei der Leistungsaufnahme ergaben sich meist aus einer unregelmäßigen Halmgutzufuhr, da der Trichter nicht gleichmäßig mit Stroh beaufschlagt war. Bei Rapsstroh erreichte die kurzzeitige maximale Leistungsaufnahme einen Wert bis zu 61 kW und bei Winterweizenstroh bis zu 78 kW.

Bei einer geringeren Belastung des Stromnetzes bei der Rapsstrohauflösung und Zerkleinerung ergab sich sogar noch ein etwas höherer Zerkleinerungsgrad des Materials nach Passieren der Strohmühle (s. Abbildung 25). Für die Darstellung der Teilchengrößen erwies sich das halblogarithmische Netz am geeignetsten. Die Kennlinien ergeben sich aus dem Mittelwert von drei Siebungen.

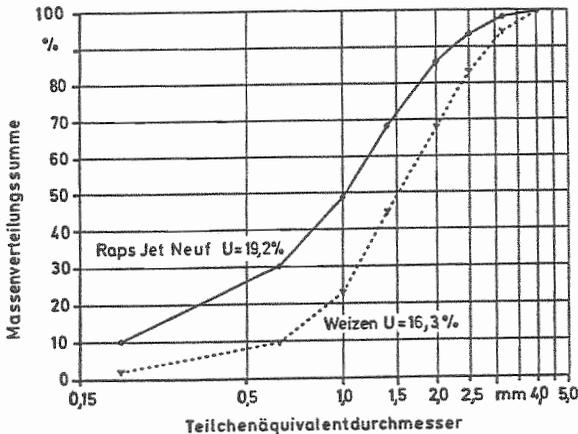


Abb. 25: Siebanalysen von zerkleinertem Stroh (12-mm-Rundlochsieb)

Die Siebgrößen reichten von 0,2 - 3,5 mm. Während bei Rapsstroh bereits 50 % der Massenanteile eine Korngröße von 1,0 mm und weniger aufweisen, liegt der Anteil bei Getreidestroh noch

unter 25 %. Bei 2,0 mm beträgt der Durchgang bei Raps bereits 86 %, bei Weizen erst 68 %. Bei den nächsten beiden Siebgrößen nähern sich die Werte sehr stark an. Der höhere Zerkleinerungsgrad bei Rapsstroh läßt sich bei sonst gleichen Versuchsbedingungen in der unterschiedlichen Struktur des Materials vermuten.

Neben der Zerkleinerung von Rundballen wurde ebenso die Aufbereitung von Hochdruckballen untersucht. Die Strohühle stammte vom selben Hersteller wie das mit dem Rundballenauflöser kombinierte Aggregat, war jedoch mit einem Zuführband für die HD-Ballen ausgestattet. Der Antrieb erfolgte über die Zapfwelle eines Schleppers.

Mit einer an der Schlepperzapfwelle angebrachten Meßnabe konnten das Drehmoment M_{ZW} und die Drehfrequenz U_{ZW} bestimmt werden. Aus den Mittelwerten dieser beiden Größen wird die durchschnittliche Drehleistung mittels nachstehender Formel berechnet (Gleichung IX):

$$P_{ZW} = M_{ZW} \cdot U_{ZW} / 9560 \quad (IX)$$

Hierin sind:

P_{ZW} = Drehleistung in kW

M_{ZW} = Drehmoment an der Zapfwelle gemessen in Nm

U_{ZW} = Drehfrequenz der Zapfwelle in 1/min

Aus der mittleren Drehleistung, der Zeit und der durchgesetzten Strohmenge errechnet sich der spezifische Arbeitsbedarf. Die in Tabelle 24 angegebenen Mittelwerte für die Drehleistung P_{ZW} errechnen sich aus je zehn gehäckselten Strohballen ($n = 10$). Die Durchsatzleistung ergibt sich aus der Zerkleinerung von je 15 - 20 Ballen.

Die Durchsatzleistungen lagen bei Rapsstroh mit 5,60 - 5,70 dt/h ca. 10 % niedriger als bei der Getreidestrohart. Da die Einzugsgeschwindigkeit des Zuführbandes konstant war, sind die Unterschiede durch die ca. 10 % geringere Ballendichte bei Rapsstroh bedingt. Die notwendige Drehleistung zum Zerkleinern von Rapsstroh war mit 27 - 31 kW rund 25 % niedriger als bei der Getreidevariante. Der spezifische Arbeitsbedarf lag bei den drei Rapsstrohsorten zwischen 4,7 - 5,3 kWh/dt und bei Ge-

treidestroh bei 6,2 kWh/dt, was einem geringeren Verbrauch beim Stroh der Ölsaart von 14 - 24 % entspricht.

Bei der Drehleistung ergaben sich sogar innerhalb der Rapssorten signifikante Unterschiede, obwohl die Schwankungen um die Mittelwerte der Drehleistung P_{Zw} innerhalb der einzelnen Versuchsvarianten sehr gering waren. Die geringere Drehleistungsaufnahme von etwa 10 % bei der Rapssorte JET NEUF gegenüber den beiden anderen Sorten sind möglicherweise auf einen geringeren Schoten- und Feinstrohanteil in den Ballen zurückzuführen.

Tab. 24: Durchsatz, Drehleistungsaufnahme und Arbeitsbedarf für die Strohzerkleinerung von Hochdruckballen (6-mm-Rundlochsieb)

Meßgröße	Einheit	Leerlauf	S T R O H A R T			Gerste
			Raps (BELL.)	Raps (JET N.)	Raps (LINDO.)	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7
Strohdurchsatz q_m	dt/h	-	5,60	5,68	5,72	6,18
Drehleistung P_{Zw}	kW	22,6	28,9 (0,62)	26,7 (0,43)	30,3 (1,32)	38,4 (1,01)
spez. Arbeitsbed. W (an der Zapfwelle)	kWh/dt	-	5,2	4,7	5,3	6,2

() = Standardabweichung s

Der erreichte Zerkleinerungsgrad des gemahlene Gutes bei Raps- und Getreidestroh ist etwa gleich, wie aus den Siebkennlinien in Abbildung 26 zu entnehmen ist. Die unterschiedliche Drehleistungsaufnahme bei den Stroharten ist somit nicht auf unterschiedliche Häcksellängen zurückzuführen. Die Feuchtegehalte lagen zwischen 12,6 und 14,4 %.

Der Korngrößenbereich des gemahlene Strohs erstreckte sich bei einem Anfangsmassengehalt von 0,7 % von 0,06 mm bis 5 mm. Rund 50 % der Massenanteile lagen unter einer Korngröße von 1 mm und etwa 90 % unter 2 mm. Die Siebkennlinie des Rapsstrohs der Sorte LINDORA weist im Bereich unter 1 mm einen steileren Anstieg auf und verläuft danach fast deckungsgleich mit der des zerkleinerten Wintergerstenstrohs, während bei der Rapssorte JET NEUF durchwegs größere Teilchenäquivalentdurchmesser zu

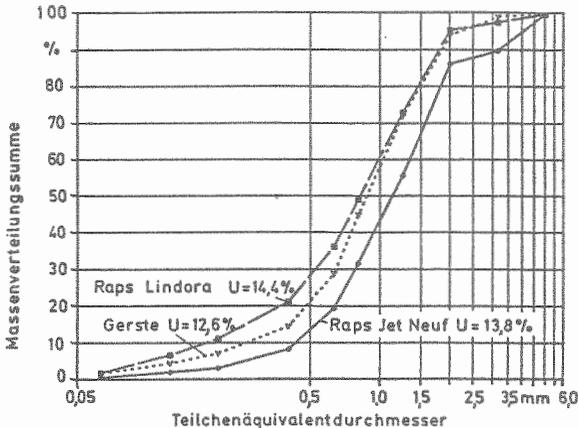


Abb. 26: Siebanalysen von zerkleinertem Stroh (6-mm-Rundlochsieb)

verzeichnen sind. Dieser Umstand mag der Grund dafür sein, daß zum Mahlen des Strohs dieser Sorte der geringste Leistungsbedarf erforderlich war. Die große Differenz beim Leistungsbedarf zwischen Raps- und Gerstenstroh kann nicht durch unterschiedliche Zerkleinerungsgrade hervorgerufen worden sein. Sie muß in der unterschiedlichen Struktur der Materialien begründet liegen.

Eine weitere interessante Beobachtung beim Häckseln der verschiedenen Stroharten kann durch die graphische Aufzeichnung des Drehmomentverlaufes über der Zeit aufgezeigt werden (s. Abbildung 27).

Im Gegensatz zur Zerkleinerung von Gerstenstroh sind beim Rapsstroh die Schwankungen im Drehmomentverlauf wesentlich geringer. Die stärksten Ausschläge beim Rapsstroh sind zu beobachten, wenn der Rest eines Ballens in die Zerreißwalze gerät. Danach sinkt das Drehmoment kurz ab, bis der neue Ballen die Zerkleinerungsaggregate erreicht und gleichmäßig abgefräst wird. Bei den Getreidestrohballen sind beträchtliche Schwankungen

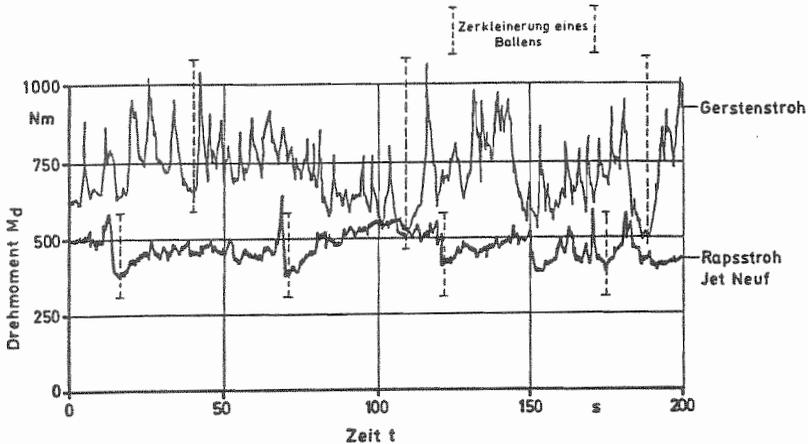


Abb. 27: Drehmomentverlauf beim Häckseln von HD-Ballen von Raps- und Wintergerstenstroh

während des gesamten Auflösevorganges eines Ballens zu beobachten, wobei im Gegensatz zu Rapsstroh bei der Erfassung eines neuen Ballens Spitzenbelastungen zu verzeichnen sind. Die aus dem Meßschieb abgelesenen Höchstwerte der Drehmomente lagen bei den Rapsorten bei 820, 640 und 797 Nm und erreichten beim Wintergerstenstroh einen Spitzenwert von 1060 Nm.

Erklärbar sind die Schwankungen zum einen durch die Struktur der Ballen, aber auch durch die Struktur des Strohs. Bei der Erzeugung der Hochdruckballen wird jeweils der Preßkanal mit Halmgut gefüllt und durch einen Preßkolben an die bereits geformten Ballen gedrückt. Ein gebundener Ballen besteht deshalb aus 5 - 10 Preßpaketen, die bei der Auflösung der Ballen deutlich zu erkennen sind. Da Rapsstroh sehr sperrig und brüchig ist, brechen geknickte Halme ab, die einzelnen Ballensegmente lassen sich sehr leicht auflösen. Bei Getreidestroh brechen die Halme bei der Verdichtung nicht, sondern falten sich ineinander, was dazu führt, daß die Ballensegmente gut zusammenhalten und schwerer aufzulösen sind.

Aus beiden Versuchen zur Strohzerkleinerung wird ersichtlich, das der spezifische Arbeitsbedarf je nach Zerkleinerungsgrad und Anlagentyp bei Rapsstroh 15 - 50 % geringer ist als bei Getreidestroh und darüberhinaus der Leistungsbedarf geringere Schwankungen aufweist.

3.4.2 Brikettierung

In Großbritannien führte O'DOHERTY et al. 1984 [72] Grundlagenversuche zur Hochdruckverdichtung von verschiedenen Stroharten mit einer Topfpresse durch. Dabei wurden Einflüsse wie Gutsfeuchte, Brikettdurchmesser, Preßdruck und Matrizenfüllgrad an unzerkleinertem Weizen-, Hafer- und Rapsstroh untersucht. Der Autor berichtet von hoher Dichte, guter Abriebfestigkeit bei Rapsstroh, jedoch von einem rund 10 % höheren spezifischen Energieverbrauch bei der Formung der Preßlinge als bei Weizenstroh. Die Ergebnisse von O'DOHERTY haben ihre Gültigkeit nur bis zu einer Brikettdichte von 700 kg/m^3 bei einem maximal möglichen Preßdruck von 48 MPa der absätzig beschickbaren Versuchspresse. Eine Strohzerkleinerung bringt nach O'DOHERTY keine Vorteile.

Entgegen dieser Erfahrung haben ORTH und PETERS [76] bereits 1979 von Versuchen mit einer kontinuierlich arbeitenden Presse berichtet. Bei Weizenstroh wurde die beste verbleibende Dichte (ca. 950 kg/m^3) bei 100 MPa Preßdruck und theoretischen Häcksellängen von nur 6 mm erzielt. Topfpresenversuche von SMITH et al. 1977 [107] ergaben ähnliche Abhängigkeiten bei Getreidestroh wie sie ORTH 1979 ermittelte.

Die verfügbaren Ergebnisse über die Rapsstrohbrikettierung von O'DOHERTY wurden mit einem nicht als praxisgerecht anzusehenden Verdichtungssystem erzielt. Aus diesem Grunde war es wichtig, Versuche zur Brikettierung von Rapsstroh an praxistauglichen Brikettieranlagen durchzuführen.

Messungen wurden an zwei Kolbenstrangpressen durchgeführt. Die Einstellung der Brikettierpressen entsprach den bei Getreidestroh durch die Anlagenbetreiber erprobten Erfahrungswerten. Da

der Antrieb der einen Anlage mit Elektromotoren und der der anderen durch die Schlepperzapfwelle erfolgte, werden die erzielten Ergebnisse getrennt beschrieben.

Nach Herstellerangaben weist die mit Elektromotoren angetriebene Brikettieranlage folgende technische Daten auf:

- Durchmesser der Preßmatrize 50 mm
- Kolbenhublänge 100 mm
- Kolbenhubfrequenz 200 min⁻¹
- Preßleistung 100 - 450 kg/h
- Anschlußwerte der Elektromotoren 18,7 kW_{e1}
- Pressenbeschickung: regelbarer Schneckenzuteiler

Bei der mit elektrischem Strom betriebenen Anlage ergab sich eine Durchsatzmenge von ca. 4,60 dt Rapsstroh/h (s. Tabelle 25). Es wird der vom Hersteller genannte Maximalwert erreicht, der mit Getreidestroh erzielte Wert von 2,80 dt/h um rund 64 % übertroffen. Die elektrische Leistungsaufnahme erhöhte sich dabei von durchschnittlich 13,9 kW bei Weizenstroh auf 16,1 kW bei Rapsstroh der Sorte JET NEUF; das entspricht einer Zunahme von ca. 16 %. Bei gleicher Anlageneinstellung errechnet sich ein spezifischer Stromverbrauch von 3,5 kWh/dt bei Rapsstroh. Dieses Ergebnis liegt etwa 30 % unter dem Wert von Weizenstroh.

Tab. 25: Durchsatz, Leistungsaufnahme und Stromverbrauch für die Brikettierung

Meßgröße	Einheit	Leerlauf	Rapsst. (JET)	Weizenstroh
Spalte 1	2	3	4	5
Strohdurchsatz q_m	dt/h	-	4,58 (3,7)	2,79 (2,2)
Leistungsaufnahme P_{e1}	kW	4,0	16,1 (0,59)	13,9 (0,66)
spez. Stromverbrauch W_{e1}	kWh/dt	-	3,5	5,0

() = Standardabweichung s

Mit einer baugleichen Brikettieranlage desselben Herstellers machte BEWER 1983 [11] Versuche mit Weizenstroh. Dabei ermittelte er einen spezifischen Stromverbrauch von 5 - 6 kWh/dt bei einem Strohdurchsatz von 2,5 - 3,5 dt/h. Die spezifische Brikettdichte betrug dabei 1050 - 1150 kg/m³. Bei den eigenen Brikettierversuchen mit Weizenstroh wurde mit 5,0 kWh/dt Briketts derselbe spezifische Stromverbrauch wie bei BEWER gemessen. So-

mit ist davon auszugehen, daß der bei Rapsstroh erzielte höhere Strohdurchsatz (+64 %) und der geringere spezifische Stromverbrauch (-30 %) nur auf die Strohart und nicht auf eine entsprechende Anlagenveränderung zurückzuführen ist.

Die günstigen Ergebnisse bei Durchsatz und Energieverbrauch bedingen eine Verringerung der Preßlingsqualität beim Stroh der Ölsaart (s. Tabelle 26). ACHILLES 1975 [1] und FEUSTEL 1979 [29] wiesen eine Abnahme des Verdichtungsgrades mit zunehmendem Feuchtegehalt nach, so daß auch der etwas höhere Feuchtegehalt bei Raps die Verringerung der Brikettdichte um ca. 6 %-Punkte auf 1020 kg/m³ mitbewirkt haben könnte.

Der Brikettabrieb wurde nach dem ASAE-Standard 269.1 1971 [136] in einem Taumelkasten bei drei Minuten Laufzeit und 13 min⁻¹ ermittelt (n = 3). Die Dichtebestimmung erfolgte durch die in obigem Standard ebenfalls beschriebene Tauchmethode (n = 10). Zur Schüttdichteermittlung wurde ein zylindrischer Behälter (0,075 m³) befüllt und ohne zu rütteln glattgestrichen (n = 10). Die Bestimmungen wurden drei bis vier Tage nach den Versuchen durchgeführt, damit die Briketts sich vollständig abkühlen konnten.

Tab. 26: Kennwerte der verpreßten Stroharten

Meßgröße	Einheit	Rapsst. (JET)	Weizenstroh
Spalte 1	2	3	4
Stroh-Feuchtegehalt U _G	%	19,2	16,3
Brikett-Feuchtegehalt U _B	%	17,3	13,3
spez. Brikettdichte	kg/m ³	1020 (11)	1090 (7)
Schüttdichte d. Briketts	kg/m ³	512 (8)	519 (11)
Abrieb	%	3,1 (0,77)	2,4 (0,47)

() = Standardabweichung s

Könnten die von BEWER 1983 [11] ermittelten Zusammenhänge zwischen der Durchsatzmenge und der Brikettdichte für Weizenstroh auch auf Rapsstroh übertragen werden, so würde sich bei einer vergleichbaren spezifischen Dichte der Durchsatz um ca. 90 kg/h

verringern. Der Autor gibt die anzustrebende spezifische Dichte für Brennstoff-Briketts mit 1100 kg/m^3 an. Der stärkere Trocknungseffekt bei den Getreidestrohbriketts dürfte durch die längere Verweildauer in der heißen Preßmatrize bedingt sein.

Bei der zapfwellenbetriebenen Brikettieranlage erfolgte die Ermittlung der Drehleistung über eine an der Schlepperzapfwelle angebrachten Meßnabe (s. Gleichung IX). Die Anlage war mit zwei Kolbenstrangpressen ausgestattet und wies nach Herstellerangaben folgende technische Daten auf:

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| - Durchmesser der Preßmatrize | 50 mm |
| - Kolbenhublänge | 100 mm |
| - max. spez. Preßdruck | 7,6 MPa/cm ² |
| - Preßleistung | 400 - 600 kg/h |
| - Pressenbeschickung: | regelbarer Schneckenzuteiler |

Für die Versuche wurde Stroh der Rapsorten JET NEUF und LINDORA und Wintergerstenstroh verwendet.

Bei dem etwas stärker zerkleinerten Rapsstroh der Sorte JET NEUF (s. Abbildung 27) ergab sich die höchste Preßleistung mit 6,27 dt/h, gefolgt von der Sorte LINDORA mit 5,91 dt/h (s. Tabelle 27). Wintergerstenstroh erbrachte nur eine Durchsatzmenge von 3,94 dt/h. Während mit Rapsstroh die vom Hersteller angegebene maximale Preßleistung erreicht wurde, konnte mit Wintergerstenstroh nur knapp der Mindestwert der genannten Spanne für die Durchsatzleistung erzielt werden. Durch die höheren Durchsätze steigt zwar die Drehleistungsaufnahme bei Rapsstroh um 14 - 24 % an, der spezifische Arbeitsbedarf sinkt jedoch gegenüber der Verdichtung von Gerstenstroh von 8,0 kWh/dt auf 5,5 bis 6,1 kWh/dt um 23 - 31 %.

Ebenso wie bei der mit Elektromotoren angetriebenen Brikettieranlage steigert sich der Durchsatz bei Rapsstroh der Sorte JET NEUF um rund 60 % gegenüber Getreidestroh bei einer Verringerung des spezifischen Arbeitsbedarfs um 31 %. Bei der Rapsorte LINDORA beträgt die Durchsatzsteigerung 50 % und die Reduzierung des spezifischen Arbeitsbedarfs 23 %.

Tab. 27: Durchsatz, Drehleistungsaufnahme und Arbeitsbedarf für die Brikettierung (2 Kolbenstrangpressen)

Meßgröße	Einheit	Leer- lauf	S T R O H A R T		
			Raps (JET NEUF)	Raps (LINDORA)	Gerste
Spalte 1	2	3	4	5	6
Strohdurchsatz q_m	dt/h	-	6,27 (8,3)	5,91 (6,3)	3,94 (5,1)
Drehleistung P_{ZW}	kW	15,8	39,3 (1,32)	36,1 (1,07)	31,6 (1,22)
spez. Arbeitsbed. W (an der Zapfwelle)	kWh/dt	-	5,5	6,1	8,0

() = Standardabweichung s

Tendenziell ergaben sich ähnliche Zusammenhänge bezüglich Brikettdichte und -abrieb wie bei der ersten Anlage (s. Tabelle 28). Das höhere Verdichtungs-niveau bei Gerstenstroh bewirkte auch einen geringeren Abrieb (0,7 %) und mit 1260 kg/m^3 eine um 8 - 9 % höhere spezifische Brikettdichte als bei Rapsstroh.

Der Hauptgrund für die unterschiedlichen Durchsätze bei Raps- und Wintergerstenstroh ist im unterschiedlichen Schüttgewicht des Häckselgutes zu sehen, da an der Brikettierpresse keine Änderungen vorgenommen wurden. Bei einer Schüttdichtebestimmung mit einem 50 cm hohen und einen Liter fassenden Hohlzylinder ergaben sich für Gerstenhäcksel im Durchschnitt 83 g, bei Rapsstroh der Sorte LINDORA 189 g und bei JET NEUF 219 g (n = 5).

Tab. 28: Kennwerte der verpreßten Stroharten

Meßgröße	Einheit	S T R O H A R T		
		Raps (JET NEUF)	Raps (LINDORA)	Gerste
Spalte 1	2	3	4	5
Stroh-Feuchtegehalt U_S	%	13,8	14,4	12,6
Brikett-Feuchtegehalt U_B	%	12,3	12,0	8,3
spez. Brikettdichte	kg/m^3	1140 (18)	1160 (14)	1260 (11)
Schüttdichte d. Briketts	kg/m^3	524 (12)	527 (9)	535 (7)
Abrieb	%	1,7 (0,40)	1,6 (0,46)	0,7 (0,08)

() = Standardabweichung s

Diese Gewichtsunterschiede ergeben sich durch die Zerkleinerungsstruktur der Stroharten. Während Getreidestrohhäcksel zerfasert und gekrümmte Partikel ergibt, besteht zerkleinertes Rapsstroh fast ausschließlich aus geraden Bruchstücken die eine höhere Lagerdichte ermöglichen. Bei volumendosierter Häckselgutführung über Förderschnecken werden bei unveränderter Drehzahl bei Rapsstroh höhere Gewichtsmengen in die Preßwerkzeuge gefördert als bei Gerstenstroh und somit bei konstanter Kolbenhubfrequenz auch höhere Durchsätze erreicht. Um gleiche Brikettdichten zu bekommen, müßten entweder die den Preßkolben zugeführten Rapsstrohmengen verringert oder die Hubfrequenz der Kolben reduziert werden. Weniger Durchsatz bewirkt eine längere Verweildauer der Preßlinge in der Matrize und damit eine höhere Preßlingsdichte.

Bei einer Brikettieranlage sind das Strohzerkleinerungssystem und die Brikettierpresse bezüglich der Durchsatzleistungen aufeinander abgestimmt und meist fest installiert. Aus diesem Grunde wird in der Literatur für elektrisch angetriebene Anlagen meist der spezifische Stromverbrauch für die Strohzerkleinerung und Brikettierung gemeinsam angegeben. Für die Rapsstrohzerkleinerung mit einem Rundballenauflöser und die Brikettierung wurde ein spezifischer Stromverbrauch 6,1 - 6,2 kWh/dt Briketts ermittelt; bei Weizenstroh ergaben sich Werte von 10,3 - 10,7 kWh/dt. Bei dieser Anlagenzusammenstellung ergibt sich für Rapsstroh ein ca. 40 % geringerer spezifischer Stromverbrauch. BEWER 1983 [11] und WALTER 1984 [129] ermittelten mit der baugleichen Anlage bei Weizenstroh einen spezifischen Stromverbrauch von 7,2 - 8,8 kWh/dt; zur Strohzerkleinerung wurde dabei eine Strohmühle für HD-Ballen eingesetzt.

Bei der durch die Schlepperzapfwelle angetriebenen Anlage ergab sich bei Rapsstroh ein spezifischer Arbeitsbedarf von 10,2 - 11,4 kWh/dt Briketts. Der für Gerstenstroh ermittelte Gesamtwert betrug 14,2 kWh/dt. Vergleichswerte von zapfwellengetriebenen Brikettieranlagen waren in der Literatur nicht zu finden.

Bei beiden Versuchseinsätzen ergab sich jedoch bei Rapsstroh eine gleichmäßigere Belastung der Zerkleinerungsaggregate und ein geringerer Energieverbrauch gegenüber der Aufbereitung von Getreidestroh.

3.5 Feuerungstechnische Kenngrößen von Rapsstroh

3.5.1 Heizwert von Rapsstroh

Die Quantifizierung des Energiegehaltes eines Brennstoffes ist durch die Kenngröße Heizwert H_U möglich. Dessen Bestimmung wurde vom Deutschen Normenausschuß in der DIN 51 900 festgelegt. Dabei ist der mit einem Bombenkalorimeter ermittelte und umgerechnete "untere Heizwert H_U " als diejenige Wärmemenge festgelegt, "die 1 kg Brennstoff bei vollständiger Verbrennung entwickelt. Es wird unterstellt, daß die Verbrennungsprodukte auf Ausgangstemperatur abgekühlt werden, die kondensierbaren Bestandteile aber in dampfförmigem Zustand bleiben". Dieser Wert ist nicht direkt meßbar, sondern ergibt sich rechnerisch aus dem mit dem Bombenkalorimeter bestimmten Brennwert H_O (= oberer Heizwert H_O) und dem Wassergehalt der Verbrennungsgase. Dabei ist auch die Kondensationswärme des entstehenden Wassers mit berücksichtigt.

Zur Ermittlung des Heizwertes von Rapsstroh wurden von insgesamt zehn Rapsstrohproben je drei Heizwerte bestimmt. Dabei wurde der Einfluß der Rapsstrohsorte, der Standort- und der Jahreseinfluß untersucht.

Zur Untersuchung des Sorteneinflusses wurden fünf Winterrapsorten aus den Parzellenversuchen 1985 verwendet. Als mittlerer Heizwert $H_{U(wf)}$ der wasserfreien Substanz aus den fünf Sorten errechnete sich 17 441 kJ/kg (s. Tabelle 29). Es ergaben sich Sortenunterschiede im Heizwert H_U . Die Sorten DORAL, KORINA und LIBRADOR wiesen Werte über 18 000 kJ/kg wasserfreier Substanz auf, während die Sorte BELINDA mit 16 700 kJ/kg ca. 8 % unter diesem Wert lag. RUBIN hat den geringsten Energiegehalt mit nur 15 790 kJ/kg.

Ein t-Test ergab signifikante Unterschiede bei den Mittelwerten der Sorte RUBIN und BELINDA ($P = 95 \%$); zwischen RUBIN und den anderen Sorten ist der Unterschied hochsignifikant ($P = 99,9 \%$). Die Mittelwerte der stark verbreiteten Sorte BELINDA zu den Sorten mit höherem Energiegehalt unterscheiden sich mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99 %.

Tab. 29: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz von Winterrapssorten der Ernte 1985 auf dem Standort Freising-Lange Point

Sorte	Heizwert H_U (wf) kJ/kg	s kJ/kg	relativ
Spalte 1	2	3	4
BELINDA	16 713	417	95,8
DORAL	18 161	332	104,1
KORINA	18 303	693	104,9
LIBRADOR	18 240	139	104,6
RUBIN	15 790	647	90,5
Durchschnitt	17 441		100

s = Standardabweichung

HOFSTETTER 1976 [47] stellte auch bei verschiedenen Sorten von Getreidestroharten Unterschiede fest, wobei die maximale Schwankung innerhalb einer Strohart bei 4,5 % lag. Beim Stroh der Winterrapssorten sind die Unterschiede mit bis zu 9 bzw. 14 % stärker ausgeprägt.

Zur Klärung des Standorteinflusses auf den Energiegehalt wurde Rapsstroh der Sorte BELINDA von drei Aufwuchsorten innerhalb Bayerns untersucht (s. Tabelle 30). Aus den drei Standorten ergibt sich für die Sorte BELINDA ein mittlerer Heizwert H_U (wf) von 17 231 kJ/kg. Ein Standorteinfluß ergibt sich nicht.

Trotz des Unterschiedes der mittleren Heizwerte von bis zu 5 % lassen sich die Unterschiede auch zwischen dem Stroh aus Freising und dem aus Orthofen statistisch nicht absichern.

Tab. 30: Durchschnittliche Heizwerte der wasserfreien Substanz verschiedener Standorte (Sorte BELINDA, Erntejahr 1985)

Standort	Heizwert $H_{u(wf)}$ kJ/kg	s kJ/kg	relativ
Spalte 1	2	3	4
Freising	16 713	417	97,0
Orthofen	17 585	451	102,1
Wiedergeltingen	17 395	559	101,0
Durchschnitt	17 231		100

s = Standardabweichung

Werden die Ergebnisse noch um die sich stark unterscheidenden Aschegehalte bereinigt, so ergibt sich ein nahezu gleicher Wert für alle Standorte bei der Sorte BELINDA, wie aus Tabelle 31 hervorgeht.

Tab. 31: Durchschnittliche Heizwerte der wasser- und asche-freien Substanz $H_{u(waf)}$ verschiedener Standorte (Sorte BELINDA, Erntejahr 1985)

Standort	Aschegehalt %	Heizwert $H_{u(waf)}$ kJ/kg	relativ
Spalte 1	2	3	4
Freising	8,7	18 305	99,4
Orthofen	5,0	18 510	100,6
Wiedergeltingen	5,5	18 407	100,0
Durchschnitt		18 407	100

Die durch die Bereinigung der Heizwerte um den Aschegehalt erzielte Angleichung der Ergebnisse ist bei den Werten in Tabelle 32 nicht zu erreichen, da die Aschegehalte des Stroh auf diesem Standort fast alle in der Größenordnung von 8 - 9 % liegen.

Ob die jährlichen Ertragsschwankungen bei Korn und Stroh von Raps auch den Heizwert beeinflussen, wurde an drei Sorten aus

den Parzellenversuchen in Weihenstephan untersucht (s. Tabelle 32). Bei Berücksichtigung der Wechselwirkung von Sorte und Jahr lassen sich statistisch gesicherte Jahresunterschiede nachweisen; Sortenunterschiede bestanden nur zwischen dem höchsten Heizwert von KORINA und dem niedrigsten Heizwert von RUBIN bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 %.

Die stärkste Abweichung zwischen zwei Erntejahren war bei der Sorte KORINA festzustellen. Die beiden Jahresmittelwerte unterscheiden sich um nahezu 15 %.

Insgesamt wurden an zehn Rapsstrohproben Heizwertuntersuchungen durchgeführt. Unter Einbeziehung sämtlicher Ergebnisse ($n = 30$) errechnete sich ein Mittelwert für den Heizwert $H_{U(wf)}$ von 17 035 kJ/kg. Für weitere Kalkulationen wird ein gerundeter Wert von 17 000 kJ/kg verwendet.

Tab. 32: Heizwerte von Winterrapsorten im Jahresvergleich zwischen 1985 und 1986

Sorte	Heizwert $H_{U(wf)}$ 1985 in kJ/kg	Heizwert $H_{U(wf)}$ 1986 in kJ/kg	Abweichung v. '85 (%)	Prüfung auf sig. Unterschiede
Spalte 1	2	3	5	6
BELINDA	16 713	16126	- 3,5	n.s.
KORINA	18 303	15 669	-14,4	*
RUBIN	15 790	16 370	+ 3,7	n.s.
∅	16 935	16 055	- 5,2	*

Eine Einordnung des Energiegehaltes von Rapsstroh ermöglicht der Vergleich mit verschiedenen anderen Festbrennstoffen (Tabelle 33). Der Heizwert $H_{U(wf)}$ der wasserfreien Substanz von Rapsstroh liegt mit 17 000 kJ/kg knapp über dem Wert von Getreidestroh mit 16 900 kJ/kg; Holz weist mit 18 600 kJ/kg einen ca. 10 % höheren Energiegehalt auf. Damit kann Rapsstroh in Bezug auf den Heizwert ähnlich wie diese beiden im ländlichen Bereich anfallenden Brennstoffe bewertet werden. Torf und Braunkohle liegen im Energiegehalt deutlich über den Biomassen. Koks, Holz- und Steinkohle weisen nahezu den doppelten Heizwert auf.

Tab. 33: Durchschnittlicher Heizwert von Rapsstroh und anderen Festbrennstoffen (nach HOFSTETTER [47] und GUMZ [40])

Brennstoff	Heizwert H_u (wf) kJ/kg	Heizwert H_u (waf) kJ/kg
Rapsstroh	17 200	18 400
Getreidestroh	16 900	17 900
Holz	18 600	18 600
Holzkohle	31 700	31 900
Torf	21 800	22 200
Braunkohle	22 500	24 600
Steinkohle	32 500	34 900

Der Unterschied in den Heizwerten der verschiedenen Festbrennstoffe ist hauptsächlich durch die sich unterscheidende Elementarzusammensetzung bedingt, da nur die Oxidation von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel Energie freisetzt. Daher ist auch die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Brennstoffe von Interesse.

3.5.2 Chemische Zusammensetzung

Zur Berechnung verschiedener feuerungstechnischer Kenngrößen ist die chemische Zusammensetzung eines Brennstoffes wichtig.

Zur Bestimmung von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N) und Schwefel (S) wurden von zehn Strohproben Analysen durchgeführt. Die in Tabelle 34 angeführten Ergebnisse sind die Mittelwerte von Doppelbestimmungen am Institut für Organische Chemie, Garching 1985 [90] (C, H) und an der Bayerischen Landesanstalt für Pflanzenbau und Bodenkultur, Freising 1986 [87] (N, S). Der Sauerstoffgehalt errechnete sich durch Differenzbildung.

Die für die Verbrennung bedeutsamen Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff sind im Rapsstroh in Anteilen von 48,3 % (s = 0,6 %) und 6,3 % (s = 0,4 %) enthalten.

Die chemische Zusammensetzung von Rapsstroh ist der von Getreidestroh und Holz sehr ähnlich. Das ist auch der Grund für die geringen Heizwertunterschiede dieser Brennstoffe. Der um 2,1 bis 3,6 %-Punkte geringere Kohlenstoffanteil bei Rapsstroh könnte durch Meßfehler (bei C und H bis 0,3 %-Punkte [90]) oder eine andere Analysenmethode begründet sein.

Mit zunehmendem Alter der Brennstoffe steigt der C-Gehalt von ca. 50 % bei Stroh auf rund 90 % bei Steinkohle an und im umgekehrten Verhältnis nimmt der Sauerstoffgehalt ab. Bei Holz ist

Tab. 34: Durchschnittliche Elementgehalte von Rapsstroh und anderen Festbrennstoffen (nach HOFSTETTER [47] und GUMZ [40])

Brennstoff	Asche %	Gew.-% der wasser- und aschefreien Substanz				
		C	O	H	N	S
Spalte 1	2	3	4	5	6	7
W.-rapsstroh	6,5	48,3	45,1	6,3	0,7	0,18
Getreidestroh	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	1-10	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

der geringe Aschegehalt von nur 0,4 % und das völlige Fehlen von Schwefel erwähnenswert. Im Vergleich zu Kohle mit bis zu 3,9 % weisen die Stroharten mit etwa 0,1 - 0,2 % wenig Schwefel auf.

Neben der chemischen Zusammensetzung ist der Anteil an flüchtigen Bestandteilen und die Abbrandgeschwindigkeit für die Feuerungsdimensionierung von großer Wichtigkeit.

3.5.3 Flüchtige Bestandteile und Abbrandgeschwindigkeit

Festbrennstoffe setzen sich aus brennbarer Substanz und nicht-brennbaren Ballaststoffen zusammen. Die brennbare Substanz besteht wiederum aus "Flüchtigen Bestandteilen" und "Tiegelkoks", auch als "Fixer Kohlenstoff" bezeichnet [47]. Wasser und Asche zählen zu den nicht brennbaren Substanzen. Der Anteil der schnell entweichenden Gase aus einem Brennstoff ist bei der Dimensionierung der Brennräume und der Rauchgaswege zu berücksichtigen, um eine vollständige Verbrennung zu erreichen.

In der DIN 51 720 [147] hat der Deutsche Normenausschuß für die Prüfung fester Brennstoffe festgelegt, daß eine analysenfeuchte Brennstoffprobe in einem Tiegel unter Luftabschluß fünf Minuten lang bei 900 °C verkocht werden soll. Die Versuche wurden an der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt.

Bei sieben Winterrapssorten aus den Parzellenversuchen wurde der Anteil an Flüchtigen Bestandteilen bestimmt (s. Tabelle 35). Der Mittelwert ($n = 3$) aus allen Versuchen lag bei 73,4 % Anteil Flüchtiger Bestandteile in der wasserfreien Substanz. Für die wasser- und aschefreie Substanz errechnet sich ein Wert von 78,7 %. Der Variationskoeffizient innerhalb der Sorten lag bei allen Versuchen unter 0,5 %.

Tab. 35: Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen von Rapsstroh bei wasserfreier (wf) bzw. wasser- und aschefreier (waf) Substanz

Strohsorte	Flüchtige Bestandteile in Gew.-%	
	F(wf)	F(waf)
Spalte 1	2	3
BELINDA	73,4	78,4
ELVIRA	73,7	77,7
JET NEUF	73,0	81,0
KORINA	73,7	78,3
LIRAKOTA	73,9	80,2
QUINTA	73,6	77,4
RUBIN	72,7	78,2
	$\bar{x} = 73,4$ $s = 0,4$	$\bar{x} = 78,7$ $s = 1,3$

Bei Bestimmungen im folgenden Jahr ergaben sich nahezu dieselben Werte, so daß ein Sorten- oder Jahreseinfluß ausgeschlossen werden kann.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wird in Tabelle 36 ein Vergleich mit anderen Festbrennstoffen vorgenommen.

Tab. 36: Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen in der wasser- und aschefreien Substanz (F_{waf}) von Rapsstroh und verschiedenen anderen Festbrennstoffen (nach GUMZ [40])

Brennstoff	Flüchtige Bestandteile (Gew.-%)	
	F_{waf}	min - max
Spalte 1	2	3
Winterrapsstroh	78,7	77,4 - 81,0
Getreidestroh ¹	80,3	77,3 - 82,5
Getreidestroh ²	75,0	-
Holz ²	84,7	-
Holzkohle	23,2	-
Torf	70	-
Braunkohle	57,5	55,3 - 63,8
Steinkohle	26,3	7,7 - 39,4
Koks	3,8	0 - 10

1) nach HOFSTETTER 1978 [47]

2) nach HELLWIG 1986 [116, 46]

Es ist zu beobachten, daß eine Abnahme der Flüchtigen Bestandteile mit zunehmendem Entstehungsalter und bei technischer Behandlung des Ausgangsmaterials erfolgt. Bei den naturbelassenen Brennstoffen reduziert sich der Anteil von über 80 % bei Holz auf durchschnittlich 26 % bei Steinkohle. Ein Grund für die höheren Werte bei HOFSTETTER gegenüber den Ergebnissen von HELLWIG liegt vermutlich in der Bestimmungsmethode begründet. Während bei HOFSTETTER die Bestimmung der Flüchtigen Bestandteile nach einer von ihm selbst entwickelten Methode bei einer Versuchsdauer von 30 Minuten erfolgte, ging HELLWIG nach DIN 51 720 vor. Bei den rund 5 %-Punkten höheren Werten von HOF-

STETTER mit 80,3 % kann bereits ein Teil des Fixen Kohlenstoffes oxidiert sein.

Neben der Gesamtmenge der Flüchtigen Bestandteile ist bei der Dimensionierung von Feuerungsanlagen auch die Geschwindigkeit, mit der die gasförmigen Substanzen entweichen, von Bedeutung. Die Schwelgase sollten nämlich eine Verweilzeit von einer Sekunde im Bereich der heißen Brennkammer erreichen, um vollständig ausbrennen zu können [116].

HELLWIG 1986 [116] hat zur Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit von Raps- und Getreidestroh Grundlagenversuche durchgeführt. In einer 750 °C heißen Brennkammer verbrannte er 2,5 Liter große Schüttungen von losem Stroh und Briketts der jeweiligen Strohart und erfaßte während des Verbrennungsvorgangs die Gewichtsveränderung. In Abbildung 28 ist das Verhalten der Brennstoffe aufgezeigt.

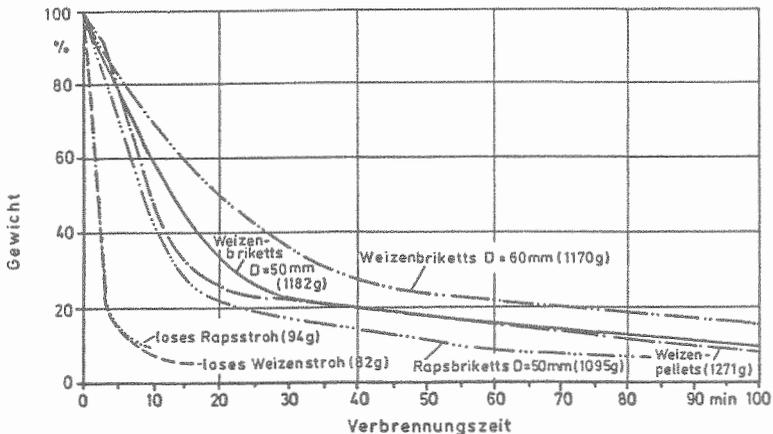


Abb. 28: Abbrandkurve verschiedener Stroh- und Brikettbrennstoffe bei 750 °C (nach HELLOWIG [116])

Aus dem Kurvenverlauf wird deutlich, daß die Verbrennung in zwei Phasen verläuft. In der ersten Phase entweichen dem Brennstoff die gasförmigen Anteile und verbrennen mit langer großer

Flamme. In der zweiten Phase kommt es zu einem langsamen Ausbrand des zurückgebliebenen festen Kohlenstoffs, der flammenlos als Glimmbrand abläuft. Nach HELLOWIG 1986 [116] entspricht der in der ersten Phase der Verbrennung auftretende Gewichtsverlust ziemlich genau dem Anteil der Flüchtigen Bestandteile im Brennstoff.

Bei losen Schüttungen von Raps- und Getreidestroh sind die Gewichtsabnahmen je Zeiteinheit nahezu gleich. In der ersten Phase liegt die Abbrandgeschwindigkeit in einer losen Schüttung bei 320 - 380 g/min·kg Brennstoff. Bei der Kohlenstoffoxidation in der zweiten Phase geht der Abbrand auf 15 - 18 g/min·kg zurück. Bezogen auf die Oberfläche vergasen Rapsstrohhalm nach Angaben von HELLOWIG ca. 18 % schneller als Weizenstrohhalm.

Bei Briketts ist zu beobachten, daß die beiden Abbrandphasen ineinander übergehen und die Abbrandgeschwindigkeit geringer ist als bei losem Stroh. Erklären läßt sich dieses Verhalten durch die langsamere Erwärmung des Brennstoffinneren und die damit verbundene verzögerte Schwelgasabgabe bzw. in der zweiten Abbrandphase durch die Behinderung des Sauerstoffzutritts zum verbleibenden Kohlenstoff durch die außen zurückbleibende Ascheschicht. Die höhere Abbrandgeschwindigkeit bei den Rapsstrohbriketts ist vermutlich auf die geringere Brikettichte zurückzuführen.

Nach den Ergebnissen von HELLOWIG müßte bei Feuerungen für loses Rapsstroh die Nachverbrennungszone für die Schwelgase im Vergleich zu Anlagen für loses Getreidestroh bis zu 18 % größer dimensioniert werden, um ausreichende Verweilzeiten der Schwelgase für einen vollständigen Ausbrand zu erreichen.

3.5.4 Asche- und Nährstoffgehalte

Bei der Verwendung von Rapsstroh zu Feuerungszwecken ist der Aschegehalt bzw. die Aschezusammensetzung in zweifacher Hinsicht von Interesse. Zum einen ist aus der Verfeuerung von Getreidestroh bekannt, daß ein hoher Aschegehalt bei der Verbrennung Probleme im Glutbettbereich durch schmelzende Asche verur-

sachen kann. Andererseits bedingt ein hoher Ascheanfall zusätzlichen Arbeitsaufwand bei der Entaschung der Kessel sowie bei der Beseitigung des Verbrennungsrestes.

Wird Rapsstroh zur Nutzung als Energieträger vom Acker entfernt, so wird dem Boden neben dem in der organischen Substanz enthaltenen Stickstoff auch eine Reihe von Mineralstoffen entzogen. Die Mineralien sind hauptsächlich in der Asche enthalten. Um ein Nährstoffgleichgewicht im Boden zu erhalten, müssen nicht nur die mit der Rapssaat entzogenen Nährstoffe ergänzt, sondern auch die im Rapsstroh beinhaltenen Nährelemente durch geeignete Düngemaßnahmen ersetzt werden. Wird diese Tatsache nicht beachtet, ist langfristig eine Auszehrung der Böden zu erwarten.

Bisher war bei der Körnerrapsproduktion der Nährstoffgehalt im Stroh nur von geringem Interesse, da Rapsstroh auf dem Acker verblieb und die Nährstoffe nach der Umsetzung des Materials dem Boden wieder zur Verfügung standen.

In vier Literaturstellen waren Angaben über Asche- und Nährstoffgehalte von Rapsstroh zu finden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 37 zusammengestellt.

Tab. 37: Nährstoffgehalte von Rapsstroh (Angaben in Gew.-% der Trockensubstanz)

Nährstoff	HONCAMP 1914 [9]	KJELLERUP 1983 [53]	RUPPERT 1985 [93]	N.N. 1987 [24]
Spalte 1	2	3	4	5
Stickstoff N	-	0,80 (0,69-0,97)	-	-
Phosphor P	0,14	0,08 (0,07-0,10)	0,15	0,11
Kalium K	1,12	0,51 (0,43-0,98)	1,35	2,57
Kalzium Ca	1,16	0,90 (0,80-0,99)	-	0,72
Magnesium Mg	0,11	0,05 (0,04-0,07)	0,14	0,22
Schwefel S	-	-	-	0,32
Material	-	Sommerraps	Winterraps	-

Die Werte für die einzelnen Nährstoffe und den Aschegehalt weichen stark voneinander ab und unterscheiden sich teilweise um mehr als 100 %. Ein Grund mag darin liegen, daß die Ergebnisse von RUPPERT 1985 von Winterrapsstroh und die von KJELLERUP 1983 von Sommerraps stammen, während die Zahlen von HONCAMP [9] bereits aus dem Jahre 1914 sind und die Probe nur mit "Rapsstroh" bezeichnet ist. Die in Spalte 5 angeführten Werte stammen von der Dokumentationsstelle der Universität Hohenheim; dabei handelt es sich um nur eine Probe. Im Untersuchungslabor Pascher wurde 1978 bei Rapsstroh ein Schwefelgehalt von 0,08 % ermittelt [115]. Über die Herkünfte der Proben ist nichts bekannt.

Vor dem Hintergrund der wenigen und der stark schwankenden Ergebnisse war es daher notwendig, eigene Untersuchungen durchzuführen.

Für die Bestimmung des Aschegehaltes nach DIN 51 719 für feste Brennstoffe waren geeignete Geräte an der Landtechnik Weihenstephan vorhanden. Die Nährstoffanalysen wurden in den Laboratorien der Bayerischen Hauptversuchsanstalt Weihenstephan und der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau durchgeführt, wobei dieselben Bestimmungsmethoden angewandt wurden.

Die Proben stammten von drei Winterrapsorten, von sechs unterschiedlichen Standorten und aus vier Erntejahren. Da der Stichprobenumfang aus Kostengründen begrenzt werden mußte, war eine Untersuchung verschiedener Einflußfaktoren nicht möglich. Aus diesem Grunde sind in Tabelle 38 nur die Mittelwerte \bar{x} , die Minima und Maxima sowie die Standardabweichung s angeführt.

Für den Aschegehalt ergibt sich ein Durchschnittswert von 6,5 Gew.-% für die wasserfreie Substanz. Dieses Ergebnis liegt über den aus der Literatur [9, 53] verfügbaren Werten. Da jedoch bei dem Mittelwert aus Tabelle 38 sehr große Schwankungen auftreten, ist zu vermuten, daß der Stichprobenumfang bei den früheren Ergebnissen sehr klein gewesen sein muß. Bei der

Tab. 38: Asche- und Nährstoffgehalte von Winterrapsstroh (Angaben in Gew.-% der Trockensubstanz)

Asche/Nährstoff	\bar{x}	min - max	s	n
Spalte 1	2	3	4	5
Asche	6,5	4,5 - 8,7	1,6	9
Stickstoff N	0,70	0,54 - 0,99	0,14	9
Phosphor P	0,15	0,07 - 0,27	0,07	9
Kalium K	1,8	0,6 - 2,6	0,64	9
Kalzium Ca	1,6	1,2 - 2,3	0,36	7
Magnesium Mg	0,10	0,05 - 0,13	0,03	9
Schwefel S	0,19	0,17 - 0,20	0,02	3

Aschegehaltsbestimmung ist auch ein Unterschied bei der Bestimmungsmethodik zu beachten. Für Nährstoffanalysen wird die Veraschung bei einer Temperatur von 550 °C vorgenommen, während bei der Aschebestimmung für feste Brennstoffe nach DIN 51 719 [146] die Probe mindestens 30 Minuten bei 815 °C im Muffelofen verweilen muß. Durch das höhere Temperaturniveau verflüchtigen zusätzlich Stoffe aus der Probe, so daß sich rund 2 %-Punkte niedrigere Aschegehalte ergeben.

Bei Gesamtstickstoff liegen die Werte von KJELLERUP 1983 [53] im gleichen Schwankungsbereich mit 0,70 - 1,00 wie bei dem Winterrapsstroh der eigenen Untersuchung. Bei STREHLER 1978 [115] wurde mit 0,44 % ein deutlich geringerer Gehalt an Gesamtstickstoff festgestellt.

Ein ähnliches Ergebnis ist bei den Mineralstoffen wie Phosphor, Kalium, Kalzium, Magnesium und Schwefel zu verzeichnen. Die Übereinstimmung der eigenen Untersuchungen mit den Literaturwerten ist nur zum Teil gegeben bzw. ist meist nur für einen Bereich der angegebenen Streubreite zutreffend. Nach SCHMIDT 1987 [101] ist der Gehalt an Siliziumdioxid in der Rapsstrohasche mit einem Anteil von 7 - 8 Gew.-% gering, im Gegensatz zu Getreidestrohasche mit Anteilen von 40 - 50 %. Dies erklärt, warum sich die Rapsstrohasche ähnlich wie Holzasche (SiO_2 -

Gehalt 4,0 %) und nicht wie Getreidestrohaschen verhält. Der Ascheerweichungspunkt beträgt bei Rapsstroh ca. 1 200 °C, bei Holz 1 000 - 1 100 °C und bei Weizenstroh nur 800 °C [101].

Bei den Rapsstrohauffangversuchen der Jahre 1985 und 1986 ergab sich ein durchschnittlicher Ertrag von 50 dt TS/ha. Wird eine Bergequote von 80 % unterstellt, so könnten davon 40 dt TS/ha abgefahren werden. Die dabei entnommenen durchschnittlichen Nährstoffmengen je Hektar sind in Tabelle 39 angeführt.

Tab. 39: Nährstoffentzug bei der Ernte von 40 dt Rapsstroh-trockenmasse pro Hektar

Nährstoff	Stickstoff N	Phosphor P	Kalium K	Kalzium Ca	Magnesium Mg	Schwefel S
Entzug in kg/ha	28	6	72	64	4	8

Diese Nährstoffentzugsmengen sind jedoch nur als Richtwerte anzusehen, da die Nährstoffgehalte der einzelnen Proben eine große Streubreite aufweisen. Bei Abfuhr gleicher Getreidestrohmengen werden ähnlich hohe Nährstoffmengen entzogen.

3.6 Energiegewinnung aus Rapsstroh

Über die Verbrennung von Holz und Getreidestroh liegen umfangreiche Meßergebnisse und Erfahrungen vor [116, 49]. Je nach Brennstoffaufbereitungsform werden Anlagen mit absätziger oder kontinuierlicher Brennstoffbeschickung verwendet, wobei die Brennräume dem jeweiligen System bzw. den aufzunehmenden Brennstoffmengen angepaßt sein müssen. Im Bereich der Strohverbrennung ergaben sich häufig Probleme bezüglich der Verbrennungsqualität.

Über die Verbrennung von Rapsstroh liegen keine gesicherten Daten vor. Aus diesem Grund wurden Verbrennungsversuche mit Heizkesseln und Öfen im Bereich von 4 - 90 kW Feuerungsnennleistung durchgeführt.

Um definierte Einflußbedingungen zu erhalten und somit eine Wiederholbarkeit zu gewährleisten, fanden die meisten Versuche mit Rapsstroh auf dem Kesselprüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Weihenstephan statt (s. Abbildung 29). Die Ausstattung des Prüfstandes entsprach den in der DIN 4 702 [140] festgelegten Prüfregeln des Deutschen Normenausschusses zur Prüfung von Heizkesseln und Feststofffeuerungsanlagen.

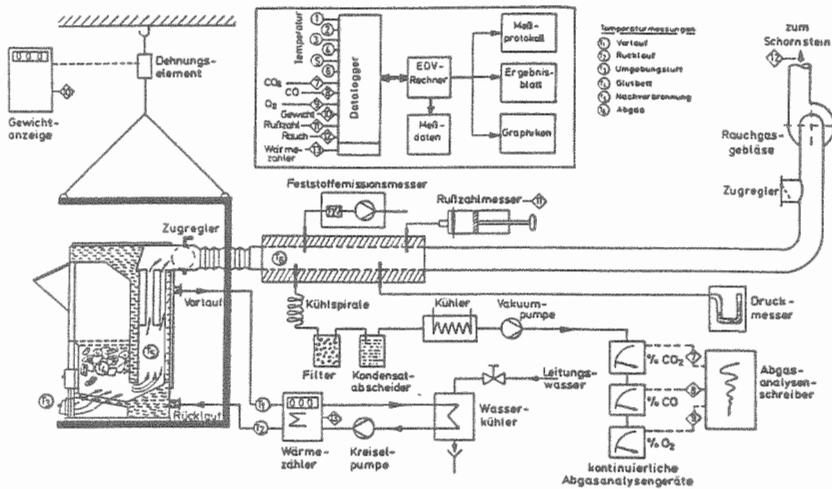


Abb. 29: Prüfstand zur Erprobung von Heizkesseln und Einzelöfen

Während eines Versuches erfolgten kontinuierlich an sechs verschiedenen Stellen Temperaturmessungen. Dabei sind für die Beurteilung der Verbrennung vor allem Glutbett- und Nachverbrennungstemperatur sowie für den Wirkungsgrad die Abgas- und Umgebungslufttemperatur bzw. Kesselwasservor- und Rücklauftemperaturen von Bedeutung.

Bei den Prüfstandsversuchen mit Heizkesseln werden zwei Arten von Wirkungsgrad unterschieden. Der "direkte" Wirkungsgrad wird über die an das Kesselwasser abgegebene Wärmemenge und die verbrauchte Brennstoffmenge ermittelt. "Indirekt" oder "feuerungs-

technisch" wird der Wirkungsgrad über die Verluste in den Abgasen bestimmt. Als Verlustquellen gelten dabei die in den Rauchgasen enthaltenen Wärmemengen (Rauchgasenthalpie; Differenz zwischen Umgebungsluft- und Abgastemperatur) und die in Form von unvollständiger Verbrennung mit dem CO-Anteil korrespondierende Energiemenge. Die nicht über die Abgase verlorengelassene Wärme teilt sich in den an das Kesselwasser abgegebenen Anteil und in die durch Abstrahlung des Wärmeerzeugers entweichende Energie in den Kesselraum.

Aus dem Rauchgasstrom am Ofenausgang erfolgt fortlaufend eine Probenahme zur Analyse des CO₂- und CO-Anteils. Die Bestimmung der Feststoffemission und des Rußbildes erfolgt diskontinuierlich.

Die von den Meßgeräten kontinuierlich erfaßten Daten werden von einem Datalogger aufgenommen, in EDV-fähige Form umgewandelt und durch einen Kleinrechner abgefragt und gespeichert. Für die Auswertung lassen sich die Meßdaten auf einen Großrechner transferieren, aufbereiten und mit dem an der Landtechnik Weihenstephan von HELLWIG und ROGENHOFER erstellten Prüfstandsauswertungsprogramm PSM [154] verrechnen.

Bei den Versuchen an Praxisanlagen mußte auf die Temperaturmessung im Glutbett und im Nachverbrennungsbereich verzichtet werden, da keine Öffnungen zur Installation der Thermoelemente angebracht werden konnten.

Um eine Einordnung der Verbrennungsergebnisse mit Rapsstroh und Rapsstrohbriketts vornehmen zu können, wurden Referenzversuche mit dem jeweils für den Wärmeerzeuger zugelassenen Brennstoff (meist Holz oder Kohle) und z.T. mit Getreidestroh durchgeführt.

3.6.1 Verfeuerung von HD-Ballen

Für die Verfeuerung von Stroh in Form von kleinen kubischen Hochdruckballen (HD-Ballen, 35 x 40 x 50 - 80 cm) sind derzeit nur wenige Heizkessel auf dem Markt. Um den umweltrelevanten

Forderungen des Gesetzgebers [127] gerecht zu werden, dürfen nur noch Kessel mit hoher Feuerungsqualität und hohem Wirkungsgrad eingesetzt werden. Aus diesem Grund kommen bei absätzig beschickten Anlagen nur Heizkessel in Betracht, in denen der Brennstoff nach dem Prinzip des unteren Abbrandes verfeuert wird.

Da in Kesseln dieser Bauart bisher nur Getreidestroh oder Holz verbrannt wurden, war es wichtig, zu prüfen, ob sich Anlagen dieser Art auch für die Energiegewinnung aus Rapsstroh eignen würden und welche Leistungsdaten damit erzielt werden könnten. Die Wahl fiel auf den Unterbrandkessel für HD-Ballen (Füllschacht 80 x 40 x 120 cm), dessen schematischer Aufbau aus Abbildung 30 zu ersehen ist. Der Brennstoffvorratsraum wurde mit einem Aufsatzschacht verlängert, um möglichst viel Brennstoff für den Nachheizvorgang aufgeben zu können. Durch die Schachterhöhung verlängerten sich die Nachfüllintervalle, und die Messungen wurden dadurch weniger beeinflusst.

3.6.1.1 Heizkessel auf dem Kesselprüfstand

Es wurden vier Versuche mit Rapsstroh als Brennstoff durchgeführt und dabei der Kessel jeweils mit voller Last betrieben. Dieser Betriebszustand entspricht der Kombination eines Kessels mit einem Pufferspeicher, wie er von der Bundesimissionsschutzverordnung zur Erhöhung der Verbrennungsqualität gefordert wird [127]. Als Vorversuche und um Vergleichsmöglichkeiten zu haben, erfolgten Befuerungen mit 75 cm langen Fichtenholzscheiten und mit Hochdruckballen von Wintergerstenstroh.

Bei der Verbrennung von Festbrennstoffen sind die Meßwerte je nach Verbrennungsphase teilweise großen Schwankungen unterworfen; Ursachen können Nachheizvorgänge, Ausbrandphasen, Aufbau von Asche und Bewegung im Brennstoffbereich sein. Beispielhaft für den Verlauf von Temperaturen, CO₂- und CO-Gehalt sowie Wirkungsgrad und Kesselleistung eines Versuchsablaufs gehen aus den in Anhangsabbildung 1 und 2 aufgezeichneten Kurven hervor (Versuch Nr. 3 aus Tabelle 40).

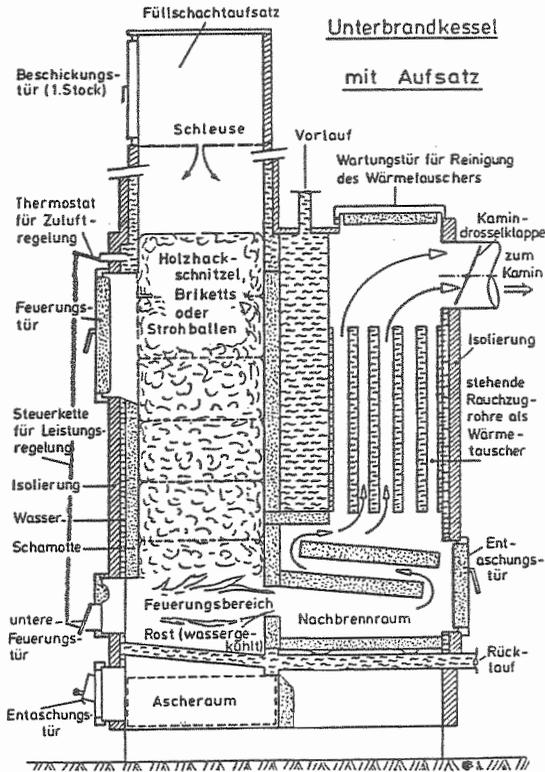


Abb. 30: Schemazeichnung eines Unterbrandkessels für HD-Ballen

Bei den nachfolgenden in Tabellen angegebenen Ergebnissen handelt es sich um die Mittelwerte der in 5-Minuten-Intervallen registrierten Meßergebnisse (250 - 300 Einzelwerte je fünf Minuten) aus jeweils drei Abbrandperioden einer gesamten Versuchsreihe.

Die Mittelwerte der Prüfstandsversuche mit Unterbrandkessel für HD-Ballen sind in Tabelle 40 aufgeführt.

Tab. 40: Prüfstandsversuche mit einem Unterbrandkessel für HD-Ballen

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad	
	CO ₂ Völ.-%	CO Völ.-%		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	dir. %	indir. %
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fichtenholz	7,2	0,27	18,6	863	825	203	73	78
Gerstenstroh	8,7	0,30	18,3	-	797	204	69	77
Rapsstroh Nr. 1	7,5	0,81	23,0	556	842	225	61	67
Nr. 2	10,3	0,51	21,4	660	803	209	68	80
Nr. 3	10,3	1,01	24,7	543	773	216	55	76
Nr. 4	9,9	1,05	22,7	570	769	210	58	71

Die Rauchgaszusammensetzung weist bei allen Versuchen Werte für Kohlendioxid von 7,2 - 10,3 Volumen-% und für Kohlenmonoxid von 0,27 - 1,05 Volumen-% auf. Mit Ausnahme des Feuerungsversuchs Nr. 1 mit Rapsstroh sind die CO₂-Werte höher als bei Holz und Gerstenstroh. Da jedoch die CO-Werte bei Rapsstroh das Zwei- bis Vierfache gegenüber Holz und Getreidestroh betragen, ergibt sich für den über die Rauchgasanalyse ermittelten indirekten Wirkungsgrad trotz des höheren Kohlendioxidanteils kein höherer Wert. Der Grund ist darin zu sehen, daß der Energieverlust durch nicht vollständige Verbrennung von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid in den Vorversuchen bei 2,3 - 2,5 % lag, beim Brennstoff Rapsstroh jedoch zwischen 3,3 und 8,6 % betrug.

Bei sämtlichen Versuchen lagen die Temperaturen im Nachverbrennungsbereich zwischen 770 und 840 °C. Diese Temperaturen reichen aus, um Kohlenoxid zu entzünden (Zündtemperatur nach [98] 610 °C). Die Ursache der hohen CO-Werte ist daher in einer ungenügenden Sauerstoffbeimischung im Nachverbrennungsbereich zu sehen. Für diese Vermutung spricht auch die Tatsache, daß bei ähnlich hohem Heizwert aller Brennstoffe bei Rapsstroh pro Zeiteinheit mit 22 - 25 kg/h rund 20 % mehr Heizmaterial durchgesetzt wurde und bei gleicher Verbrennungsluftzudosierung höhere CO₂-Werte erzielt wurden. Dieser schnellere Abbrand bei den HD-Rapsstrohballen ist auch für die höheren Abgastemperatur-

ren mitverantwortlich, ebenso wie für die angestiegene Kesselleistung (direkt) auf 50 - 58 kW gegenüber Gerstenstroh mit 44 kW. Damit werden die Grundlagenversuche von HELLOWIG 1966 [116] (s. Kap. 3.5.3) bestätigt, daß bei Rapsstroh höhere Abbrandgeschwindigkeiten zu verzeichnen sind.

Auf eine Änderung der Strömungsverhältnisse deuten ebenfalls die immer höheren Mengen an Feststoffemissionen bei Rapsstroh hin, die im Durchschnitt aller Versuche bei 542 mg/Nm^3 lagen (bezogen auf 12 % CO_2). Bei Getreidestroh ergab sich ein Mittelwert von 236 mg/Nm^3 . Nur bei Holz konnten mit weniger als 100 mg/Nm^3 die gesetzlich vorgeschriebenen Maximalwerte von 150 mg/Nm^3 Rauchgas eingehalten werden (s. Anhangstabelle 5). In den Filtern zur Feststoffmessung konnten jedoch kaum teerhaltige Bestandteile, sondern faßt nur weiß-graue Aschepartikel festgestellt werden, die aus dem Verbrennungsbereich mit hochgerissen wurden. Dieser Umstand und die hohen Temperaturen im Verbrennungsbereich belegen einen guten Ausbrand des Brennstoffes Rapsstroh. Geringe Gasgeschwindigkeiten im Rostbereich, eine Beruhigungszone vor dem Wärmetauscher oder eine separate Staubabscheidevorrichtung könnten den Feststoffgehalt auf das gesetzlich vorgeschriebene Maß senken.

Der indirekte oder feuerungstechnische Wirkungsgrad liegt bei Rapsstroh zwischen 67 und 80 % und kann für strohbefeuerte Heizkessel als gut bezeichnet werden. Der über die an das Heizungswasser abgegebene Wärmeenergie errechnete Gesamtwirkungsgrad lag bei der Rapsstrohverbrennung aufgrund der höheren CO -Werte und der 5 - 20 °C höheren Abgastemperaturen rund 10 % niedriger als bei den Versuchen mit Holz und Wintergerstenstroh als Brennstoff. Der Wirkungsgrad einer Anlage läßt jedoch nur bedingt Aussagen über die Eignung eines Brennstoffes zu, da sein Wert hauptsächlich von der Fläche des Wärmetauschers abhängig ist.

3.6.1.2 Heizkessel in Praxisanlagen

Zur Verfeuerung von Rapsstroh erfolgten auch Versuche mit zwei Anlagen, die auf landwirtschaftlichen Betrieben in Erching und Pattendorf installiert sind (Tab. 41). In beiden Fällen wurden ebenfalls baugleiche Unterbrandheizkessel für HD-Ballen wie beim Prüfstandsversuch getestet.

Die Rauchgasanalyse bei der Halmgutverbrennung ergab bei beiden Praxisanlagen einen Wert für Kohlendioxid von 6 - 8 Vol.-% und für Kohlenmonoxid von 0,2 - 1,1 Vol.-%. Die CO₂-Werte liegen damit bei allen Varianten nahe beieinander. Auffallend ist jedoch der 2- bis 5-fach höhere Kohlenoxidgehalt bei Rapsstrohverbrennung gegenüber der Weizenstrohvariante. Von den Gesamtverlusten beträgt die durch unvollständige Verbrennung verlorengegangene, im CO gebundene Wärmemenge 4 - 7 %-Punkte bei Raps- und nur etwa 2 %-Punkte bei Weizenstroh. Bei nahezu gleichem Heizwert der Stroharten wird bei Rapsstroh pro Stunde etwa 1,5 kg mehr Brennstoff verbraucht. Die höheren Kohlenoxidgehalte belegen erneut den Luftmangel im Verbrennungsbereich der Schwelgase.

Tab. 41: Befuerung von zwei Unterbrandkesseln für HD-Ballen

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsg. indirekt %
	CO ₂ Vol.-%	CO		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
<u>Anlage I:</u>	Versuchsort Erching, Kesselnennleistung 50 kW						
Fichtenholz	11	0,1	12,8	852	906	330	76
W.-Weizenstroh	6	0,3	19,0	-	822	328	56
W.-Rapsstroh 1	8	0,6	20,4	805	-	315	58
W.-Rapsstroh 2	6	0,6	20,6	683	879	309	56
<u>Anlage II:</u>	Versuchsort Pattendorf, Kesselnennleistung 90 kW						
W.-Weizenstroh	6,0	0,19	-	-	-	218	68
W.-Rapsstroh	8,2	1,06	19,9	-	-	296	65

Der über die Verluste an Rauchgasenthalpie ermittelte feuerungstechnische Wirkungsgrad der Anlage I ist mit weniger als 60 % ungenügend. Rund 10 %-Punkte der Verluste sind durch die um etwa 100 °C zu hohen Abgastemperaturen bedingt; die Wärmetauscherflächen sind zu gering bemessen. Auch bei der Anlage II ist die Wirkungsgradminderung um 3 %-Punkte bei Rapsstroh vor allem durch den Anstieg der mittleren Abgastemperatur (+78 °C) und der CO-Konzentration bedingt (s. Anhangstabelle 6).

Insgesamt müssen die Ergebnisse der Praxisversuche mit Vorbehalt betrachtet werden, da bei der ersten Anlage kein Brennstoffvorratsschacht zur Verfügung stand und durch die häufigen Nachheizvorgänge die Messungen beeinträchtigt wurden. Bei der zweiten Anlage waren die Ballenlängen nicht auf den Vorratsschacht abgestimmt, was häufig zu einem Verklemmen der Ballen im Schacht führte. Aus diesem Grunde schwanken die gemessenen Werte etwas stärker um die angegebenen Mittelwerte als bei den Prüfstandsversuchen.

Aus den Feuerungsversuchen mit Rapsstrohbällen in Heizkesseln für Scheitholz und Getreidestroh lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen: Aufgrund der höheren Abbrandgeschwindigkeit des Stroh der Ölsaart ergibt sich eine Erhöhung der Kesselleistung und ein Luftmangel im Nachverbrennungsbereich. Als Abhilfemaßnahmen wären zur Erhöhung der Verbrennungsqualität eine zusätzliche Sekundärluftbeimischung notwendig oder eine Verkleinerung der Feuerungsrostfläche, die die Feuerungsleistung bzw. den spezifischen Brennstoffverbrauch verringern würde.

3.6.2 Verfeuerung von Briketts

Neben den Vorzügen der Brikettierung, wie Volumenreduzierung und Erleichterung bei der Brennstoffhandhabung steht auch die Überlegung, dem traditionellen Festbrennstoffverbraucher neben Kohle und Holz auch Stroh als Brennstoff anbieten zu können. Damit kann ein weiteres Marktsegment für das Halmgut Stroh erschlossen werden. Der Brennstoff sollte dabei ähnliche Eigenschaften wie der zu substituierende Energieträger aufweisen,

um in bisher genutzten Einzelöfen oder Heizkesseln eingesetzt werden zu können.

3.6.2.1 Einzelöfen

Zur Eignungsprüfung von Strohbricketts als Brennstoff für Einzelöfen wurden Versuche auf dem Prüfstand der Landtechnik Weihenstephan nach den in der DIN 18 890 [142] festgelegten Normen durchgeführt. Da Strohbricketts bisher kaum in der Praxis als Brennstoff eingesetzt wurden und auch nicht zu den "raucharmen Prüfbrennstoffen" nach obiger DIN-Norm zählen, wurden Einzelöfen unterschiedlicher Bauart verwendet, die für Holz oder Kohle zugelassen sind.

Es wurden vier Versuche mit Einzelöfen durchgeführt. Davon waren drei Geräte nach dem Durchbrandprinzip und eines nach dem System des unteren Abbrandes konstruiert.

Ein Durchbrandofen wies nach Herstellerangaben eine Nennheizleistung von 4,65 kW auf und war für die Verfeuerung von Holz, Kohle und Torf ausgelegt. Die Brennkammer bestand aus verschraubten Metallgußplatten. Die erzielten Verbrennungsergebnisse sind in Tabelle 42 angegeben.

Tab. 42: Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit Metallgußbrennkammer (Nennwärmeleistung 4,65 kW)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad indirekt %
	CO ₂ Völ.-%	CO		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Steinkohle	6,6	-	0,9	745	544	348	77
Fichtenholz	12,2	-	-	-	623	487	68
Getreide- strohbricketts	6,7	0,01	3,6	515	637	493	27
Rapsstroh- bricketts	6,4	0,02	1,7	796	556	383	35

Dieser Einzelofen ist für Kohle- und Stückholzverfeuerung sehr gut bzw. gut geeignet. Trotz Abgastemperaturen von 350 bzw.

490 °C im Versuchsdurchschnitt liegen die feuerungstechnischen Wirkungsgrade bei 77 bzw. 68 %, was auf eine sehr gute Verbrennungsqualität hindeutet. Für diese Schlußfolgerung sprechen auch die geringen Staubemissionen, die in der Dauerbetriebsphase zwischen 36 und 152 mg/m³ Rauchgas lagen. In der Entschwelungsphase wurden bei Holz 404 mg/m³ Rauchgas gemessen (s. Anhangstabelle 7).

Trotz geringer Kohlenmonoxidgehalte von 0,01 - 0,02 Vol.-% und Kohlendioxidgehalten zwischen 6 und 7 Vol.-% beträgt der Wirkungsgrad bei der Strohbrickettverfeuerung aufgrund der hohen Verluste an freier Wärme in den Rauchgasen (hohe Rauchgastemperaturen) nur 27 - 35 %. Die Abgastemperaturen überschreiten je nach Verbrennungsphase den in der Prüfungsordnung (DIN 18 890) festgeschriebenen Maximalwert von 400 °C zum Teil erheblich. Desweiteren waren bei der Strohverbrennung außergewöhnlich hohe Staubemissionen bis zu maximal 12 000 mg/m³ Rauchgas gemessen worden (s. Anhangstabelle 7).

Aufgrund der hohen Abgastemperaturen und des hohen Staubauswurfs kann ein Betrieb dieses für Kohle und Holz konzipierten Einzelofens (Durchbrandsystem) mit Strohbricketts wegen zu geringem Wirkungsgrad nicht empfohlen werden, obwohl die Rauchgasanalyse günstige Ergebnisse aufweist. Der Ofen müßte mit zusätzlichen Wärmetauscherflächen und einer Staubabscheidung ausgestattet werden, um einen Mindestwirkungsgrad (DIN 18 890) von 70 % zu erreichen und die Staubemission auf ein zulässiges Maß zu reduzieren.

Das zweite Testgerät war ebenfalls ein Durchbrand-Einzelofen. Es handelte sich um eine kachelofenartige Konstruktion aus einzelnen, funktionsfertig vormontierten Teilen. Die Brennkammerwände und die Rauchgaszüge bestanden aus Schamottplatten. Die Nennwärmeleistung des vom Hersteller als "Allesbrenner" bezeichneten Ofens war mit 13 kW angegeben.

Der "Kachel-Einzelofen" erreichte den von der DIN 18 890 vorgegebenen Mindestwirkungsgrad von 70 % bei Befuerung mit Fichtenscheitholz, bei Verwendung der Strohpreßlinge wird dieser Wert um 11 bzw. 12 %-Punkte unterschritten.

Tab. 43: Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit Schamottbrennkammer (Nennwärmeleistung 13 kW)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Temperatur			Wirkungsgrad indirekt %
	CO ₂ Vol.-%	CO Vol.-%	Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7
Fichtenholz	4,0	0,32	662	367	128	71
Getreidestroh- briketts	4,5	0,77	731	313	235	58
Rapsstrohbriketts	3,4	0,50	625	317	141	59

Insgesamt liegen bei allen Versuchen die Werte für Kohlendioxid mit 3,4 - 4,5 Vol.-% sehr niedrig und in Relation dazu die Ergebnisse insbesondere bei den Stroh brennstoffen bei Kohlenmonoxid mit 0,5 - 0,8 Vol.-% hoch. Diese hohen Kohlenoxidwerte können in einer ungenügenden Sekundärluftbeimengung begründet sein, aber auch in den geringen Temperaturen im Nachverbrennungsbereich von durchschnittlich 310 - 370 °C liegen, die einen vollständigen Ausbrand der Schwelgase nicht gewährleisten (Zündtemperatur von Ruß und Schwelgasen mindestens 550 °C). Bei den Stroh brennstoffen lagen die Feststoffemissionen zwischen 280 und 1 100 mg/m³.

Bei einem weiteren Versuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit runder Metallbrennkammer ergaben sich bezüglich der Rauchgaszusammensetzung günstigere Durchschnittsergebnisse als bei den zuvor getesteten Modellen (s. Tabelle 44).

Tab. 44: Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit runder Metallbrennkammer (Nennwärmeleistung 16 kW)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad indirekt %
	CO ₂ Vol.-%	CO Vol.-%		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Fichtenholz	11,5	1,35	7,6	-	-	442	62
Rapsstrohbriketts	9,8	0,54	13,9	-	-	419	60

Obwohl dieser Einzelofen im Vergleich zu den anderen Geräten bei CO₂ mit 11,5 Vol.-% bei Holz und 9,5 Vol.-% bei Rapsstrohbriketts die höchsten Werte aufwies, errechnete sich bedingt durch die hohen Abgastemperaturen von über 400 °C nur ein feuerungstechnischer Wirkungsgrad von 62 bzw. 60 %. Mit gemessenen Wärmeleistungen von 21 und 34 kW bei Holz und Strohbricketts wurde die angegebene Nennwärmeleistung um 31 bzw. 112 % überschritten. Bei Rapsstrohbriketts lag der Feststoffausstoß im Rauchgas mit 2 470 bis 4 550 mg/m³ sehr hoch⁴.

Bei einem weiteren Versuch mit einem Einzelofen mit unterem Brennstoffabbrand, der nach Herstellerangaben für Kohle geeignet ist, wurde mit Strohbricketts nur die Hälfte der angegebenen Nennwärmeleistung von 5,8 kW erreicht. Die dabei erzielten Wirkungsgrade erreichten nur rund 20 % (s. Anhangstabelle 9). Für schnell entschwelende Brennstoffe sind Unterbrand-Einzelöfen nicht geeignet.

Aus allen Versuchen wird deutlich, daß der Einsatz von Rapsstrohbriketts als alleiniger Brennstoff zur absätzigen Befeuerung von Einzelöfen im Vergleich mit herkömmlichen Brennstoffen wie Kohle und Holz problematisch ist. Die hohen Staubemissionen liegen meist brennstoffbedingt bei den Strohbricketts weit über den für Öfen über 22 kW Nennwärmeleistung vorgeschriebenen 150 mg/m³ Rauchgas [127] (dieser Wert ist für Kleinf Feuerstätten nicht bindend, dient jedoch als Vergleichsmaßstab). Die geringen Wirkungsgrade sind häufig durch die Konstruktion (hohe Abgastemperaturen durch zu geringe Wärmetauscherflächen) und das Verbrennungsprinzip bzw. die ungenügende Verbrennungsluftregulierung der Feuerstätten bedingt. Als eindeutig nachteilig wirkt sich bei den Strohbricketts der hohe Ascheanteil von 5 - 10 % des Brennstoffgewichts aus, der neben einem erhöhten Arbeitszeitbedarf für die Entaschung bei zwei Versuchen zum Schmelzen der Getreidestrohasche und nach dem Abkühlen zur Schlackebildung auf dem Verbrennungsrost führte. Bei längerer Betriebsdauer ergibt sich durch die sich aufbauende Asche im Brennraum nach und nach eine Beeinträchtigung der Verbrennung.

⁴ Die Feststoffemissionen konnten wegen Gerätedefektes bei der Verfeuerung von Fichtenholzscheiten nicht ermittelt werden.

Hohe Abgastemperaturen und stark voneinander abweichende Rauchgaszusammensetzung nach Brennstoffzugabe und in der Ausbrandphase kennzeichneten meist das Abbrandverhalten der erprobten Kleinöfen mit brikettierten Stroh- und Rapsstrohstoffen. Bei keinem der Feuerungsversuche konnte mit Rapsstroh- oder Stroh- briketts der in der DIN 18 890 geforderte Mindestwirkungsgrad von 70 % erreicht werden. Somit sind die getesteten Einzelöfen für die Verbrennung von Rapsstroh- oder Stroh- briketts allein nicht geeignet.

3.6.2.2 Heizkessel

Zur Verfeuerung von Rapsstroh- oder Stroh- briketts in Heizkesseln für Scheitholz kleinerer Leistung wurden drei Versuche durchgeführt. Die Messungen erfolgten an zwei Geräten mit unterem Brennstoffabbrand und einem Durchbrandkessel.

Die Unterbrand-Heizkessel hatten nach Herstellerangaben Nennwärmeleistungen von 37 und 31 kW. Gegenüber herkömmlichen Unterbrand-Heizkesseln wurde die Verbrennungsluft jeweils durch Gebläse zugeführt.

Es wurden Fichtenholzscheite, Fichtenholzscheite mit Rapsstroh- oder Stroh- briketts gemischt und Rapsstroh- oder Stroh- briketts alleine verfeuert (s. Tabelle 45).

Tab. 45: Prüfstandsversuche mit einem Unterbrand-Heizkessel mit Gebläseluftzuführung (Nennwärmeleistung 37 kW)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad	
	CO ₂ Vol.-%	CO		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	ind. %	dir. %
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fichtenholz Nr1	9,3	0,59	7,7	789	560	195	80	70
Fichtenholz + Rapsstroh- briketts Nr. 2	11,9	1,38	11,7	890	790	242	77	65
	9,7	0,11	7,7	855	746	223	81	-
Rapsstroh- briketts Nr. 3								

zusätzl. Einlegerost bei Versuch Nr. 2 und 3;
 zusätzl. Sekundärlufteinbringung bei Versuch Nr. 3

Die erzielten Ergebnisse sind aus verbrennungstechnischer Sicht mit 9,3 - 11,9 Vol.-% CO_2 als gut zu bezeichnen. Die hohen Temperaturen im Glutbett von 790 - 890 °C und im Nachverbrennungsbereich von 560 - 790 °C gewährleisteten einen vollständigen Ausbrand der Schwelgase, wenn genügend Verbrennungsluft im Nachverbrennungsbereich zur Verfügung stand (s. Versuch 3).

Da sich beim Versuch mit der Brennstoffmischung bereits Probleme mit schmelzender Rapsstrohasche andeuteten, wurde für die Verbrennung von Rapsstrohbriketts durch einen zusätzlichen Einlegerost versucht, ein Verlegen des kleinen Originalrostes zu verhindern. Durch zusätzliche Luftspeisung im Nachverbrennungsbereich sollte der bereits bei Versuch Nr. 2 vermutete Verbrennungsluftmangel behoben werden.

Durch die Änderungsmaßnahmen konnte im Versuch mit Rapsstrohbriketts alleine der Anteil des Kohlenmonoxids im Rauchgas bis auf 0,11 Volumen-% abgesenkt und damit der Beweis erbracht werden, daß die hohen CO-Werte auf Luftmangel zurückzuführen sind. Durch dieses Vorgehen konnten die durch CO bedingten Wärmeverluste in den Rauchgasen auf weniger als 1 % im Vergleich zu 5 und 7 % (errechnet aus Ergebnissen in Spalte 3) bei den vorausgehenden Meßserien vermindert werden.

Mit dem höheren Brennstoffverbrauch bei der Mischung von Holz und Rapsstrohbriketts (Versuch Nr. 2) mit 11,7 kg ging eine gemessene Wärmeleistungsabgabe von 36,6 kW einher. Bei reiner Holz- und Rapsstrohbrikettverbrennung (Versuch Nr. 1 und 3) betrug diese nur 26,4 und 24,4 kW, d.h. es wurden nur etwa 70 % der angegebenen Nennwärmeleistung erreicht. Der spezifische Brennstoffverbrauch lag in allen Fällen bei rund 0,3 kg Brennstoff pro kW Wärmeleistung.

Probleme durch Ascheverschlackung wurden nicht beobachtet. Nach dem Erkalten der Ascherückstände war nur ein leichtes Verschmelzen des weiß-grauen Rückstandes festzustellen, was bei der Ascheentnahme jedoch keine Probleme verursachte.

Die Feststoffemissionen lagen beim Verbrennen der Fichtenholzscheite bei 24 und 62 mg/m^3 Rauchgas und bei der Brennstoff-

mischung bei 50 und 138 mg/m³. Damit wurde der vorgeschriebene Grenzwert von 150 mg/m³ Rauchgas [127] in keinem Fall überschritten. Für den Feuerungsversuch mit Rapsstrohbriketts konnten wegen eines Meßgerätedefekts keine Werte aufgezeichnet werden. Aufgrund der sehr guten Verbrennungswerte dürften die Feststoffemissionen jedoch zwischen den obigen Ergebnissen liegen.

Mit einem weiteren Heizkessel ähnlicher Bauart konnten nahezu dieselben Ergebnisse erzielt werden wie bei obigem Versuch (s. Anhangstabelle 10).

Feuerungsversuche mit einem Heizkessel nach dem Durchbrandsystem ergaben sowohl bei Holz- als auch bei Rapsstrohbrikettverbrennung unbefriedigende Ergebnisse bezüglich Feuerungsqualität und Wirkungsgrad. Bedingt durch das Verbrennungssystem traten nach der Brennstoffzugabe durch die schnelle Entschwelung starke Rauchentwicklung verbunden mit hohen CO-Emissionen auf; in der Ausbrandphase sanken CO₂- und CO-Gehalte stark ab und die Oxidation des "Fixen Kohlenstoffes" erfolgte rauchlos. Der große Unterschied in diesen Verbrennungsphasen wird anhand der in Anhangstabelle 11 angegebenen Mittelwerte nicht deutlich. Diese extremen Schwankungen lassen Geräte nach diesem Konstruktionsprinzip für schnell entgasende Strohbrandstoffe (z.T. auch für Holz) als ungeeignet erscheinen.

Bei Feuerungsversuchen mit Weizenstrohbriketts, die KAMM und RÖHM 1984 [49] durchführten, ergaben sich ähnliche Zusammenhänge, wie sie bei obigen Versuchen mit Getreide- und Rapsstrohbriketts erkennbar wurden. An drei verschiedenen Unterbrandheizkesseln mit 20 - 25 kW Nennleistung betragen die gemessenen Heizleistungen 40 - 60 kW - ein Beweis für die deutlich erhöhte Abbrandgeschwindigkeit der Strohbrandstoffe. Trotz der schnellen Verbrennung lagen die CO₂-Gehalte mit 9 - 12 Vol.-% günstig, die Kohlenmonoxidwerte mit 0,3 - 0,9 Vol.-% allerdings höher als beispielsweise bei einem Feuerungsversuch mit Holzhackschnitzeln. Nur bei zwei von fünf Versuchen wurde der Grenzwert von 150 mg/m³ Staubgehalt im Rauchgas eingehalten; die anderen Werte lagen zwischen 250 - 330 mg/m³. Bei den eigenen Versuchen mit Rapsstrohbriketts als Brennstoff wurden

mit Unterbrand-Heizkesseln ähnliche feuerungstechnische Kennwerte und Staubemissionen wie bei KAMM und RÖHM erzielt.

Bei den eigenen Versuchen mit Scheitholz-Heizkesseln kleinerer Feuerungsleistung (bis 37 kW) zeigten die Rapsstrohbriketts ungünstigeres Abbrandverhalten als Holz. Nur durch eine gezielte Luftbeimischung im Nachverbrennungsbereich ließen sich die Kohlenmonoxidgehalte und die damit verbundenen Wärmeverluste verringern. Im Vergleich zur Holzverbrennung war schon aufgrund des höheren Aschegehaltes und des schnelleren Abbrandes bei Raps- und Getreidestrohbriketts mit höheren Feststoffemissionen zu rechnen. Bei der Verfeuerung von Rapsstrohbriketts als alleinigem Brennstoff konnten bei den getesteten Unterbrand-Heizkesseln die Grenzwerte des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [127] nur bei einem Gerät eingehalten werden.

4. Kostenabschätzung zur Nutzung von Rapsöl und Rapsstroh als Energieträger

Der Einsatz von Rapsöl und Rapsstroh als Energieträger ist meist nur vereinzelt und unter Versuchsbedingungen erfolgt. Aufgrund des geringen verfügbaren Datenmaterials müssen verschiedene Annahmen getroffen werden. Deshalb können die entstehenden Kosten der Nutzung von Rapsöl als Kraft- und Brennstoff sowie der Nutzung des Rapsstrohs zur Wärmeerzeugung nur grob abgeschätzt werden. Da durch die Verwendung der Rapsprodukte die konventionellen Kraft- und Brennstoffe Diesel- und Heizöl bzw. Holz und Kohle ersetzt werden sollen, ist es sinnvoll, neben den Produktionskosten von Rapsöl und Rapsstroh auch die anfallenden Kosten (Mehrkosten) zu beziffern, die sich aus dem höheren Aufwand gegenüber herkömmlichem Betrieb ergeben.

4.1 Kosten für den Energieträger Rapsöl

Ausgehend von den EG-Marktordnungspreisen für Ölsaaten berechnete GÖTZKE 1988 [37] die Kosten für Rapsöl. Bei einem Auszahlungspreis von 88 DM/dt an die erzeugenden Landwirte, einem Verkaufserlös für Rapsextraktionsschrot von ca. 31 DM/dt und Kosten für die Erfassung, den Transport und die Ölgewinnung von 7,20 DM/dt Rapssaat errechnen sich Gesamtkosten von 1,79 DM/l Rapsöl.

Um den rapssaatverarbeitenden Betrieben EG-Ware zu gleichen Bedingungen anbieten zu können, wie sie auf dem Weltmarkt bezogen werden könnte, wird aufgrund der bestehenden Marktordnung eine Erstattung der Preisdifferenz in Form einer Beihilfe für die Verarbeitung von EG-Rapssaat gewährt. Bedingt durch das Beihilfesystem bzw. durch die Weltmarktpreise für Rapssaat wurde Rapsöl 1988 frei Ölmühle für 0,80 - 1,00 DM/l angeboten. Da Kraftstoffe und Heizöl dem Endverbraucher i.d.R. in volumetrischen Mengen (l) angeboten werden sollen sich nachfolgende Preis- und Kostenangaben ebenfalls auf diese Volumeneinheit beziehen.

4.1.1 Kosten für den Motorenbetrieb mit reinem Rapsöl

Neben den Kosten für den Kauf von Rapsöl ist beim Betrieb von Dieselmotoren mit dem alternativen Treibstoff mit zusätzlichen Kostenbelastungen durch Mehrausgaben beim Motorenkauf und mit höheren Kraftstoffverbräuchen zu rechnen.

Pflanzenölbetriebende Dieselmotoren werden in der BRD versuchsweise nur in sehr kleinen Stückzahlen eingesetzt (ca. 8 Stück). Die Umbaumaßnahmen erfolgten meist in Einzelanfertigung, so daß die Kosten der Umrüstung nicht exakt beziffert werden können.

Die zusätzlichen Betriebskosten je Liter verbrauchten Kraftstoffes für einen "Pflanzenölmotor" sind in Abhängigkeit von den Mehrausgaben bei der Anschaffung in Abbildung 31 dargestellt. Dabei wird je nach Motorlaufzeit eine Nutzungsdauer von 15 bzw. 10 Jahren und eine Verzinsung des eingesetzten Kapitals von 8 % p.a. (für die Hälfte der zusätzlichen Anschaffungskosten) angenommen.

Aus der Darstellung wird deutlich, daß in Abhängigkeit der Umrüstkosten und des jährlichen Kraftstoffverbrauchs die Mehrkosten je Liter verbrauchten Kraftstoffs über 0,40 DM betragen können. Bei Umbaukosten von 5 000 DM bzw. 10 000 DM [37] beläuft sich bei einem Jahresverbrauch von 4 000 l Kraftstoff der Mehrbetrag auf ca. 0,13 bzw. 0,27 DM (Nutzungsdauer 15 Jahre); bei einem 75-kW-Schlepper entspricht ein Jahresverbrauch von 4 000 l etwa 400 Betriebsstunden [92]. Würde der Schlepper rund 1 000 Stunden jährlich betrieben (Verbrauch 10 000 l), so errechneten sich bei Anschaffungsmehrkosten von 5 000 bzw. 10 000 DM Mehrkosten je Liter verbrauchtem Kraftstoff von 0,07 bzw. 0,14 DM (Nutzungsdauer 10 Jahre). Für die Bewirtschaftung von 1 ha Ackerfläche werden durchschnittlich 100 l Dieselmotorkraftstoff benötigt [117]; mit einer Kraftstoffmenge von 4 000 bzw. 10 000 l kann ein Landwirtschaftsbetrieb mit rund 40 bzw. 100 ha Ackerfläche bewirtschaftet werden.

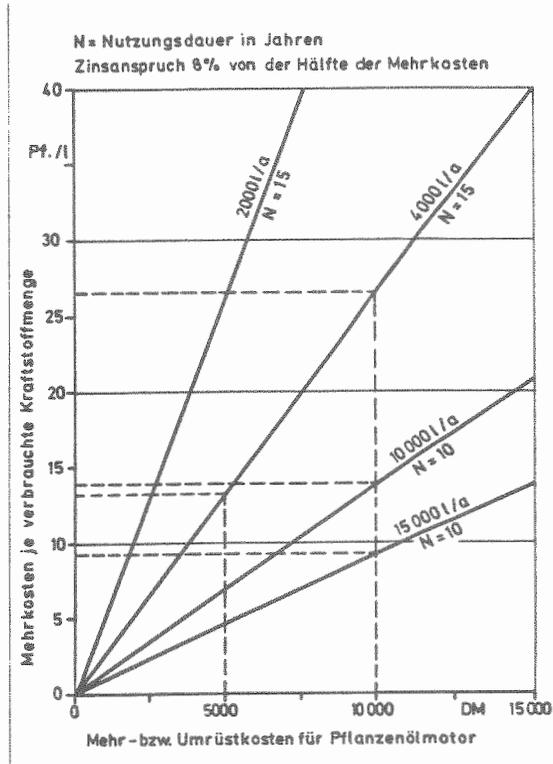


Abb. 31: Kraftstoffmehrkosten in Abhängigkeit von Umrüstkosten und Nutzungsdauer

Rapsöl hat volumenbezogen einen ca. 7 % geringeren unteren Heizwert als Dieselöl. Bei konstantem Motorwirkungsgrad ist bei einem pflanzenölbetriebenen Dieselmotor deshalb mit einem ca. 7 % höherem volumetrischen Pflanzenölverbrauch gegenüber Dieselbetrieb zu rechnen.

Mit einer Ausnahme sind alle pflanzenöлтаuglichen Motoren mit einer Kraftstoffeinspritzung in eine Vor- oder Wirbelkammer (IDI) ausgestattet bzw. es müssen direkteinspritzende Dieselmotoren umgerüstet werden. Bei einem solchen Umbau erhöht sich der Dieselölverbrauch gegenüber der Originalversion um 5 - 11 %.

Der volumetrische Mehrverbrauch von Rapsöl gegenüber Dieselmotorenkraftstoff beträgt 4 - 9 %; somit kann der volumetrische Rapsöl-kraftstoffverbrauch 9 - 20 % bei einem Vorkammer-Dieselmotor höher liegen, als bei einem DI-Dieselmotor mit Dieselölbetrieb [123, 22].

Eine Auflistung der Kraftstoffkosten für rapsölbetriebene Dieselmotoren und der Mehrkosten gegenüber Dieselölbetrieb wird in Tabelle 46 vorgenommen.

Tab. 46: Kraftstoffkosten und Mehrkosten (DM/l) für den Dieselmotorenbetrieb mit reinem Rapsöl bei einem Vorkammer-Motor (IDI) und einem DI-Motor bei konstantem Motorwirkungsgrad

Kosten bzw. Mehrkosten für ...	IDI-Motor	DI-Motor
Kraftstoff Rapsöl ¹	0,80 - 1,00 (1,79)	0,80 - 1,00 (1,79)
Motorenumbau ²	0,14 - 0,27	0,14 - 0,27
vol. Kraftstoffmehrverbrauch bzw. geringeren Motorwirkungsgrad (9 - 20 %)	- 0,07 - 0,20 (0,16 - 0,36)	0,05 - 0,07 (0,13) -
gesamt	1,01 - 1,47 (2,09 - 2,42)	0,99 - 1,34 (2,06 - 2,19)

1) Kosten ohne Verarbeitungsbeihilfe in (); 2) Motor-Umrüstkosten
10.000 DM, 400 bzw. 1 000 Motorbetriebsstunden/a

In dem in Tabelle 46 gewählten Beispiel entstehen beim Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff Gesamtkosten von 1,00 - 1,50 DM/l. Bei einem Rapssaatpreis von 88 DM/dt würde ohne Verarbeitungsbeihilfe für die Ölgewinnung die Rapsölverwendung in Dieselmotoren Kosten von mehr als 2,00 DM/l verursachen. Die nicht kraftstoffbedingten Mehraufwendungen betragen 0,20 - 0,70 DM/l verbrauchten Treibstoff.

Könnten pflanzenöltaugliche Dieselmotoren aus der Serienproduktion eines Motorenherstellers bezogen werden, so müßte nach Angaben von GÖTZKE 1988 [37] nur mit einem Zehntel der Kosten gerechnet werden, den eine nachträgliche Motorenumrüstung erfordert; in obigem Beispiel würde eine Serienfertigung eine Reduzierung der Kosten um 12 - 24 Pf/l zur Folge haben. Auch ein

Umbau im Rahmen einer Generalüberholung eines Dieselmotors würde zu einer deutlichen Kosteneinsparung führen.

Die in Tabelle 46 errechneten Gesamtkosten je Liter Rapsöl übersteigen den derzeitigen Preis für versteuerten Dieseldieselkraftstoff von 0,90 DM/l um 10 - 63 %. Bleibt der Mineralölsteueranteil unberücksichtigt (ca. 0,50 DM/l nach STÜRMER 1987 [117]), so entstehen bei Rapsölbetrieb 2,5 - 3,5fach höhere Kosten je Liter Treibstoff als bei Dieselöl.

4.1.2 Kosten für den Motorenbetrieb mit Rapsölester

Rapsölmethylester läßt sich ohne Änderungen an Dieselmotoren als Kraftstoff einsetzen. Neben den Kosten für die Umesterung von Rapsöl ist zusätzlich noch ein höherer Kraftstoffverbrauch zu berücksichtigen.

Pflanzenöle, sowie tierische Öle und Fette werden in der Bundesrepublik Deutschland in industriellem Maßstab (170 000 t/a) nur von der Firma Henkel KGaA, Düsseldorf, umgeestert. Nach Firmenangaben belaufen sich die Kosten dieses Konversionsprozesses unter Berücksichtigung der Kosten des Katalysators und der Erlöse durch das Nebenprodukt Glycerin auf 0,40 DM/kg Rapsöl (= 0,352 DM/l) [13].

Nach Modellrechnungen an verschiedenen Instituten [124, 37] werden für die Umesterung von Rapsöl zu Rapsölmethylester Kosten von 0,20 - 0,50 DM/l errechnet. Diese große Bandbreite ergibt sich durch unterschiedliche Annahmen bei der Zusammenstellung der Anlagen (Kapazität, Nutzungsdauer, Unterhalt) und durch Berücksichtigung der Erlöse aus dem Verkauf des Nebenproduktes Glycerin (bis 3 DM/kg).

Wird Rapsölmethylester als Kraftstoff in Dieselmotoren verwendet, so ist volumetrisch mit einem höheren Verbrauch von 1 - 10 % gegenüber dem Einsatz von Dieselöl zu rechnen (s. Tabelle 8). Somit ergeben sich für den Einsatz von umgeesterten Rapsöl in Motoren die in Tabelle 47 angeführten Gesamtkosten.

Tab. 47: Kraftstoffkosten und Mehrkosten (DM/l) für den Dieselmotorenbetrieb mit Rapsölmethylester

Kosten bzw. Mehrkosten für ...	DM/l
Rapsöl ¹	0,80 - 1,00 (1,79)
Umesterung	0,20 - 0,50
vol. Kraftstoffmehrverbrauch (1 - 10 Vol.-%)	0,01 - 0,10 (0,02 - 0,18)
gesamt	1,01 - 1,60 (2,02 - 2,57)

1) Kosten ohne Verarbeitungsbeihilfe in ()

Kann Rapsöl zu Weltmarktbedingungen bezogen werden, so verursacht der Motorenbetrieb mit Rapsölmethylester Gesamtkosten von 1,01 - 1,60 DM/l. Ohne Verarbeitungsbeihilfe würden bei europäischem Erzeugerpreisniveau für Rapssaat bzw. Rapsöl (Angaben in Kammern) die Kosten je Liter RME 2,02 - 2,57 DM/l betragen.

Die Gesamtkosten je Liter Rapsölmethylester übersteigen den derzeitigen Preis für versteuerten Dieselmotorkraftstoff von ca. 0,90 DM/l um 12 - 77 %. Bleibt der Mineralölsteueranteil unberücksichtigt (ca. 0,50 DM/l nach STÜRMER 1987 [117]), so sind die Kosten je Liter Treibstoff bei Rapsölmethylesterbetrieb 2,5 - 4fach höher als bei Dieselöl.

4.2 Kosten der Verwertung von Rapsöl als Brennstoff

Der Einsatz von Rapsöl als Brennstoff in Ölf Feuerungen mit Zerstäubungsbrennern ist sowohl als Beimischung zu Heizöl EL als auch mit dem reinen Produkt möglich. Durch den Brennstoff Rapsöl und höhere Kosten für den Kauf eines speziellen Ölbrenners ergeben sich Mehrkosten für den Anlagenbetrieb.

Wird Rapsöl dem Heizöl EL nur zu einem Anteil von 20 Vol.-% beigemischt, so kann eine bestehende Ölf Feuerung mit Zerstäubungsbrenner ohne Änderungen betrieben werden. Es entstehen für den Betreiber eines ölbefeuerten Heizkessels keine Ausgaben für eine Umstellung der Anlage.

Da Rapsöl im Vergleich zu Heizöl EL volumenbezogen einen ca. 7 % geringeren Heizwert H_U aufweist, errechnet sich bei vollständiger Verbrennung und unveränderter Anlageneinstellung (Öldurchsatz 1/h) bei 20 % Rapsölbeimischung eine ca. 1,4 % geringere Heizleistung bzw. bei konstanter Heizleistung ein Mehrverbrauch von 1,4 %, bei reinem Rapsölbetrieb von 7 %.

Soll Heizöl EL vollständig durch Rapsöl ersetzt werden, so muß zumindest bis zu einem Leistungsbereich von 100 kW Heizleistung ein Zerstäubungsölbrenner für Heizöl M eingesetzt werden. Der Neupreis eines solchen Brenners beträgt ca. 3.500 DM; das sind etwa 2.000 DM mehr als ein Brenner für Heizöl EL gleicher Leistung kosten würde.

Die Gesamtkosten (DM/l) für die Verfeuerung von Rapsöl mit einem Zerstäubungsölbrenner sind in Tabelle 48 zusammengestellt. Dabei ist ein Heizölpreis von 0,40 DM/l unterstellt.

Tab. 48: Brennstoffkosten und Mehrkosten (DM/l) für den Wärmeerzeugung bei 20 %iger Rapsölbeimischung zu Heizöl und alleinigem Rapsöleinsatz

Kosten bzw. Mehrkosten für ...	Rapsöl 20 %	Rapsöl 100 %
Brennstoff ¹	0,48 - 0,52 (0,68)	0,80 - 1,00 (1,79)
Spezialzerstäubungs-brenner	-	0,02 ²
vol. Brennstoffmehrverbrauch (1,4 bzw. 7 %)	0,01 (0,01)	0,06 - 0,07 (0,13)
gesamt	0,49 - 0,53 (0,69)	0,88 - 1,09 (1,94)

1) Kosten ohne Verarbeitungsbeihilfe in (); 2) Mehrkosten für Ölbrenner 2.000 DM, Nutzungsdauer 15 a, Zinsansatz 8 %/a, Ölverbrauch 10.000 l/a
Eine 20%ige Rapsölbeimischung zu Heizöl El verteuert die Wärmeerzeugung je nach Rapsölpreis um 22 - 33 % (72 %). Ein Anlagenbetrieb mit reinem Rapsöl verursacht rund 2 - 3fach (5fach) höhere Kosten als bei Heizölverbrennung.

4.3 Kosten der Brennstoffbereitstellung und der Wärmeerzeugung aus Rapsstroh

Rapsstroh wurde bisher nicht als Brennstoff zur Wärmeerzeugung verwendet. Im Gegensatz zu den am häufigsten verwendeten Brennstoffen Heizöl und Erdgas entstehen bei der Rapsstrohverbrennung Kosten für die Brennstoffbereitstellung und zusätzliche Kosten für höhere Aufwendungen bei der Anschaffung der Feststoffverbrennungsanlage.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden von KOLLOCH, SCHMITTINGER und ORTMAIER 1987 [54] die Kosten für die Bergung und Lagerung von Getreidestroh ermittelt. Bei gleichen Ernteverfahren und gleich hohen Ernterträgen (4,6 t/ha, bei U = 17 %) entstehen diese Kosten auch für die Bergung und Lagerung von Rapsstroh; da sich innerhalb eines Jahres nur geringe Preissteigerungen ergaben, werden die Werte von KOLLOCH et al. übernommen und durch eigene Berechnungen ergänzt (s. Tabelle 49).

Tab. 49: Kosten der Rapsstrohbergung in DM/t bei einem Strohertrag von 4,6 t/ha (nach KOLLOCH et al. 1987 [54] und eigenen Berechnungen)

Bergeverfahren	HD-Ballen ¹			Rundballen	
Fläche/a (ha)	30 75			75	100
Schlepper-h/a	300	700	700	700	700
Var. Kosten ² DM/t	11,20	11,20	11,20	11,60	11,60
Fixkosten ² DM/t	39,80	35,20	14,20	33,80	19,80
Summe ² DM/t	51,10	46,40	25,40	45,40	31,40
Akh/ha	3,4			2,9	
Lohnkosten ³ DM/t	7,60			6,50	

¹) absätziges Verfahren; ²) Pressen, Beladen des Anhängers, Transport zum Hof, Einlagern; ³) Bruttoarbeitslohn 10,20 DM/h (Lohngruppe 4)

Nach Berechnungen von KOLLOCH et al. betragen die Maschinenkosten für die Rapsstrohbergung rund 46 - 51 DM/t bei HD-Ballen und ca. 31 - 46 DM/t bei Rundballen; bei Berücksichtigung von Lohnkosten erhöhen sich die Beträge um 6 - 8 DM/t. Können nur Rapsstroherträge von ca. 3 t/ha geerntet werden, so steigt der Arbeitszeitbedarf pro Tonne geerntetem Stroh um 5 - 15 %. Die Bergelkosten erhöhen sich ebenfalls um diesen Prozentsatz.

Bis zur Verwertung als Brennstoff muß das Rapsstroh noch gelagert werden. Die kostengünstigste Lagermöglichkeit stellt nach KOLLOCH, SCHMITTINGER und ORTMAIER 1987 [54] die Stapelung im Freien mit Folienabdeckung dar. Wird die Folie zwei Jahre genutzt, so entstehen Kosten von 5 - 10 DM/t Stroh. Bei einer Vollkostenrechnung liegt die Lagermöglichkeit in Altgebäuden in günstigsten Fällen in ähnlicher Höhe; eine Lagerung in Neubäuden ist teurer (20 - 50 DM/t).

Durch die Abfuhr von Rapsstroh werden dem Boden Nährstoffe entzogen. Der Nährstoffwert je Tonne Rapsstroh beträgt ca. 26 DM (Berechnung s. Anhangstabelle 12).

Werden die einzelnen Kostenpositionen addiert, so errechnen sich Beträge für die Bergung und Lagerung von Rapsstroh am Hof von 69 - 135 DM/t (s. Tabelle 50).

Tab. 50: Kosten der Brennstoffbereitstellung und Lagerung bei Rapsstroh

Kosten für	DM/t
Strohbergung	38 - 59
Strohlagerung	5 - 50
Nährstoffausgleich	26
gesamt	69 - 135

Werden diese Kosten auf die im Rapsstroh enthaltene Energie bezogen, so ergibt sich ein Betrag von 1,8 - 3,6 Pf/kWh⁵. Bei Berge- und Lagerkosten von 135 DM/t würde der Heizöläquivalenzpreis 36 Pf/l betragen.

Ein Vergleich mit den festen Heizmaterialien Holz und Kohle zeigt, daß Rapsstroh teilweise preisgünstiger zur Verfügung gestellt werden kann. Bei einem Raummeterpreis von 30 - 50 DM betragen die spezifischen Brennstoffkosten für Holz 2,5 - 4,1 Pf/kWh und bei Ruhr-Steinkohle 3,1 Pf/kWh bei einem Preis von 253 DM/t [116, 126].

⁵) Die Bezugsgröße "kWh" ermöglicht einen Vergleich des spezifischen Preises von gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffen. 1 l Heizöl EL entspricht 10 kWh bzw. 36 MJ.

Neben den Berge- und Lagerkosten fallen bei der Wärmeerzeugung aus Rapsstroh Mehrkosten bei der Erstellung der Anlage gegenüber einer Verwendung von Heizöl an. Ohne Berücksichtigung der Aufwendungen für den Brennstoff können die Jahreskosten, bedingt durch die höheren Anfangsinvestitionen und eine kürzere Nutzungsdauer einer Strohfeuerung (10 Jahre) den Betrag für eine Ölfeuerung bei einer Nennwärmeleistung von 50 kW um den Faktor 5 - 10 übersteigen (s. Tabelle 51). Mit steigender Anlagengröße tritt eine deutliche Kostendegression ein. Je nach Anlagengröße und Wärmebedarf errechnen sich gegenüber einer Ölfeuerung Mehrkosten von 2,6 - 13,6 Pf/kWh.

Tab. 51: Investitionsaufwand und Kosten für die Wärmeerzeugung aus Rapsstroh und Heizöl (nach KOLLOCH 1987 [54])

Wärmeleistung (kW) Energiebedarf (kWh/a)	50 100 000				100 200 000			
	HD/man	HD/aut	RB/aut	Öl	HD/man	HD/aut	RB/aut	Öl
Gesamtinvestition (DM)	44 500	56 000	80 000	12 000	60 500	66 000	88 000	19 200
Jahreskosten (DM) ¹	7 788	10 640	15 200	1 640	10 588	12 540	16 720	2 625
Kosten der Energieerzeugung (Pf/kWh)	7,79	10,64	15,20	1,64	3,89	6,27	8,36	1,31
Mehrkosten gegenüber Ölfeuerung (Pf/kWh)	6,15	9,00	13,56	-	2,58	4,96	7,05	-

HD = Hochdruckballen; RB = Rundballen; man = manuelle Beschickung; aut = automatische Beschickung; ¹) Stroh Kosten 17,5 % p.a., Nutzung 10 a; Öl Kosten 13,67 % p.a., Nutzung 15 a

Die Gesamtkosten für die Wärmeerzeugung aus Rapsstroh sind der Tabelle 52 zu entnehmen.

Tab. 52: Gesamtkosten für die Wärmeerzeugung aus Rapsstroh

Kosten bzw. Mehrkosten für ...	Pf/kWh
Brennstoffbereitstellung	1,8 - 3,6
Feuerungsanlage	3,9 - 15,2
Brennstoffverbrauch wegen geringerem Anlagenwirkungsgrad (ca. 20 %)	0,4 - 0,7
gesamt	6,1 - 19,5

Für die Wärmebereitstellung durch die Rapsstrohverfeuerung in den in Tabelle 51 unterstellten Anlagen errechnen sich Gesamtkosten von 6,1 - 19,5 Pf/kWh. Dabei ist keine Entlohnung der eingesetzten Arbeitskräfte für die Bedienung und Wartung der Anlage berücksichtigt.

Da für die Holz- und Kohleverbrennung ähnliche Anlagen wie für die Strohverfeuerung erforderlich sind, muß mit vergleichbaren Wärmeerzeugungskosten wie bei Rapsstroh gerechnet werden. Bei der Wärmeerzeugung mit einer ölbefeuerten Anlage würden die Kosten bei einem Heizölpreis von 0,40 DM/l (= 4,0 Pf/kWh) 5,3 - 5,7 Pf/kWh betragen.

Auch bei automatisch beschickten Anlagen mit 500 - 1 000 kW Wärmeleistung errechnet KOLLOCH Gesamtkosten von 30 - 40 Pf/l Heizöläquivalent (ohne Arbeitskosten). Bei dem derzeitigen Energiepreisniveau für Heizöl (ca. 40 Pf/l) sind auch Strohverfeuerungen großer Heizleistung nicht kostendeckend mit Rapsstroh zu betreiben.

Bei den momentanen Preis-Kosten-Verhältnissen verursacht die Wärmeerzeugung aus Rapsstroh höhere Kosten im Vergleich zum Heizöleinsatz. Je nach Anlagenart und -größe könnte erst ab einem Heizölpreis von 0,60 DM/l ein positiver monetärer Verfahrensbeitrag aus der Rapsstrohnutzung erzielt werden.

4.4 Kosten der Rapsstrohbrikettierung

Über die Kosten der Brikettierung von Getreidestroh liegen Angaben von mehreren Autoren vor. Bei 400 kg/h Durchsatzleistung und einer Anlagenauslastung von 1 500 Stunden pro Jahr errechnete BEWER 1983 [11] Kosten von 130 - 260 DM/t Briketts. Bei gleicher Jahresauslastung und Stundenleistungen von 150 - 450 kg ergaben sich nach KOLLOCH, SCHMITTINGER und ORTMAIER 1987 [54] Kosten von 120 - 190 DM/t.

Für die Brikettierung von Rapsstroh liegen keine Kostenberechnungen vor. Bei niedrigerem bis gleichem spezifischen Energieaufwand und vergleichbarer Brikettdichte können bei der Briket-

tierung von Rapsstroh 25 - 35 % höhere Durchsatzleistungen erzielt werden (s. Kap. 3.4). Nach den Kalkulationsdaten von KOLLOCH et al. ergibt sich dadurch eine Reduzierung der Verdichtungskosten von 15 - 20 %; die Brikettierungskosten belaufen sich damit bei Rapsstroh auf 100 - 170 DM/t. Werden zu diesen Beträgen noch die Berge- und Lagerkosten für das Rapsstroh hinzugerechnet, so betragen die Gesamtkosten unter günstigen Voraussetzungen 168 DM/t und unter ungünstigen Bedingungen 305 DM/t Briketts. Durch diese Aufbereitung des Stroh erhöhten sich die Brennstoffkosten je kWh um 2,6 - 4,5 Pfennige; die gesamten Produktionskosten betragen 4,4 - 8,0 Pf/kWh. Das entspricht einem Heizöläquivalenzpreis von 44 - 80 Pf/l. Mit Rapsstrohbriketts sind die festen Heizmaterialien Holz und Kohle substituierbar. Bei einem Raummeterpreis für Holz von 30 - 50 DM betragen die spezifischen Brennstoffkosten 2,5 - 4,1 Pf/kWh und bei Ruhr-Steinkohle 3,1 Pf/kWh bei einem Preis von 253 DM/t [126]. Auch unter sehr günstigen Bedingungen ist der brikettierte Halmgutbrennstoff 7 - 70 % teurer als Brennholz bzw. 40 % teurer als deutsche Steinkohle.

Mit Strohbricketts werden nahezu ausschließlich die Brennstoffe Holz und Kohle substituiert, wie eine Befragung von Kunden einer Brikettieranlage ergab [54]. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Strohbricketts in einer bestehenden Feststofffeuerung verbrannt wurden oder werden und somit bei bereits vorhandener Feuerstätte neben der Brennstoffbeschaffung keine sonstigen Kosten anfallen.

Hinzu kommt - wie die Versuchsergebnisse zeigen, daß bei den getesteten Holz- und Kohleverbrennungsanlagen ein alleiniger Betrieb mit Rapsstrohbriketts nicht mit ausreichender Feuerungsqualität möglich ist. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Rapsstrohbriketts nur in Beimischung zu dem vom Feuerungsanlagenhersteller vorgeschriebenen Brennstoff möglich.

5. Weiterführende Arbeiten

Das vorangegangene Kapitel verdeutlicht, daß unter derzeitigen Preisverhältnissen auf dem Energiemarkt die Energiegewinnung aus Rapsöl und Rapsstroh nicht wirtschaftlich ist. Dennoch sollte das Verfahren als eine Möglichkeit zur Agrarmarktentlastung in der Europäischen Gemeinschaft betrachtet werden, da es unter dem Aspekt der Umweltverträglichkeit günstig zu bewerten ist (Aufbereitung, CO₂- und SO₂-Emission) und durch die Umlenkung von eingesparten Marktordnungsausgaben für den Getreideexport an Konkurrenzkraft gewinnen könnte.

Um den Erkenntnisstand zum Energieträgerproduktionsverfahren Rapsanbau sowie zur Verwertung der einzelnen Produkte zu vervollständigen, das Verfahren zu verbessern und auf diese Weise die Kosten zu verringern, sind noch auf verschiedenen Fachgebieten Untersuchungen notwendig und Weiterentwicklungen einzuleiten.

Bezüglich des Energieträgers Rapsöl ist ein Hauptziel der Pflanzenzüchtung in der Erhöhung der Ölerträge zu sehen. Da ernährungsphysiologische Aspekte für die Verwendung als Kraftstoff bedeutungslos sind, ist die Fettsäurezusammensetzung erst ein nachgeordnetes Ziel; zur Verringerung der Viskosität und Verbesserung der Lagereigenschaften wären möglichst kurzkettige gesättigte Fettsäuren anzustreben. Eine "Energierapsorte" sollte sich deutlich von Sorten für den Nahrungsmittelsektor abheben, um den Ruf des Nahrungsmittels nicht negativ zu beeinflussen und eine getrennte Handhabung des Speise- und des "Energieöls" zu ermöglichen. Bei Rapsstroh wäre eine Erhöhung und Stabilisierung der Erträge als Aufgabe für die Pflanzenzüchtung erforderlich.

Die Erprobung von speziellen Motoren hat erst begonnen. Ebenso wie beim Einsatz von Rapsöl als Brennstoff ist dazu eine Langzeiterprobung mit mehreren Geräten notwendig.

Die Verwendung von unterschiedlich aufbereitetem Rapsöl im Rahmen der Dauerversuche könnte Aufschluß über den erforderlichen

Raffinationsgrad liefern. Aus diesen Erkenntnissen müßte ein Standard für "Rapsölkraftstoffe" abgeleitet werden.

Da heute der Beeinträchtigung der Umwelt durch neue Produkte und Stoffe verstärkte Aufmerksamkeit zuteil wird, sollte im Rahmen der Praxisversuche auch eine Analyse der bei der Rapsölverwendung erzeugten Abgaskomponenten durchgeführt werden. Dabei ist vor allem auch das Spektrum der Kohlenwasserstoffe besonders auf karzinogene Substanzen zu untersuchen und mit den Werten zu vergleichen, wie sie beim Einsatz fossiler Kraftstoffe entstehen. Ebenso sollten diese Messungen an rapsstrohbefeuerten Feststofffeuerungsanlagen erfolgen.

Neben der Verwertung von Rapsöl zu Energiezwecken werden weitere Einsatzmöglichkeiten im technischen Bereich gesucht. Auf der Basis von Rapsöl als Grundstoff werden Schmierstoffe, Hydrauliköle und in Kürze auch Getriebeöle auf dem Markt angeboten. Die sehr schnelle biologische Abbaubarkeit dieser Produkte beim Eindringen in den Boden ist als deren Hauptvorteil zu nennen. Häufig existieren für diese Produkte noch keine Langzeiterfahrungen über mehrere Jahre in der Praxis. Neben der Dauererprobung müssen bei den Schmierölen vor allem deren Kontamination mit Schwermetallen untersucht und Richtlinien zur Entsorgung dieser Produkte erarbeitet werden.

6. Zusammenfassung

Stetig ansteigende Marktordnungskosten sind der Grund für die Suche nach Produktionsalternativen für die Landwirtschaft der Europäischen Gemeinschaft. Die Produktion von Energieträgern wird als eine Möglichkeit zur Verringerung der Nahrungsmittelherzeugung angesehen. Auf rund 10 Mio. ha als überschüssig geltender Agrarfläche der EG könnten unter günstigen Voraussetzungen jedoch nur knapp 7 % des Mineralölbedarfs gedeckt werden; folglich stellt sich der Energiebereich als nicht zu sättigender Absatzmarkt dar. Die Schonung fossiler Energieträger und eine Verringerung des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre sprechen ebenfalls für die Aufnahme der Energieerzeugung aus Biomasse.

Das Ziel der Arbeit war daher, Erkenntnisse über das Produktionsverfahren Rapsanbau zur Energieerzeugung aus Rapsöl und Rapsstroh zu gewinnen. Während dabei für den Energieträger Rapsöl auf Literatur zurückgegriffen werden konnte, fehlten Kenntnisse über Rapsstroh weitgehend und mußten hauptsächlich auf experimentellem Weg erworben werden.

Rapsöl erfüllt in fünf Punkten die Anforderungen der DIN-Norm für Dieselkraftstoffe nicht. Die um den Faktor 10 höhere Viskosität (70 - 80 mm²/s), die 5 - 10 Punkte unter dem Mindestwert von 45 liegende Cetanzahl und der zwei- bis dreifach höhere Koksrückstand (0,2 - 0,3 %) lassen Probleme bei der Verwendung als Kraftstoff erwarten. Dichte und Grenzwert der Filtrierbarkeit überschreiten die Normwerte für Dieselöl.

Durch eine Umesterung von Rapsöl können mit Ausnahme der Dichte die Normanforderungen erfüllt werden. Der Grenzwert der Filtrierbarkeit wird jeweils nur für die Sommermonate eingehalten. Die Geruchsneutralität, die hohen Flammttemperaturen, die gute biologische Abbaubarkeit und der geringe Schwefelgehalt (10 - 500 ppm) sprechen für die Verwendung der Pflanzenölkraftstoffe.

Heute übliche Dieselmotoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung sind für einen längerfristigen Betrieb mit Rapsöl nicht geeignet. Es bilden sich Ablagerungen an Motorenbauteilen, die schnell zu Betriebsstörungen und übermäßigem Motorenver-

schleiß führen. Mit Vorkammer-Dieselmotoren größeren Hubvolumens ist ein problemloser Pflanzenölbetrieb über mehrere tausend Betriebsstunden nachgewiesen. Im Vergleich zu Dieselbetrieb bleibt die maximale Motorleistung nahezu konstant, der spezifische Kraftstoffverbrauch steigt aufgrund des geringeren Energiegehaltes von Rapsöl (gewichtsbezogen ca. 15 %) um 10 - 30 %. Mit dem direkteinspritzenden Elsbett-Dieselmotor bzw. der Möglichkeit einer entsprechenden Umrüstung von Serienmotoren könnten Vorteile wie Pflanzenöлтаuglichkeit und geringerer Kraftstoffverbrauch gegenüber Vorkammer-Dieselmotoren genutzt werden; Praxiserfahrungen mit einer größeren Anzahl von Motoren stehen noch aus.

Umgeestertes Rapsöl kann in Dieselmotoren auch derzeit schon verwendet werden. Änderungen der maximalen Motorleistung bewegen sich 5 - 10 % über und unter den Vergleichswerten mit Dieselbetrieb. Trotz der Erhöhung des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs um bis zu 17 % bleibt der maximale Motorwirkungsgrad unverändert bzw. erhöht sich geringfügig. Schmierölverdünnungen und Schmierölreaktionen mit dem Esterkraftstoff erweisen sich derzeit noch als ungelöste Probleme, die weitere Forschungsaktivitäten notwendig erscheinen lassen.

Bei Prüfstandsversuchen an zwei Instituten mit Rapsölmethylester als Kraftstoff in Dieselmotoren konnte gegenüber dem Dieselölbetrieb eine Abnahme folgender Schadstoffe nachgewiesen werden: Kohlenmonoxid (8 - 18 %), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (11 - 46 %), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (5 - 57 %), Partikelaustritt (3 - 25 %); der Stickoxidanteil erhöhte sich jedoch um 13 - 29 %.

Die DIN-Anforderungen für Heizöl EL erfüllt Rapsöl in vier Punkten nicht. Mit einer Dichte von 0,92 kg/l übertrifft das Pflanzenöl den Norm-Höchstwert um etwa 7 % und weist mit 35,8 - 37,4 MJ/kg einen 11 - 15 % zu geringen Heizwert auf. Die Viskosität und der Koksrückstand überschreiten bei Rapsöl als Brennstoff die vorgegebenen Grenzwerte um das zwölf- bzw. das dreifache.

Trotz der Abweichungen von den Normwerten läßt sich ein Gemisch von Rapsöl und Heizöl EL bis zu einem Mischungsverhältnis von 1 : 1 in Zerstäubungsbrennern für Heizöl EL gut verbrennen. Um Ablagerungen im Kesselraum zu vermeiden, kann je nach Kesselkonstruktion eine Reduzierung des Rapsölanteils bis auf 20 % notwendig werden. Ein Gemisch aus Rapsöl und Diesel- bzw. Heizöl bleibt homogen. In reiner Form konnte Rapsöl mit einem Brenner für "mittelschweres" Heizöl M und Brennstoffvorwärmung auf 90 - 100 °C verbrannt werden. Bei allen Versuchen konnten mit 12 - 13 Vol.-% CO₂-Gehalte wie bei Heizölverwendung erreicht werden.

Für die Verwertung von Rapsstroh als Energieträger sind für den Energieertrag die Rapsstrohmengen und deren Heizwert, für die Energieumsetzung jedoch das Trocknungsverhalten, der Ernteertrag und die Verbrennung von Bedeutung.

Die Auswertung von Sortenvergleichsversuchen im Parzellenanbau aus drei Anbaujahren mittels Varianzanalyse zeigten einen statistisch abgesicherten Sorten- und Jahreseinfluß sowohl auf den Stroh- als auch auf den Kornertrag. Im dreijährigen Durchschnitt ergab sich ein Rapsstrohertrag von 75,0 dt TS/ha (s = 8,7 dt TS/ha, B = 0,86). Die ertragsstarken Rapsorten (BELINDA, KORINA, LIRAKOTA) übertrafen diesen Wert im Mittel um 9 - 16 %. Mit Ausnahme der Sorte JET NEUF korreliert ein hoher Strohertrag mit einem hohen Kornertrag. Der dreijährige Korndurchschnittsertrag von 28,9 dt TS/ha (s = 2,2 dt TS/ha, B = 0,94) aller acht Sorten lag 10 - 18 % unter dem Durchschnittswert der vier besten Rapsorten (LIRAKOTA, BELINDA, JET NEUF, KORINA).

Der Einfluß des Erntejahres auf die Erträge von Rapsstroh und Rapskorn war statistisch hoch signifikant abzusichern (P = 99,9 %). 1983 wurde im Durchschnitt aller Sorten ein Strohertrag von 104 dt TS/ha und 1986 von nur 60 dt TS/ha erreicht. Mit 40 dt TS/ha 1985 und nur 21,9 dt TS/ha 1983 schwankte der Rapskornertrag um den dreijährigen Durchschnittswert um bis zu 40 % ebenso wie beim Strohertrag.

In den einzelnen Erntejahren errechnete sich ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1 : 1,73 bis 1 : 5,07. Diese hoch signifikanten Unterschiede ($P = 99,9 \%$) machen eine Ertragsbestimmung nur über die Kornertragsermittlung nicht möglich. Kornertragsstarke Rapsorten weisen ein geringeres Korn-Stroh-Verhältnis auf als ertragsschwächere Sorten.

Die in den Erntejahren 1985 und 1986 in acht Praxisbeständen ermittelten mittleren Rapsstroherträge von 55 und 38 dt TS/ha waren 24 bzw. 36 % niedriger als bei den Parzellenversuchen.

Der mittlere Heizwert $H_{U(wf)}$ der wasserfreien Substanz von Rapsstroh aus allen Untersuchungen ($n = 30$) ergab einen Wert von 17 035 kJ/kg. Statistisch konnte kein Einfluß von Standort und Rapsorte auf den Heizwert nachgewiesen werden. Ein Heizwertunterschied zwischen zwei Erntejahren war statistisch gesichert nachweisbar ($P = 95 \%$).

Bezogen auf die mittleren Rapsstroherträge aus den Parzellenversuchen von 75 dt TS/ha errechnet sich ein Energieertrag von 127,5 GJ/ha; entsprechend den Stroherträgen aus den Praxisversuchen von 55 und 38 dt TS/ha reduziert sich der Energieertrag auf 93,5 GJ/ha bzw. 64,6 GJ/ha.

Zum Zeitpunkt des Korndruschs weist Rapsstroh einen Feuchtegehalt von 50 - 65 % auf. Als Grundlage für die Trocknung von Rapsstroh wurden deren Sorptionsisothermen bestimmt. Mittels einer Exponentialfunktion ließen sich die Meßpunkte für die Gleichgewichtsfeuchte im Bereich von 20 - 85 % relativer Luftfeuchtigkeit am besten beschreiben. Bei 80 % relativer Luftfeuchtigkeit errechnet sich ein Feuchtegleichgewicht von 17 - 19 %. Um eine Trocknung von Rapsstroh im Schwad auf diese Werte zu erreichen, sind bei guter Witterung etwa zwei Tage Trocknungsdauer notwendig.

Mit Ladewagen und Ballenpressen konnten ohne erntegutbedingte Störungen 46 - 85 % der vom Mähdescher erfaßten Rapsstrohmen gen geerntet werden. Die Erträge lagen bei 24 - 38 dt TS/ha. Berechnungen mit einem Arbeitszeitkalkulationsprogramm zur Strohbergung ergaben bei einem Ertrag von 24 dt TS/ha in Abhän-

gigkeit vom Bergeverfahren einen 10 - 27 % höheren spezifischen Arbeitszeitbedarf als bei einem Ertrag von 38 dt TS/ha.

Zur Wärmeerzeugung wurde Rapsstroh in Ballenform und als Brikkett verfeuert. Im Vergleich zu Getreidestroh kann bei der Brikkettierung von Rapsstroh eine Steigerung der Durchsatzleistung von 50 - 70 % erreicht werden. Je nach Anlagenart reduziert sich dabei der spezifische Energieverbrauch um 20 - 40 %.

Aufgrund seiner großen Oberfläche brennt Rapsstroh schneller ab als Holz- oder Getreidestrohbrennstoffe. Durch die hohe Abbrandgeschwindigkeit ergab sich bei fast allen Verbrennungsvorversuchen ein höherer CO-Gehalt und eine höhere Staubemission als bei den vom Hersteller vorgeschriebenen Brennstoffen. Um bei der Verfeuerung von Rapsstroh die gesetzlichen Bestimmungen einhalten zu können, müßte bei den Verbrennungsanlagen ein besserer Schwelgasausbrand und eine wirksamere Staubabscheidung erreicht werden. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, daß diese Vorgaben bei Anlagen mit unterem Brennstoffabbrand und Heizleistungen über 20 kW ohne größeren konstruktiven Aufwand zu verwirklichen sind.

Bei rapsölbetriebenen Dieselmotoren ist in Abhängigkeit von den Umrüstkosten, der Motorauslastung, dem Kraftstoffmehrerverbrauch und dem Preis für Rapsöl (0,80 - 1,00 DM/l) mit 10 - 70 % höheren Betriebskosten als bei Dieselöl zu rechnen. Bei der Kraftstoffanpassung an herkömmliche Dieselmotoren durch Rapsölmesterung ergeben sich Mehrkosten in ähnlicher Höhe. Eine 20%ige Rapsölbeimischung zu Heizöl verteuert die Wärmeerzeugung um 22 - 33 %; reiner Rapsölbetrieb verdoppelt bzw. verdreifacht die Kosten.

Für die Bergung, Lagerung und Verfeuerung von Rapsstroh in großen Wärmeerzeugungsanlagen (>500 kW) entstehen Gesamtkosten von 0,30 - 0,40 DM/l Heizöläquivalent. Bei kleineren Anlagen ist mit deutlich höheren Kosten zu rechnen.

Bei derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen ist die Energieträgerproduktion aus der Rapspflanze erst bei sehr hohen Preissteigerungen für fossile Kraft- und Brennstoffe zu erwarten.

7. Literatur

1. Achilles, A.: Brikettierung von Halmfutter in Strangpressen. - In: KTBL-Schrift 192, 1975
2. Agst, J.: Die Brennstoffe. München 1982
3. Amberger, A.: Pflanzenernährung. Stuttgart 1979
4. Anjou, K.: Manufacture of Rapeseed Oil and Meal. - In: Rapeseed, Amsterdam 1972
5. Apfelbeck, R.: Einsatz von Pflanzenöl in Verbrennungsmotoren und Heizanlagen in der Landwirtschaft. Zwischenbericht zu Untersuchungsvorhaben, Mai 1987
6. Appelqvist, L.-A.; R. Ohlson: Rapeseed Cultivation, Composition, Processing and Utilization. - In: Rapeseed, Amsterdam 1972
7. Bacon, D.M.; F. Brear; I.D. Moncrieff; K.L. Walker: The Use of Vegetable Oils in Straight and Modified Form as Diesel Engine Fuels. - In: Proceedings of 3rd International Conference on Energy Use Management, Berlin 1981
8. Batel, W.; M. Graef; G.-J. Mejer; P. Schoedder; G. Vellguth: Äthanol aus nachwachsenden Rohstoffen als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge. - In: Grundlagen der Landtechnik, Bd. 31, Nr. 4, 1981
9. Becker, M.; Nehring: Handbuch der Futtermittel, Bd. 2. Berlin 1965
10. Bek-Nielsen, B.: Quality Preservation and Testing of Malaysian Palm Oil from Fresh Fruit Bunches to the Oil Refinery. - In: Oleagineux, Vol. 32 (10), p. 437 - 441, 1977
11. Bewer, E.: Technische Daten und Betriebserfahrungen zur Herstellung von Strohriketts. - In: Agrartechnische Berichte, Institut für Agrartechnik und Landesanstalt für landwirtschaftliche Maschinen und Bauwesen, Hohenheim 1983
12. Blackburn, J.H.; R. Pinchin; J.I.T. Nobre et al.: Performance of Lubricating Oils in Vegetable Oil Ester-Fuelled Diesel Engines. - In: Proceedings of International Off-Highway Meeting & Exposition, Milwaukee, Wisconsin 1983
13. BML: Ergebnisprotokoll des Fachgespräches: "Pflanzenöлтаuglicher Diesel-Motor" vom 24.09.1987
14. BML: Agrarbericht: Agrar- und ernährungspolitischer Bericht der Bundesregierung. Bonn, verschiedene Jahrgänge
15. Bundesminister des Innern: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA-Luft) vom 27.2.1986. - In: Gemeinsames Ministerialblatt, 37. Jg., Nr. 7, 1986
16. Burkhalter, J.P.: Crude Oil Handling and Storage. - In: Journal of the American Oil Chemists' Society, Vol. 53, No. 1, p. 332 - 333, 1976

17. Chomyszyn, M.: Rapsstroh als Futter für Wiederkäuer. - In: Arch. Tierernährung, Bd. 30, Berlin 1980
18. Christen, H.R.: Chemie. Aarau 1977
19. Deibert, E.J.; D. Lizotte: Soil Applications of Sunflower Meal as Potential Fertilizer Sources. - In: North Dakota Farm Research, Vol. 39, No. 6, 1982
20. Deutscher Wetterdienst - AMBF Weißenstephan: Agrarmeteorologische Monatsberichte und Tageswerte für die entsprechenden Trocknungstage. Monatsberichte 1984, 1985, 1986
21. DLG: DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer. Frankfurt/M. 1982
22. DLG: Bericht über Technische Untersuchungen nach dem O.E.C.D. STANDARD CODE Ackerschlepper DEUTZ D 4507, 1980
23. DLG-Manuskript: Chancen für Produktion und Verwendung pflanzlicher Öle. Ergebnisse eines Podiumsgesprächs im Rahmen der DLG-Wintertagung, 14.1.1988, Wiesbaden 1988
24. Dokumentation der Universität Hohenheim: Nährstoff- und Mineralstoffgehalt bei Raps. Hohenheim 1987 und 1988
25. Du Plessis, L.M.: Plant Oils as Diesel Fuel Extenders: Stability Tests and Specifications on Different Grades of Sunflower Seed and Soyabean Oils. - In: Chensa, Nov. 1982
26. Eggert, O.: Brikettierung von Stroh zur Wärmeerzeugung. - In: KTBL-Arbeitspapier 88, 1984
27. Elsbett, L.; G. Elsbett; K. Elsbett; M. Behrens: Alternative Fuels on a Small High Speed Turbocharged d. i. Diesel Engine. - In: ASAE Technical Paper Series; The Engineering Resource for Advancing Mobility 830556; Intern. Congress & Exposition, Detroit, Michigan, Feb. 28 - March 4, 1983
28. Engeln, H.: Umweltgeschichte im Gletschereis. Kann der Treibhauseffekt nach anfänglicher Erwärmung zu einer Verlagerung des Golfstroms und so zu einem Temperatursturz in Europa führen?. - In: Die Zeit, Nr. 15, 8. April 1988
29. Feustel, J.E.; S. Salm; W. Sommer: Experimentalsprogramm zur Hochdruckverdichtung pflanzlicher Reststoffe. Forschungsbericht MAN, Neue Technologie, 1979
30. Fuls, J.: The Sunflower Option to a Diesel Fuel Substitute. - In: Proceedings of S.A.I.C.H.E. evening symposium "Diesel Fuel for S.A. - Some Answers", June 29, 1983
31. Fuls, J.; C.S. Hawkins; F.J.C. Hugo: Tractor Engine Performance on Sunflower Oil Fuel. - In: Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 30, p. 29 - 35, 1984
32. Geoffroy, M.; J.B. Smith; J.B. Blackburn et al.: Esters as a Future Diesel Fuel: An Initial Assessment. - In: Proceedings of 5th International Alcohol Fuel Technology Symposium, Vol. II, Dunedin 1982

33. German, T.J.; K.R. Kaufman; G.L Pratt; J. Derry: Field Endurance Test of Diesel Engines Fueled with Sunflower Oil/Diesel Fuel Blends. - In: SAE Technical Paper Series, Nr. 850239, 1985
34. Geyer, S.M.; M.J. Jacobus; S.S. Lestz: Comparison of Diesel Engine Performance and Emissions from Neat and Transesterified Vegetable Oils. -In: Transactions of the ASAE, Vol. 27, No. 2, p. 375 - 381 and 384, 1984
35. Goering, C.E; A.W. Schwab; M.J. Daugherty u.a.: Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils. - In: Transactions of the ASAE, Vol. 25, No. 6, 1982
36. Götzke, H.: Wirtschaftliche Aspekte der Verwendung von Pflanzenölen als Energieträger bei rohstoffnaher oder zentraler Saatenverarbeitung. - In: Landbauforschung Völkenrode, 36. Jg., H. 1, 1986
37. Götzke, H.; W. Kleinhanß: Produktion von Rapsöl als Treibstoff - Eine Chance für die deutsche Landwirtschaft? - In: Landbauforschung Völkenrode, 38. Jg. (1988), Heft 1
38. Grassi, G.; B. Delmon; J.-F. Molle; H. Zibetta: Biomass for Energy and Industrie. London 1987
39. Guibet, J.C.: L'Utilisation des Huiles Vegetales et de Leurs Derives comme Carburants Diesel. - In: FAO/CNRE Second Technical Consultation of the CNRE on Liquid Fuels from Biomass, Saint Rémy les Chevreuse 1987
40. Gumz, W.; L. Hardt: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. Berlin, Göttingen 1962
41. Hawkins, C.S.; J. Fuls: Comparative Combustion Studies on Various Plant Oil Esters and the Long Term Effects of an Ethyl Ester on a Compression Ignition Engine. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
42. Heger; Rudolf; Berna: Feuerungs- und anwendungstechnische Untersuchungen von HL-Rapsölmischungen. Brennstoffprüfung, Bericht 014/88/R0 der ÖMV Aktiengesellschaft, Wien 1988
43. Heidrich, E.; R. Schäfer: Einfluß und Nutzung von Biomasse als Energieträger auf die arbeitswirtschaftliche Lage, die Energiesituation und die Agrarmarktprobleme der Europäischen Gemeinschaften. Endbericht zum Vorhaben ESE-R-065-D (B) Studie1/1, Freising/ Weihestephan 1984
44. Heiss, R.: Haltbarkeit und Sorptionsverhalten wasserarmer Lebensmittel. Berlin 1968
45. Heizanlagen-Verordnung - HeizAnlV: Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Brauchwasseranlagen vom 24. Februar 1982 - In: Bundesgesetzblatt, Jg. 1982, Teil I, 1982
46. Hellwig, M.: Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe. Dissertation, Freising/Weihestephan 1988
47. Hofstetter, E.-M.: Feuerungstechnische Kenngrößen von Getreidestroh. Dissertation, Freising/ Weihestephan 1978

48. Johansson, E; O. Nordström: Swedish Tests on Rape-Seed Oil as an Alternative to Diesel Fuel. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
49. Kamm, K.; K.-H. Röhm: Verbrennen von Strohbricketts Ermittlung von Emissionsfaktoren bei der Verbrennung von Strohbricketts in Zentralheizungsanlagen (+ Anlagenband). Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 1984
50. Kaufman, K.R.; T.J. German; G.L. Pratt; J. Derry: Field Evaluation of Sunflower Oil/Diesel Fuel Blends in Diesel Engines. - In: Transactions of the ASAE, Vol. 29, No. 1, p. 2 - 9, 1986
51. Kaufman, K.R.; M. Ziejewski; M. Morohl; A.E. Jones: Sunflower Oil and Methyl Ester as Fuels for Diesel Engines. - In: Proceedings of 3rd International Conference on Energy Use Management, Berlin 1981
52. Kaufman, K.R.; M. Ziejewski: Sunflower Methyl Ester for Direct Injected Diesel Engines. - In: Transactions of the ASAE, Vol. 27, No. 6, p. 1626 - 1633, 1984
53. Kjellerup, V.: Halmfydingsaskens indhold af plantenaeringsstoffer. - In: Statens Planteavlfsforsog Meddelelse, Nr. 171085, Argang 24, 1983
54. Kolloch, P.; B. Schmittinger; E. Ortmaier: Wirtschaftlichkeit verschiedener Verfahren der Herstellung von Preßlingen aus Stroh, Restholz, Sägewerksabfällen, Papier, etc., sowie Rohstoffgemischen zur Verfeuerung. BMFT-Endbericht: Kommission der Forschungsvorhaben 03E-8422-A, Weihenstephan 1987
55. Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Die Lage der Landwirtschaft in der Gemeinschaft. Bericht 1986, Brüssel, Luxemburg 1987
56. Korus, R.A.; T.L. Mousetis; L. Lloyd: Polymerisation of Vegetable Oils. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
57. Krischer, O.; K. Kröll: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin 1956
58. Kurucz, E.; J. Peredi: Über den Isothiocyanat (ITC)- und Vinylthiooxazolidon (VIO)-Gehalt der ungarischen Rapsschrote. - In: Proceedings des 4. Internationalen Rapskongresses, Gießen 4. - 8. Juni 1974
59. Kusy, P.F.: Transesterification of Vegetable Oils for Fuel. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
60. Lehmann, D.: Verlustvorgänge und Schimmelbildung bei der Trocknung und Lagerung von Halmfutter. - In: Landtechn. Forschung Bd. 19, H. 5/6, S. 180 - 187, 1971
61. Lennerts, L.: Ölschrote, Ölkuchen, pflanzliche Öle und Fette. Herkunft, Gewinnung und Verwendung. Hannover 1984
62. Lindsay, R.; B. A. L. Crichton; R. Pinchin: Experience with Lubricants for High Speed Diesel Engines Using Vegetable Oil Derived Fuels. - In: Proceedings of International Off-Highway Meeting & Exposition, Milwaukee, Wisconsin 1983

63. Marx, E.: Emissionsminderung bei der Hausheizung. - In: Wärmertechnik 4, 32. Jg., 1987
64. McCutchen, R.: Vegetable Oil as a Diesel Fuel - Soyabean Oil. - In: Proceedings of 3rd International Conference on Energy Use Management, Berlin 1981
65. Mittelbach, M.; P. Tritthart; H. Junek: Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils, II: Emission Tests Using Rape Oil Methyl Ester. - In: Energy in Agriculture, No. 4, S. 207 - 215, Amsterdam 1985
66. Mittelbach, M.; M. Wörgetter; J. Pernkopf; H. Junek: Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils: Preparation and Use of Rape Oil Methyl Ester. - In: Energy in Agriculture, No. 2, p. 369 - 384, Amsterdam 1983
67. Mittelbach, M.: Pflanzenöl für Dieselmotoren. Endbericht des Instituts für Umweltforschung in der Forschungsgesellschaft Joanneum, Graz 1984
68. Motschmann, K.: Aufzeichnungsprotokolle zur Verfeuerung von Rapsöl mit einem Ölbrenner. Unveröffentlichte Aufzeichnungen, 1988
69. N.N.: Wer erzwingt den Markt für emissionsarme Heizkessel? - In: IKZ-Haustechnik 3, 1987
70. N.N.: Rapsöl als Traktorenkraftstoff. Vorläufige Versuchsergebnisse (vertraulich), Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 1979
71. N.N.: Rapsdrusch vom Stengel bringt mehr. - In: top agrar 6/1986
72. O'Dogherty, M.J.; J.A. Wheeler; K. Clements: The Effect of Moisture Content, Die Charge and Rate of Loading on the Compression of Wheat and Oil Seed Rape Straw to High Densities Div. Note DN 1118, natn. Inst. agric. Engng, Silsoe 1982
73. Olfe, H.-Ch.: Untersuchungen über die Korrespondenz der meteorologischen Daten mit den thermodynamischen Trocknungsmöglichkeiten von Halmfutter. -KTBL-Berichte über Landtechnik 141, 1971
74. Olson, C.: Varnish Forming Properties of Sunflower Oil and how they Relate to its Use as Fuel in Diesel Tractors. - In: North Dakota Farm Research USA, Vol. 39 (6), p. 18 - 20, 1982
75. Orlovius, K.: Kali-Düngungsversuche zu Winterraps. - In: Raps - Fachzeitschrift für Öl- und Eiweißpflanzen, Nr. 2, 1984
76. Orth, H.W.: Untersuchungen zur Hochdruckverdichtung von Stroh. - In: Grundlagen der Landtechnik, Bd. 29, Nr. 2, S. 61 - 64, 1979
77. Pak, M.; A. Alexi: Praktische Erfahrungen mit Pflanzenölen als Kraftstoff in Dieselmotoren. - In: Grundlagen der Landtechnik, Bd. 37, Nr. 2, 1987
78. Parüm, H.: Analyse der Nahrungsfette. Berlin 1976
79. Pernkopf, J.; M. Wörgetter: Kraftstoffe auf Basis von Fetten und fetten Ölen. - In: Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 24. Jg., Sonderdruck aus Heft 6, 1981

80. Peterson, C.L.; G.L. Wagner; D.L. Auld: Performance Testing of Vegetable Oil Substitutes for Diesel Fuel. - In: ASAE Technical Paper, No. 81-3578, 30, Chicago 1981
81. Peterson, C.L.; G.L. Wagner; D.L. Auld: Vegetable Oil Substitutes for Diesel Fuel. - In: Transactions of the ASAE, Vol. 26, No. 2, 1983
82. Pfahler, K.: Einfluß der Hangneigung auf die Verfahrenstechnik am Beispiel des Anbaus von Getreide und Körnermais - eine Grundlage für die Bewertung hängiger Flurstücke. Dissertation, Freising/Weißenstephan 1986
83. Pischinger, G.H.; R.W. Siekmann; A.M. Falcon et al.: Methyl esters of Plant Oils as Diesel Fuel, either Straight or in Blends. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
84. Pischinger, G. H.; A. M. Falcon; R. W. Siekmann: Soyabean Ester as Alternative Diesel Fuel Tested in DI-Engine Powered Volkswagen Trucks. - In: Proceedings of the USDA-Seminar III: Vegetable Oil as Diesel Fuel, Peoria 1983
85. Quick, G.R.: Developments in Use of Vegetable Oils as Fuels for Diesel Engines. - In: Paper 80-1525 of ASAE Meeting, Chicago 1980
86. Randeen, P.; L.F. Backer; K.R. Kaufman et al.: Some Physicochemical Tests of Sunflower Oil and No. 2 Diesel Oil as Fuels. - In: North Dakota Farm Research, Vol. 39, No. 6, 1982
87. Raps-Förderungs-Fonds (RFF): Raps auf neuen Wegen. Gelsenkirchen-Buer 1986
88. Ratschow, J.-R.: Der Einfluß der Sonneneinstrahlung auf das Trocknungsverhalten von Halmgut bei der Bodenheutrocknung. Dissertation, Göttingen 1974
89. Reglitzky, A.A.; H.J. Halter; M. Knaak: Kraftstoffeinfluß auf die Motorenölprüfung, mögliche Entwicklungstendenzen. - In: Tribologie und Schmierungstechnik H. 1, S. 16 ff, 1985
90. Richter: Elementaranalysen von Rapsstroh 1984 - 86. Ergebnisprotokolle, TU-München-Garching 1984 - 1986
91. Rieger, N.: Versuchsberichte zur Rapsölverfeuerung Nr. 140/86, 96/87, 119/87; 1986/87
92. Ruhrstickstoff AG Bochum (Hrsg): Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 1983
93. Ruppert, W.: Nährstoffentzugs- und -bedarfwerte für betriebswirtschaftliche Kalkulationen von Ackerfrüchten, Grünland ... Bayerische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, München 1985
94. Sachs, L.: Statistische Auswertungsmethoden. Berlin 1969
95. Saechtling-Zebrowski: Kunststoff-Taschenbuch. München 1967

96. Salunkhe, D.K.; B.B. Desai: Postharvest Biotechnology of Oilseeds. Boca Raton 1985
97. Schäfer, W.: Rübsenöl - Dieselölmischung als Kraftstoff für Schlepper unter extremen klimatischen Bedingungen. - In: Landtechnik, 41. Jg., H. 11, 1986
98. Schaefer, H.; H. Prechtl: Wärmegewinnung aus chemisch gebundener Energie. In: Vorlesungsmanuskript: Grundlagen der Energieversorgung, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, Söcking 1981
99. Schlautman, N.J.; J.L. Schinstock; M.A. Hanna: Unrefined Expelled Soyabean Oil Performance in a Diesel Engine. - In: Transactions of the ASAE, Vol. 29, No. 1, 1986
100. Schmidt, F.: Oil Extraction from Rapeseed by Pressing. Forschungsbericht Nr. 103, bioteknisk institut, Kolding 1982
101. Schmidt, A.; K. Hahn; W. Hantsch-Linhart et al.: Technische Verwendung von Rüböl. Forschungsbericht, Institut für Verfahrenstechnik und Technologie der Brennstoffe, Wien 1987
102. Schoedder, F.: Rape Seed Oil as an Alternative Fuel for Agriculture. - In: Proceedings of 3rd International Conference on Energy Use Management, Berlin 1981
103. Schoedder, F.; G. Vellguth: Umweltverträgliche alternative Kraftstoffe. - In: Landtechnik 10, 42. Jg., 1987
104. Siekmann, R.W.; G.H. Pischinger: Evaluation of Lubricating Oil Contaminated with Small Amounts of Soybean Oil Ester in Comparison with Normal Diesel Oil Operation. - In: Proceedings of the USDA-Seminar III: Vegetable Oil as Diesel Fuel, Peoria 1983
105. Sims, R.E.H.: Tallow, Rapeseed Oil and their Esters as Diesel Fuel Extenders. - In: Research Publication Series No. 2, Massey University Agricultural Research Foundation 1982
106. Sims, R.E.H.: Tallow Esters as an Alternative Diesel Fuel. - In: Transactions of the ASAE, Vol. 28, No. 3, 1985
107. Smith, J.E.: The Briquetting of Wheat Straw. - In: Journal of agricultural Engineering Research, Vol. 22 (2), p. 105 - 111, 1977
108. Spiess, E.; P. Wildbolz: Ernteverluste bei Raps. - In: FAT-Blätter für Landtechnik Nr. 230, Juni 1983
109. Spiess, E.: Korn- und Stroherträge von Raps. Versuchsergebnisse der Eidgenössischen Versuchsanstalt Tänikon, 1987
110. Stecher, G.: Vegetable Oils as Diesel Fuel. - In: Proceedings of 14th CIMAC-Kongress, Helsinki 1981
111. Steinhauser, H.: Ökonomie der pflanzlichen Produktion. Vorlesungsumdrucke, Freising/Weihenstephan 1987
112. Steyr-Daimler-Puch AG: Jetzt möglich: Pflanzenöl statt Diesel!. In: traktor aktuell, H. 1, 1984

113. Strayer, R.C.; J.A. Blake; W.K. Craig: Canola and High-erucic Rape-seed Oil as Substitutes for Diesel Fuel: Preliminary Tests. - In: JAOCS, Vol. 60, No. 8, p. 1587 - 1592, 1983
114. Strayer, R.C.; W.K. Craig: Long-range Engine Tests Using Canola Oil as a Fuel. - In: Proceedings of the USDA-Seminar III: Vegetable Oil as Diesel Fuel, Peoria 1983
115. Strehler, A.; E.-M. Hofstetter; F. Heins: Studien über zur Hochdruckverdichtung geeignete pflanzliche Reststoffe aus der Landwirtschaft und dem Kommunalbereich. - In: Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, Freising/Weihenstephan 1978
116. Strehler, A.; J. Rogenhofer; M. Hellwig, u.a.: Verfeuerung von Stroh als Briketts in Kleinanlagen (Hausbrand) und über Großballen in Großanlagen (Brennereien, Gärtnereien ab 500 kW Heizleistung). Endbericht zum Forschungsvorhaben 03E-8319-A, Freising/Weihenstephan 1986
117. Stürmer, H.: Flüssige Energieträger agrarischen Ursprungs - Eine rohstofforientierte Analyse zur Beurteilung der Konkurrenzfähigkeit von Biotreibstoffen. Dissertation, Freising/Weihenstephan 1987
118. Thomas, A.: Fette und Öle. - In: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Band 11, Weinheim/Bergstraße 1972
119. Thun: Fachlexikon abc, Chemie. Bd. 2, Frankfurt/M. 1979
120. Van der Walt, A.N.; P.J.C. Hugo: Diesel Engine Tests with Sunflower Oil as an Alternative Fuel; Beyond the Energy Crisis. - In: Proceedings of 3rd International Conference on Energy Use Management, Berlin 1981
121. Vellguth, G.: Methylester von Rapsöl als Kraftstoff für Schlepper im Praxiseinsatz. - In: Grundlagen der Landtechnik, Bd. 35, Nr. 5, 1985
122. Vellguth, G.: Eignung von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten als Kraftstoff für Dieselmotoren. - In: Grundlagen der Landtechnik, Bd. 32, Nr. 5, 1982
123. Vellguth, G.: Pflanzenölmotor, Bericht zum GTZ-Projekt "Pflanzenölmotor", Vertrags-Nr. 83.9177.3-91.100/1202. Braunschweig 1985
124. Vellguth, G.: Pflanzenöl als Kraftstoff. Vortragsprotokoll: Referententagung in Weihenstephan, März 1988
125. Ventura, L.M.; W. Bandel: First Results with Mercedes-Benz DI Diesel Engines Running on Monoesters of Vegetable Oils. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
126. Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft: Statistik der Energiewirtschaft 1986/87. Essen 1987
127. Verordnung zur Neufassung der Ersten und Änderung der Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 15. Juli 1988: Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1988, Teil I, Nr. 34 - Tag der Ausgabe: Bonn, den 26. Juli 1988, S. 1059 -1071

128. Wagner G.L.; C.L. Peterson: Performance of Winter Rape (Brassica Napus) 000. Based Fuel Mixtures in Diesel Engines. - In: Proceedings of International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo 1982
129. Walter: Aufzeichnungsprotokoll über den Betrieb einer Briketteranlage für Stroh. - In: KTBL-Arbeitspapier 88, 1984
130. Weidmann, K.: Vergleich des Verhaltens von verschiedenen Dieselmotorkonzepten beim Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff und mit Pflanzenölester. Statusbericht Nr. FEF 8461 V/4, Volkswagenwerk AG, 1984
131. Weishaupt-Arbeitsmappe "Technik", Schwendi 1983
132. Wenner, H.-L.; J. Boxberger; M. Estler; K.-H. Kromer u.a.: Angewandte Landtechnik, München 1980
133. Wieneke, F.: Verfahrenstechnik der Halmfuttermittelproduktion. Göttingen 1972
134. Wörgetter, M.: Results of a Long Term Engine Test Based on Rape Seed Oil Fuel. - In: Proceedings of 3rd International Conference on Energy Use Management, p. 1955 - 1962, Berlin 1981
135. Ziejewski, M.; K.R. Kaufman; G.L. Pratt; H.J. Goettler: Fuel Injection Anomalies Observed during Long-term Engine Performance Tests on Alternate Fuels. - In: SAE Technical Paper Series, Nr. 852089, 1985

Verwendete Normen:

136. ASAE STANDARD: ASAE S269.1: Wafers, Pellets and Crumbles - Definitions and Methods for Determining Specific Weight, Durability and Moisture Content. - In: Agricultural Engineers Yearbook 1971
137. ASTM Designation D 471 - 79: Standard Test Method for Rubber Property - Effect of Liquids
138. ASTM Designation D 543 - 67 (Reapproved 1978): Standard Test Method for Resistance of Plastics to Chemical Reagents
139. ASTM Designation D 2274 - 74 (Reapproved 1980): Standard Test Method for Oxidation Stability of Destillate Fuel Oil (Accelerated Method)
140. DIN 4 702 Entwurf: Heizkessel. Begriffe, Heiztechnische Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Berlin 1985
141. DIN 4 787: Ölzerstäubungsbrenner. Begriffe, Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Berlin 1981
142. DIN 18 890: Dauerbrandöfen für feste Brennstoffe. Berlin 1971
143. DIN 51 601: Flüssige Kraftstoffe. Dieselmotorkraftstoff, Mindestanforderungen.
144. DIN 51 603: Teil 1 und Teil 2, Flüssige Brennstoffe. Heizöle EL und L, M und S, Mindestanforderungen. Berlin 1976
145. DIN 51 719: Bestimmung des Aschegehaltes. Berlin und Köln 1978

146. DIN 51 720: Prüfung fester Brennstoffe. Berlin 1974
147. DIN 51 780: Prüfung flüssiger Brennstoffe. Bestimmung der Oxydationsbeständigkeit (Induktionszeit). Berlin und Köln 1963
148. DIN 51 361: Prüfung von Schmierstoffen. Prüfung von Motorenschmieröl mit MM-Prüfdieselmotor. Verfahren zur visuellen Beurteilung der Kolbensauberkeit. Berlin 1984
149. DIN 51 900: Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes. Berlin und Köln 1977
150. Du Pont Petroleum Laboratory Test Methods: Analytical Method No. F31-81: 80 °C Accelerated Fuel Oil Stability Test. Wilmington 1981

EDV-Programme

151. Auernhammer, H.: KALAUS - Arbeitszeitkalkulationsmodell für die Außenwirtschaft. 1979
152. Auernhammer, H.: MIWERT - Mittelwertberechnung. 1980
153. Auernhammer, H.: T-Test - t-Test. 1980
154. Hellwig, M.; H. Rogenhofer: PSM - Programm zur Auswertung von Kesselprüfstandsmessungen. 1985
155. SAS Institute Inc.: SAS USER'S GUIDE: Statistics. Version 5 Edition. 1985
156. Schubö, W.; H.-M. Uehlinger: SPSS^X User's Guide: Handbuch der Programmversion 2.2. 1986

Alle Programme sind der Programmbibliothek der Landtechnik Weißenstephan entnommen worden.

8. Anhang

Anhangstab. 1: Prozentuale Massen- und Zugspannungsveränderungen verschiedener thermoplastischer Kunststoffe nach FULS 1983 [30] (Einwirkzeit 670 h) und deren chemische Beständigkeit [95]

Material (dt. Handelsname)	Medium	Temp. °C	Δm %	Δt %	Beständigk. b. 20 °C
Spalte 1	2	3	4	5	6
Polyamid (Nylon)	Öl	25	-0,7	+3,1	
		50	-1,8	+19	
	Ester	25	-0,1	+2,8	
		50	-1,5	+19	
Polyethylen H.D. (Hostalen, Lupolen, Vestolen)	Öl	25	-1,7	+2,8	+
		50	-1,5	+4,8	
	Ester	25	-0,9	+6,2	+
		50	+2,2	-3,1	
Polypropylen (Hostalen PP, Luparen, Novolen, Vestolen P)	Öl	25	-1,2	+7,2	+
		50	-0,4	+3,1	
	Ester	25	-0,5	+2,8	+
		50	+6,7	-7,6	
Poly-tetrafluor- ethylen-perfluor- propylen (PFEP) (Teflon)	Öl	25	-0,5	+19	+
		50	-0,5	+25	
	Ester	25	-0,5	+16	+
		50	-0,5	+18	
Polyvinylchlorid PVC	Öl	25	-0,7	+96	+
		50	-0,8	+93	
	Ester	25	-0,8	+94	-
		50	-0,7	+107	

+ = beständig; - = unbeständig

Anhangstab. 2: Massen- und Volumenänderung verschiedener Kautschukarten nach FULS 1983 [30] (Einwirkzeit 670 h) und deren Beständigkeit [95]

Material (dt. Handelsname)	Medium	Temp °C	Δm %	ΔV %	Beständigkeit I / II / III / IV
Spalte 1	2	3	4	5	6
Butylkautschuk	Öl	25	+1,2	+7,0	2 5 6 2
		50	+9,5	+20,3	
	Ester	25	+25	+34,8	
		50	+33	+54,5	
Fluorkautschuk (Fluorel, Poly- Fab, Viton)	Öl	25	-0,6	1	2 1 3 1
		50	-0,7	1	
	Ester	25	-1,2	1	
		50	+2,3	1	
Naturkautschuk (Cariflex, Natsyn)	Öl	25	+10,4	+20,7	4 5 6 3
		50	+27	+45,1	
	Ester	25	+40	+70,4	
		50	+39	+80,8	
Nitrilkautschuk (Breon, Butacril, Perbunan N, Hycar Butakon, Nitrex)	Öl	25	-1,9	+3,2	2 1 3 4
		50	-8,6	+4,7	
	Ester	25	+10,4	+25,8	
		50	+1,0	+7,2	
Polychloropren (Perbunan C, Neo- prene, Butachlor, Denkachloropren)	Öl	25	+5,6	+3,9	2 2 4 2
		50	+16,8	+22,9	
	Ester	25	+42	+56,4	
		50	+49	+90,0	
Polyethylen, chlorsulfoniert (Hypalon)	Öl	25	-0,8	1	1 2 4 2
		50	+0,3	1	
	Ester	25	+39	+71,4	
		50	+78	+99,6	

I = Oxidation, II = Mineralöl, III = organische Lösungsmittel,
IV = Säuren, Laugen; 1 = hervorragend, 2 = sehr gut, 3 = gut,
4 = mäßig, 6 = unbeständig, 5 = allgemein gering oder unterschiedlich
je nach Angriffsmittel

Anhangstab. 3: Orte und Sorten bei den Trocknungsversuchen von Rapsstroh in Kapitel 3.2.2

Versuchsort/Jahr	Rapssorte	Zeitraum
1. Freising 1985	Belinda	22. - 23. Juli 1985
2. Freising 1985	Belinda	25. - 26. Juli 1985
3. Dürneck 1985	Jet Neuf	26. - 27. Juli 1985
4. Orthofen 1985	Belinda	09. - 10. August 1985
5. Freising 1986	Librador	15. - 16. Juli 1986
6. Elsbach 1986	Belinda	22. - 23. Juli 1986
7. Orthofen 1986	Belinda	06. - 07. August 1986

Anhangstab. 4: Witterungsdaten zum Zeitpunkt der Trocknungsversuche von Rapsstroh im Schwad

Vers. Nr.	Datum	Meßstation	Lufttemperatur			Luftfeuchte		Verdunstung mm	Sonnen-scheindauer h	Strahlung (glob.) J/cm ²	Erdboden-temperatur (5 cm) °C
			max	min	mitt	% rF	% rF				
1	22.07.85	Weihensteph	24,2	10,0	17,8	37	63	3,4	10,5	1866	22,1
	23.07.85	Weihensteph	25,6	11,7	20,0	49	62	3,1	12,2	2634	22,4
2	25.07.85	Weihensteph	28,3	10,0	19,5	38	64	4,3	13,3	2723	24,5
	26.07.85	Weihensteph	30,9	12,4	23,8	33	56	5,6	11,5	2523	25,1
3	27.07.85	Weihensteph	26,1	18,1	20,4	61	75	2,1	3,7	1340	22,9
4	09.08.85	O.-schleißh	24,0	12,0	16,8	42	75	-	10,3	-	19,6
	10.08.85	O.-schleißh	27,0	12,2	16,2	46	79	-	3,9	-	19,8
5	15.07.86	Weihensteph	21,9	5,4	15,0	42	71	2,8	13,4	2724	19,0
	16.08.86	Weihensteph	24,1	8,3	17,7	40	65	3,5	13,5	2781	20,2
6	22.07.86	Barberg	26,2	14,3	20,1	42	70	-	9,4	-	-
7	06.08.86	O.-schleißh	25,2	10,1	17,6	50	76	-	11,8	-	20,8
	07.08.86	O.-schleißh	28,3	10,0	20,4	33	66	-	12,4	-	22,7

Anhangstab. 5: Feststoffemissionen beim Prüfstandsversuch mit einem Unterbrandkessel für HD-Ballen

Brennstoff	Feststoffemission in mg/m ³
Fichtenholz (75 cm)	101/ 81
Wintergerstenstroh	70/ 215/ 424
W.-Rapsstroh Nr. 1	209/ 645/ 362
Nr. 2	247/ 35/ 292
Nr. 3	237/1439/ 322/ 403
Nr. 4	824/1275/ 826/ 481

Anhangstab. 6: Feststoffemissionen bei den Feuerungsversuchen an Praxisanlagen mit einem Unterbrandkessel für HD-Ballen

Brennstoff	Feststoffemission in mg/m ³
Anlage I: Versuchsort Erching, Kesselnennleistung 50 kW	
Fichtenholz (80 cm)	17/ 38/ 86/ 161/ 178
Winterweizenstroh	370/ 479/ 586
W.-Rapsstroh Nr. 1	148/ 328/ 345/ 780
Nr. 2	259/ 424
Anlage II: Versuchsort Pattendorf, Kesselnennleistung 90 kW	
Winterweizenstroh	87/ 88
W.-Rapsstroh	284/ 95

Anhangstab. 7: Feststoffemissionen beim Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit Metallgußbrennkammer (Nennheizleistung 4,65 kW)

Brennstoff	Feststoffemission in mg/m ³
Steinkohle	36
Fichtenholzscheite (35 cm)	404/ 152
Winterweizenstrohbriketts	8318/ 650
Winterrapsstrohbriketts	12364/ 103

Anhangstab. 8: Feststoffemissionen beim Prüfstandsversuch mit einem Durchbrand-Einzelofen mit Schamottbrennkammer (Nennwärmeleistung 13 kW)

Brennstoff	Feststoffemission in mg/m ³
Fichtenholzscheite (35 cm)	289/ 144/ 138
Winterweizenstrohbriketts	1116/ 586/ 452
Winterrapsstrohbriketts	944/ 279/ 388

Anhangstab. 9: Prüfstandsversuche mit einem Unterbrand-Einzelofen⁶ (Nennwärmeleistung 5,8 kW; Unterbrandsystem für Kohle)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad indirekt %
	CO ₂ Vol.-%	CO Vol.-%		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8
Steinkohle	3,1	0,01	1,1	900	393	315	66
Getreide- strohbriketts	3,9	-	2,2	-	545	369	21
Rapsstroh- briketts	4,6	-	2,6	673	673	375	19
Winterweizenstrohbriketts	Feststoffemission in mg/m ³ 1172/1958/13514						
Winterrapsstrohbriketts	446/ 503/ 1076						

Anhangstab. 10: Prüfstandsversuche mit einem Unterbrand-Heizkessel (Nennwärmeleistung 30 kW)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad	
	CO ₂ Vol.-%	CO Vol.-%		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	ind. %	dir. %
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
Buchenholz	13,5	0,83	9,1	-	-	223	85	76
Rapsstroh- briketts	8,3	1,44	8,5	-	-	181	74	60
Buchenholzscheite	Feststoffemission in mg/m ³ 16/ 27							
Rapsstrohbriketts	321/ 128/ 463							

⁶ Bei der Verfeuerung der Strohbriketts werden nur Wärmeleistungen von ca. 3,0 kW erreicht.

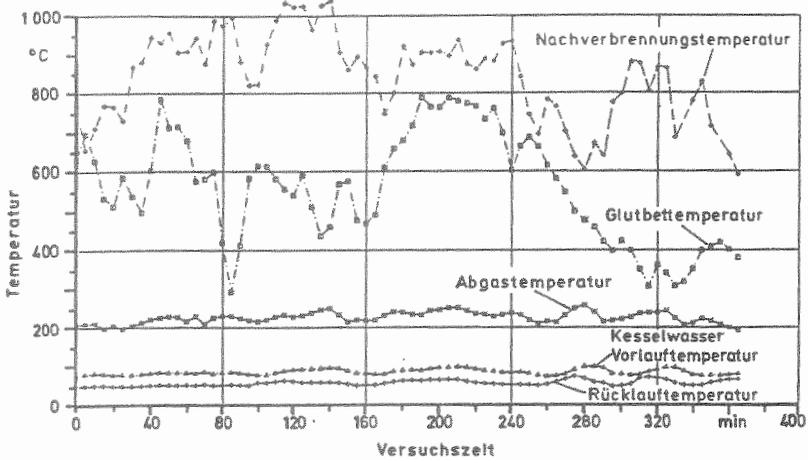
Anhangstab. 11: Prüfstandsversuche mit einem Durchbrand-Heizkessel (Nennwärmeleistung 31 kW)

Brennstoff	Rauchgasanal.		Brennst.- verbrauch kg/h	Temperatur			Wirkungsgrad	
	CO ₂ Vol.-%	CO		Glut °C	Flamme °C	Abgas °C	ind. %	dir. %
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fichtenholz	10,4	0,87	11,1	693	491	376	66	45
Strohbricketts	12,2	1,42	13,4	638	519	394	62	42
Rapsstrohbrik.	11,3	1,60	-	723	441	301	54	42
Fichtenholzscheite (75 cm) Winterrapsstrohbriketts			Feststoffemission in mg/m ³ 870/ 118 783/ 193					

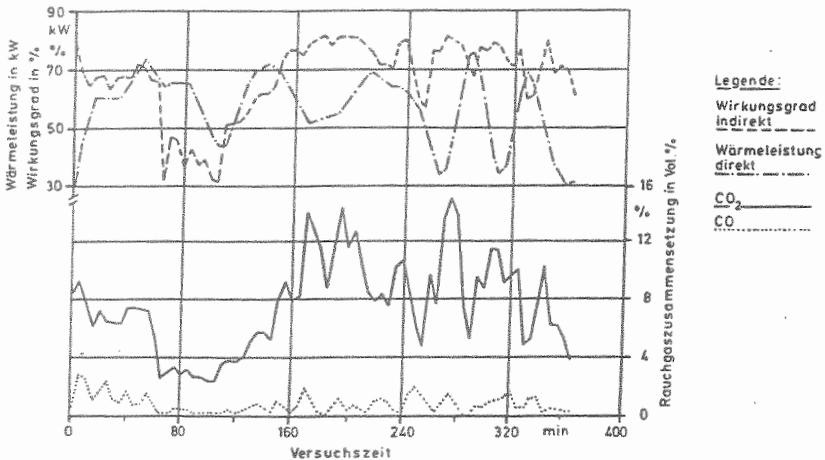
Anhangstab. 12: Nährstoffwert von Rapsstroh (U = 17 %)

Nährstoff	Reinnährstoff kg/t Stroh	Preis je kg Reinnährstoff DM	Summe DM/t
Stickstoff N	5,8	1,20	3,50
Phosphor P ₂ O ₅	2,8	1,30	3,64
Kalium K ₂ O	18,0	0,80	14,40
Kalzium CaO	18,6	0,20	3,72
Magnesium Mg	0,8	0,55	0,44
gesamt			25,70

1) 50 %ige Ausnutzung; 2) nach STEINHAUSER 1987 [111]



Anhangsabb. 1: Temperaturverläufe bei einem Prüfstandsversuch zur Verbrennung von Rapstroh mit einem Heizkessel für HD-Ballen



Anhangsabb. 2: Verlauf von Kesselleistung, Wirkungsgrad und Rauchgaszusammensetzung bei einem Prüfstandsversuch zur Verfeuerung von Rapsstroh in einem Heizkessel für HD-Ballen