

Sofern der gewählte Rohrdurchmesser in etwa dem hier untersuchten entspricht, können mit Hilfe dieser Ergebnisse Wärmeaustauscher im laminaren Strömungsbereich ausgelegt werden.

Aus der Untersuchung der Abhängigkeit auch für sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten ergeben sich Anhaltswerte für Wärmeaustauschsysteme, welche nicht mit Zwangsdurchströmung, sondern – z.B. bei Einbau im Reaktor – mit freier Anströmung aufgrund von Konvektions- und Mischvorgängen arbeiten.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Orth, H.W.: Bestimmung von Kennzahlen zur Wärmeübertragung bei Flüssigmist. Grndl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 47/50.
- [2] ●VDI-Wärmeatlas. Düsseldorf: VDI-Verlag 1977.
- [3] ●Hausen, H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. 2. Aufl. Berlin: Springer 1976.
- [4] Chmiel, H.: Wärmeübergang in der turbulenten Rohrströmung visko-elastischer Flüssigkeiten. Diss. RWTH Aachen 1971.
- [5] Metzner, A. u. J. Reed: Flow of non-newtonian fluids – correlation of the laminar, transition, and turbulent flow regions. AIChE-Journal Bd. 1 (1955) Nr. 4, S. 434/40.
- [6] Schümmer, P.: Gesetzmäßigkeiten der Modellübertragung bei rheologisch komplexem Stoffverhalten. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 44 (1972) Nr. 18, S. 1057/60.
- [7] ●Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Aarau/Schweiz: Sauerländer 1971.
- [8] Kumar, M., D. Bartlett u. N. Mohsenin: Flow properties of animal waste slurries. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 4, S. 718/22.
- [9] Nanzer, K.: Beheizungssysteme für Biogasfermenter. Diplomarbeit am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH Zürich, Zürich 1979.

Brasilianische Alkoholschlepper in der Prüfung

Von Rüdiger Krause, Braunschweig-Völkenrode*)

DK 631.372:662.754:661.722

Mit einer Erzeugung von 7,3 Mrd. l Alkohol aus Zuckerrohr (1984) und einem Anteil der Alkoholmotoren bei den PKW-Neuwagen von 90 % steht Brasilien sowohl bezüglich der Produktion als auch bezüglich des Verbrauchs von Alkohol in Kraftfahrzeugen weltweit an der Spitze.

Das eigentliche Problem der brasilianischen Energiebilanz ist der fast ausschließlich mit Dieselmotoren abgewickelte Transport in diesem Riesenland. Darüber hinaus soll aus strategischen Gründen die landwirtschaftliche Produktion von importiertem Dieselmotoren unabhängig werden. Die Verbrennung von Alkohol in Dieselmotoren bereitet jedoch bislang wegen der brenntechnischen Eigenschaften des Alkohols noch Schwierigkeiten. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Prüfung und der technischen und ökonomischen Beurteilung neuentwickelter, alkoholgetriebener Nutzfahrzeugmotoren für Ackerschlepper.

Gedankt sei allen brasilianischen Kollegen, die an der Prüfung der Schlepper sowie an der Auswertung der Ergebnisse mitgewirkt haben, insbesondere Herrn Eng. Paulo Renato Herrmann, dem damaligen Leiter der Prüfungsabteilung des Nationalen Zentrums für Agrartechnik (CENEA) in Brasilien.

*) Dr.-Ing. R. Krause ist Wiss. Oberrat am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, und war 1982/83 als Leiter des Projektes der Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) in Brasilien beurlaubt.

1. Einleitung

Nachdem der Individualverkehr Brasiliens beachtlich weit von konventionellem Ottokraftstoff auf Alkoholbetrieb umgestellt ist (etwa 35 % des ursprünglichen Ottokraftstoffverbrauchs), wird nunmehr versucht, den hohen Verbrauch an Dieselmotoren durch Einsatz von Alkoholmotoren auch in Nutzfahrzeugen zu vermindern. Zahlreiche Motorenhersteller und die vier größten Ackerschlepperhersteller haben inzwischen entsprechende Produkte entwickelt und vorgestellt. Auch Lkws bis 15 t sind verfügbar. Mitte 1984 dürften etwa 3000 schwere Nutzfahrzeuge mit Alkoholbetrieb im Einsatz gewesen sein (allein etwa 1000 Schlepper der Marke Valmet mit MWM-Motor).

Per Dekret muß z.B. bis 1987 der gesamte Nutzfahrzeugpark im Zuckerrohranbau zur Ethanolgewinnung – nicht zuletzt auch aus strategischen Gründen – auf Alkohol umgestellt werden. Das entspricht etwa 40000 bis 50000 Fahrzeugen.

Im Rahmen eines Projektes der Technischen Zusammenarbeit (GTZ) konnten wir in den Jahren 1982 und 1983 im Nationalen Zentrum für Agrartechnik (CENEA) in Brasilien u.a. 6 Alkoholschlepper auf dem Prüfstand, auf der Betonbahn und im praktischen Feldeinsatz intensiv prüfen. Die Alkoholschlepper waren, abgesehen von den Motoren, jeweils nahezu baugleich mit den entsprechenden Dieselmanifesten, so daß wir uns im folgenden im wesentlichen auf den Motor und auf die durch den Betrieb mit wasserhaltigem Ethanol beeinflussten Kenngrößen wie Leistung, Drehmomentcharakteristik und Kraftstoffverbrauch sowie auf die Kosten beschränken wollen.

2. Grundsätzliches zum Verbrennungsverfahren und zum Kraftstoff

Zwei Typen von Verbrennungsmotoren beherrschen heute weltweit den mobilen Einsatz von Kraftmaschinen:

- Ottomotoren mit Vergaser bzw. elektronischer Einspritzung und Fremdzündung,
- Dieselmotoren mit Einspritzpumpe und Selbstzündung.

Im Pkw herrscht der Ottomotor wegen seines geringen Leistungsgewichtes, seiner relativ hohen Literleistung und der hohen Drehzahl vor. Im Nutzfahrzeugbau haben Dieselmotoren weltweit insbesondere wegen ihrer Robustheit und Wirtschaftlichkeit Vorrang gegenüber Ottomotoren. Auch im Ackerschlepperbau werden fast ausschließlich Dieselmotoren verwendet. Im Rahmen der Verteuerung und Verknappung von Energie gewinnen Dieselmotoren selbst im Pkw-Bau in vielen Ländern zunehmend an Boden.

Entsprechend den Erfordernissen des Zündverfahrens und der internen Verbrennungsabläufe sind für Otto- und Dieselmotoren geeignete Rohölderivate mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften als Otto-Kraftstoff bzw. Diesel-Kraftstoff entwickelt und standardisiert worden.

Insbesondere energiearme Länder sind bemüht, durch Alternativ-Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wenigstens einen Teil der mit knappen Devisen gekauften Rohölderivate zu substituieren. Brasilien ist bei der Herstellung von Alternativ-Kraftstoff insbesondere aus Zuckerrohr durch das PROALCOOL-Programm sowie bei der Nutzung im Kraftfahrzeug heute weltweit führend. Im Pkw-Sektor werden bereits mehr als 90 % der derzeit produzierten Motoren ausschließlich mit wasserhaltigem Ethanol betrieben. Ethanol ersetzt heute bereits mehr als 35 % des konventionellen Otto-Kraftstoffes.

Mit dem Kraftstoff Ethanol ergibt sich auch für Ackerschlepper erneut die Frage nach dem geeigneten Verbrennungsverfahren der Motoren. Ethanol eignet sich wegen seiner hohen Oktanzahl (Klopffestigkeit ähnlich wie Superbenzin) und seiner geringen Cetanzahl vornehmlich für den Ottoprozeß.

Ottomotoren können grundsätzlich ohne Veränderung mit Ethanol betrieben werden, bedürfen jedoch zur Optimierung und zum Korrosionsschutz – wie der Bau von Pkw-Motoren zeigt – einer Reihe von Änderungen, die sich vorwiegend aus den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffes ergeben, **Tafel 1**. Theoretisch kann aufgrund des nahezu gleichen Gemischheizwertes mit Alkohol die gleiche Hubraumleistung erreicht werden wie mit Otto-Kraftstoff. Durch die mögliche höhere Verdichtung kann der thermische Wirkungsgrad des Motors sogar verbessert werden. Lediglich der Kaltstart bereitet Probleme und wird im allgemeinen mit Hilfe von Otto-Kraftstoff bewerkstelligt. Erst bei warmem Motor wird automatisch auf Alkoholbetrieb umgeschaltet.

Aufgrund seiner geringen Zündwilligkeit (Cetanzahl 8 gegenüber Cetanzahl 50 für Dieselmotoren) eignet sich wasserhaltiges Ethanol (5–20 % Wasser) zunächst nicht für den Betrieb von selbstzündenden Dieselmotoren.

Bei den Bemühungen, Alkohol auch im landwirtschaftlichen Bereich insbesondere im Rahmen der Zuckerrohrproduktion für die Alkoholgewinnung einzusetzen, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Motorkonzepte entwickelt oder an brasilianische Bedingungen angepaßt. Dabei sind grundsätzlich zwei verschiedene Richtungen zu unterscheiden:

- Die Anpassung des Motors an den Kraftstoff
 - a) Glühstift oder Zündkerze,
 - b) Zündstrahlverfahren.
- Die Anpassung des Kraftstoffes an den Motor
 - a) Diesel/Alkohol-Gemische,
 - b) Zusatz von Zündwilligkeitsverbesserern (Zündbeschleunigern) zum Alkohol.

Die Mehrzahl der Motorhersteller in Brasilien hat sich vorerst für die erste Alternative entschieden. Eine dieser Lösungen ist der Betrieb von Dieselmotoren mit zwei Einspritzpumpen, wobei eine Verteilpumpe die zum Start und zur Aufrechterhaltung der Zündung erforderliche, für den gesamten Drehzahlbereich nahezu konstante Mindestmenge (Leerlaufmenge) an Dieselmotoren bereitstellt (Zündstrahl), während die zweite Einspritzpumpe eine drehzahl- und lastabhängige Menge von Ethanol einspritzt. Bei Vollast ist der volumetrische Anteil des Dieselmotoren damit nur noch gering (10–20 %). Neben Maßnahmen zum Korrosionsschutz sind wegen des geringen Schmiervermögens von Alkohol auch besondere Vorkehrungen an der zweiten Einspritzpumpe zu treffen.

Kennwert	Einheit	Ethanol	Methanol	Benzin		Dieselmotoren
				(Normal-)	(Super-)	
Heizwert H_U	MJ/kg	26,8	19,7	43,5	42,7	40,6 ÷ 44,4 (42,4)
Dichte ρ bei 20 °C	kg/l	0,79	0,79	0,72 ÷ 0,75	0,73 ÷ 0,78	0,81 ÷ 0,85 (0,829)
kin. Viskosität bei 20 °C	mm ² /s	1,4	0,9	0,6		4
Siedetemperatur	°C	78	65	25 ÷ 210		150 ÷ 360
Schmelztemperatur bei 1013 mbar	°C	- 114	- 98	- 30 ÷ - 50		- 30 ¹⁾
Verdampf.-Wärme	kJ/kg	904	1110	377 ÷ 502	419	544 ÷ 795
Abkühlung des Kraftstoff-Luft- Gemisches bei Verdampfung	K	etwa 82	etwa 132	etwa 19		
Klopffestigkeit ROZ (Oktanzahl) MOZ		111,4 ²⁾ 94,0 ²⁾	114,4 ²⁾ 94,6 ²⁾	> 91 > 82	> 97,4 > 87,2	
Zündwilligkeit (Cetanzahl) CZ		8 ²⁾	3 ²⁾			> 45
Luftbedarf m_L/m_K (theoret.)	kg/kg	9,0	6,4	14,8	14,7	14,5
Gemischheizwert	MJ/m ³ _n	3,81	3,94	3,76	3,72	3,74

1) die Grenze der Filtrierbarkeit ist nach DIN 51770 im Sommer bis 0 °C, im Winter bis - 12 °C zu gewährleisten,

2) nach Wolf [3]

Tafel 1. Kennwerte von konventionellen und alternativen Kraftstoffen [1, 2].

3. Kraftstoffverbrauch

Ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Motors ist sein Verbrauch. Zwischen Otto- und Dieselmotoren bestehen grundsätzliche Unterschiede im Nutzwirkungsgrad, d.h. im Grad der Umwandlung von mit dem Kraftstoff zugeführter Energie in verfügbare Motorleistung. Während Ottomotoren einen Nutzwirkungsgrad von 25–30 % haben, erreichen Dieselmotoren 30–45 %. Entsprechend ist der spezifische Verbrauch von Ottomotoren bis zu 40 % höher. Grohe [4] gibt für Ottomotoren 285–345 g/kWh an und für Dieselmotoren 190–285 g/kWh. Damit ist beim Vergleich von Alkoholmotoren auch das unterschiedliche Verbrennungsverfahren zu berücksichtigen.

Wegen des um ca. 40 % geringeren spezifischen Heizwertes von Ethanol gegenüber Otto- und Dieselmotoren muß bei den nur geringen Dichteunterschieden grundsätzlich mit einem entsprechend höheren volumetrischen Verbrauch gerechnet werden. Besser vergleichbar ist der energetische Verbrauch in MJ/kWh.

Rein technisch muß der Verbrauch eines mit Alkohol betriebenen Motors daher mit dem Verbrauch eines Motors des entsprechenden Verbrennungsverfahrens an konventionellem Kraftstoff mit Hilfe obiger Richtwerte verglichen werden. Dieser "Äquivalent-Verbrauch" ($b_{e\ddot{A}}$) läßt sich mit den Heizwerten der beiden Kraftstoffe berechnen:

$$b_{e\ddot{A}} = m_a (H_a/H_s)/P_m \quad (\text{g/kWh}) \quad (1)$$

Dabei ist:

- m_a verbrauchte Masse des Alternativ-Kraftstoffs in g/h
- m_d verbrauchte Masse Dieselmotorkraftstoff in g/h
- H_a Heizwert des Alternativ-Kraftstoffs in MJ/kg
- H_s Heizwert des Standard-Kraftstoffs in MJ/kg
- P_m Motorleistung in kW.

Für Motoren nach dem Dieselfahren, die mit zwei Kraftstoffen arbeiten, gilt:

$$b_{e\ddot{A}} = [m_d + m_a (H_a/H_s)]/P_m \quad (\text{g/kWh}) \quad (2)$$

4. Analyse der Prüfungsergebnisse

Tafel 2 charakterisiert die verschiedenen Motorkonzeptionen und Verbrennungsverfahren der geprüften Schlepper. Die wichtigsten technischen Motordaten des konventionellen Bezugsschleppers und der vier Vergleichsschlepper sind in Tafel 3 gemeinsam mit den wichtigsten motorbezogenen Prüfungsergebnissen zusammengestellt.

Schlepper Nr.	Konzeption	Motorblock	Zylinderkopf/Verbrennungsverfahren	Hauptkraftstoff/Zusätze	Hilfskraftstoff	Kraftstoffzuführung	Zündung
1	Standard-Dieselmotor	Diesel	Diesel	Dieselloil	—	Einspritzpumpe	Selbstzündung
2	Dieselmotor mit Zündstrahlverfahren	Diesel	Diesel mit 2 Düsen	wasserhaltiges Ethanol mit Antikorrosiv und ca. 2 % Rhizinöl (Schmierung d. Einspritzpumpe)	Dieselloil zum Start und Leerlaufmenge	2 Einspritzpumpen "Zündstrahl"	Selbstzündung
3 u. 4	Modifizierter Standard Ottom.	Otto	Otto	wasserhaltiges Ethanol mit Antikorrosiv	Benzin zum Starten	Vergaser Luftvorwärmung	Zündkerzen
5	Modifizierter Diesel/Ottomotor	Diesel	Otto	wasserhaltiges Ethanol mit Antikorrosiv	Benzin zum Starten	Vergaser	Zündkerzen

Tafel 2. Motorbauarten der verglichenen Ackerschlepper.

Prüfeschlepper		1	2	3	4	5
Zylinderzahl		4	4	4	8 (V)	3
Hubraum	cm ³	3922	3922	4067	5121	3294
Verdichtung		16,6:1	18:1	10:1	10,5:1	12:1
Verbrennungsverfahren		Diesel	Diesel	Otto	Otto	Otto
Leistung						
Motor	kW	57,3	57,3	58,8	80,9	47,5
hubr.-bez.	kW/l	14,6	14,6	14,5	15,5	14,4
Zapfwelle	kW	50,6	44,5	50,9	73,4	35,5
hubr.-bez.	kW/l	12,9	11,3	12,5	14,1	10,9
Nennrehzahl	min ⁻¹	2385	2385	2164	2106 (4000)	2120
Max. Drehmoment						
an der Zapfwelle	Nm	212	212	263,7	344,3	214,3
Drehmomentanstieg	%	11,6	11,6	17,9	3,3	34
Spez. Verbrauch bei						
Vollast	g/kWh					
Alkohol		—	359	450	418	521
Diesel		216	29	—	—	—
Spez. Äquivalentverbrauch bei Vollast (Alkohol u. Diesel) bezogen auf Diesel (g/kWh)						
	%	100	118	132	122	152
Spez. Äquivalentverbrauch bei Teillast						
	%	100	103	113	127	142

Tafel 3. Kenn- und Prüfdaten der verglichenen Ackerschlepper.

Bei einem Vergleich von Alkoholschleppern der beiden Verfahren (Otto- und Dieselfahren jeweils mit Hauptkraftstoff Ethanol) untereinander sowie mit dem konventionellen Dieselmotor (betrieben mit Dieselloil) müssen technische und ökonomische sowie strategische Gesichtspunkte herangezogen werden. Dazu gehören im praktischen Einsatz insbesondere

- Leistung
- Drehmoment (Elastizität)
- spezifischer Kraftstoffverbrauch
- Funktionssicherheit/Betrieb
- Kosten
 - Anschaffungskosten
 - Instandhaltungskosten
 - Allgemeinkosten
 - Kosten der Betriebsstoffe
- Verfügbarkeit des Kraftstoffes/Risiken.

4.1 Technische Kriterien

Ausgehend vom Verbrennungsverfahren, müssen die Schlepper Nr. 3 bis 5 (Ottoverfahren mit Kraftstoff Ethanol) bezüglich ihrer Leistung, ihres Drehmomentes, ihres Nutzwirkungsgrades bzw. Verbrauches mit einem konventionellen Ottomotor (Kraftstoff Benzin) verglichen werden; der Schlepper 2 (Zündstrahlverfahren) ist mit einem Schlepper mit Standard-Dieselmotor zu vergleichen.

4.1.1 Leistung

Da nur teilweise Leistungsmessungen an den Motoren der Prüfschlepper durchgeführt wurden, sollen die für den Praktiker ohnehin mindestens ebenso interessanten, allerdings um den Wirkungsgrad des Getriebes niedriger liegenden, an der Zapfwelle abgegebenen Leistungen betrachtet werden. Die auf den Hubraum bezogene Zapfwellenleistung ist bei dem Dieselmotor und den aus Dieselmotoren abgeleiteten Alkoholmotoren (Nr. 1, 2, 5) relativ niedrig (10,9 bis 12,9 kW/l). Bei dem reinen Ottomotor (Nr. 4) ist die Hubraumleistung (14,1 kW/l) erwartungsgemäß höher, für einen Ottomotor jedoch trotzdem sehr niedrig.

Nur in einem Fall (Nr. 2 bzw. Nr. 1) wurde ein nahezu baugleicher Dieselmotor für Ethanol und für Betrieb mit Dieselkraftstoff untersucht. Die Leistung bei Ethanolbetrieb ist bei um ca. 10 % erhöhter Verdichtung um etwa 10 % niedriger als beim Dieselmotor.

4.1.2 Drehmoment

Der Drehmomentanstieg von der Nenndrehzahl bis zum maximalen Drehmoment ist ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung von Schleppermotoren. Er charakterisiert die Elastizität des Motors. Ein ausreichender Drehmomentanstieg von mindestens 10 % (besser 15 % oder mehr) ist erforderlich, um bei wechselnden Einsatzbedingungen nahe an der Leistungsgrenze arbeiten zu können. Die Streubreite des Drehmomentanstieges ist bei den untersuchten Schleppern außerordentlich groß. Der reine Ottomotor (Nr. 4) hat aufgrund einer reduzierten Nenndrehzahl mit 3,3 % einen für Ackerschlepper nicht zu akzeptierenden, zu geringen Drehmomentanstieg, während der Hybridmotor (Dieselblock, Ottozylinderkopf) (Nr. 5) mit 34 % außergewöhnlich günstig liegt (seine Dieselvariante hat mit ca. 15 % den üblichen Anstieg). Die gewünschte Drehmomentcharakteristik kann sicher mit jeder der diskutierten Konzeptionen erzielt werden. Sie hängt unmittelbar mit dem Kraftstoffverbrauch zusammen.

4.1.3 Kraftstoffverbrauch

Die untersuchten Schlepper zeigen bei Berechnung des Äquivalentverbrauchs nach Gln. (1) u. (2) beachtliche Verbrauchsunterschiede (letzte und zweitletzte Zeile der Tafel 3). Gemessen am Standard-Dieselmotor (100 %) hat von den 4 mit Alkohol betriebenen Schleppern der Schlepper mit Zündstrahlverfahren (Nr. 2) mit 118 % den geringsten Äquivalentverbrauch, nur geringfügig höher (122 %) liegt der Äquivalentverbrauch beim Ottomotor Nr. 4, während die beiden übrigen Schlepper mit Alkoholmotor nach dem Ottoprozedur einen mittleren bis hohen Verbrauch (132 bzw. 152 %) haben. Noch ausgeprägter ist der Unterschied zwischen den Alkoholmotoren in dem für die Praxis so wichtigen Teillastbereich. Der Mittelwert des Verbrauchs aus einer Reihe standardisierter Teillasten ergibt folgendes Bild: Der Dieselmotor mit Zündstrahlverfahren (Nr. 2) liegt nur um 3 % über dem Standard-Dieselmotor (Nr. 1), während die Alkoholmotoren nach dem Ottoprozedur zwischen 13 und 42 % höher liegen.

Tafel 4 zeigt die Zahlen für den energetischen Verbrauch (MJ/kWh) und darunter die Zahlen für den Wirkungsgrad, mit dem die Energie des Kraftstoffs in Energie an der Zapfwelle umgewandelt wird. Der hier angegebene Wirkungsgrad schließt den Wirkungsgrad des Zapfwellengetriebes ein; die Werte sind somit im Vergleich mit Werten der Leistungsmessung an der Motorkupplung um einige Prozent zu niedrig. Sämtliche Schlepper liegen, gemessen am üblichen Wirkungsgrad der jeweiligen Motorkonzeptionen relativ gut. Der Standard-Dieselmotor erreicht mit nahezu 40 % Wirkungsgrad eindeutig den besten Wert, aber auch der Ottomotor von Schlepper Nr. 4 ist mit 32 % hervorragend.

Insgesamt kann gefolgert werden, daß auch Motoren nach dem Ottoprinzip relativ wirtschaftlich mit Ethanol betrieben werden können. Bei den untersuchten Schleppern allerdings ergibt sich

der geringste volumetrische und energetische Verbrauch für den Standard-Dieselmotor. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß der Alkoholbetrieb noch in den Anfängen steht und bei entsprechender Nachfrage und Weiterentwicklung noch mit erheblichen Verbesserungen gerechnet werden kann.

Schlepper Nr.		1	2	3	4	5
Auf Zapfwellenleistung bezogener Energ.-Verbrauch	MJ kWh %	9,2 100	10,9 118	12,1 132	11,2 122	14,0 152
Nutzwirkungsgrad	%	39,3	33,2	29,8	32,1	25,8

Tafel 4. Leistungsbezogener energetischer Verbrauch und Nutzwirkungsgrad der geprüften Schlepper.

4.1.4 Funktionssicherheit/Betrieb

Während der Prüfung der Schlepper im Labor, auf der Prüfbahn und im praktischen Feldeinsatz von insgesamt mindestens 100 Stunden je Schlepper ergaben sich keinerlei nennenswerte Störungen, wenn die Reinigung der Kraftstofffilter hinreichend beachtet wurde.

Grundsätzlich ergibt sich bei Ethanol ein erhöhtes Risiko von Verschmutzungen durch Rost und Farbreste, insbesondere bei der innerbetrieblichen Lagerung in nicht alkoholresistenten Fässern und Anlagen sowie während des Betriebes. Besondere Aufmerksamkeit ist deshalb den Kraftstofffiltern zu widmen, wobei schleimige Ablagerungen des zur Schmierung der Einspritzpumpe mit Pflanzenöl versetzten Ethanols beim Zündstrahlverfahren besonders schnell zu Verstopfungen der Filter führen können. Ferner muß die große Streubreite der Ethanolqualität berücksichtigt werden.

Aufgrund der geringen Energiedichte und des schlechteren Nutzwirkungsgrades ist für die gleiche Arbeitsdauer (10 Stunden pro Tag) etwa 50 bis 100 % mehr Tankvolumen vorzusehen.

Der Startvorgang und die Warmlaufphase erfordern mehr Aufmerksamkeit als bei Dieselmotor, jedoch ergaben sich auch bei niedrigen Außentemperaturen keinerlei ernsthafte Probleme. Abgasprobleme durch Überschreiten der Rußgrenze gibt es dank der sauberen Verbrennung von Ethanol nicht.

Über die Funktionssicherheit über längere Zeiträume — etwa einige 1000 Betriebsstunden — liegen uns noch keine Ergebnisse vor. Neuere Untersuchungen an Schlepper Nr. 2 (Zündstrahlverfahren) zeigen nach längerem Einsatz noch gewisse Korrosionsprobleme an den Einspritzdüsen.

Wichtig für den Benutzer ist auch die Verfügbarkeit und Lagerung von Kraftstoffen. Für die im Ottoprozedur betriebenen Alkoholmotoren (Nr. 3, 4, 5) wird praktisch ausschließlich wasserhaltiges Ethanol benutzt, das an nahezu jeder Tankstelle verfügbar ist. Alkoholproduzierende Destillierereien mit einigen 1000 ha Produktionsfläche sind praktisch Selbstversorger und weitgehend unabhängig von Verfügbarkeit und Preis des Kraftstoffes auf dem Markt. Konventioneller Ottokraftstoff wird bei diesen Motoren nur in sehr geringen Mengen zum Starten benötigt.

Das verbrauchsgünstige Zündstrahlverfahren braucht neben Ethanol, das zur Schmierung der Einspritzpumpe mit 1–2 % Pflanzenöl verschnitten werden muß, einen mehr oder minder großen Anteil an Dieselmotor (bis 30 %). Hier sind zwei komplette Kraftstoffsysteme mit Tank, Filter, Pumpen und Einspritzdüsen zu warten und zwei verschiedene Kraftstoffe zu bevorraten. Es ist zu erwarten, daß auf den Zusatz von Pflanzenöl zu Ethanol zur Schmierung der Einspritzpumpe in absehbarer Zeit verzichtet werden kann.

Insgesamt kann der Betrieb von Alkoholschleppern nach dem Zündstrahl- bzw. Ottoverfahren gegenüber Standard-Diesel-Schleppern als etwas aufwendiger, doch bereits heute als weitgehend problemlos betrachtet werden.

4.2 Ökonomischer Vergleich

Bei einem ökonomischen Vergleich der 4 mit Alkohol betriebenen Schlepper untereinander und mit dem Standard-Diesel-Schlepper müssen besonders berücksichtigt werden:

- Investitionskosten
- Betriebskosten
 - Kraft- und Schmierstoffe
 - Wartung, Reparatur und Ersatzteile
 - Versicherung, Unterbringung
- Lohnkosten.

Wegen der aufwendigen Technik und der noch geringen Stückzahlen ist vielfach der Anschaffungspreis für Alkoholschlepper höher als der vergleichbarer Dieselsonen. In unserem Beispiel, **Tafel 5**, kostet Schlepper Nr. 2 (Zündstrahlverfahren) ca. 6 % mehr als die baugleiche Dieselsonen.

Ein einfaches Rechenbeispiel soll einen Vergleich der Anschaffungs- und Betriebsmittelkosten über eine angenommene Lebensdauer der 5 Schlepper von 10 Jahren ermöglichen, wobei allerdings der wesentliche Faktor "Instandhaltung" zur Zeit nicht beurteilt und berücksichtigt werden kann.

Schlepper Nr.		1	2	3	4	5
Kaufpreis	1000 Crz %	8988 (100)	9570 (106,5)	8118	7920	6710
leistungsbez. Preis	1000 Crz/kW %	178 100	215 121	159 90	108 61	189 106
Preis bei 50 kW Zapfwellenleistung	1000 Crz	8891	10753	7974	5395	9451

Tafel 5. Schlepperpreise nach Herstellerangaben und auf eine einheitliche Leistung von 50 kW hochgerechnete Preise.

4.2.1 Investitionskosten

Zum Vergleich der Investitionskosten für die 4 geprüften Alkoholschlepper verschiedener Leistung aber ähnlicher technischer Ausrüstung untereinander und mit dem Standard-Diesel-Schlepper (100 %) wird der Anschaffungspreis auf die Leistungseinheit bezogen, **Tafel 5**, (Crz/kW). Für den leistungsbezogenen Preis, gemessen am Standard-Diesel-Schlepper, zeigt sich eine sehr große Spanne von 61 bis 121 %, die nicht nur den Verbrennungsverfahren der unterschiedlichen Kraftstoffe, sondern dem technischen Standard und der Ausrüstung der Schlepper sowie vor allem der Preispolitik der einzelnen Hersteller zuzuordnen ist.

Bezogen auf die an der Zapfwelle abgegebene Leistung kostet der im Zündstrahlverfahren betriebene Alkoholschlepper etwa 21 % mehr als der sonst baugleiche Standard-Diesel-Schlepper. Der Anschaffungspreis aller 5 Schlepper wird der Vergleichbarkeit halber proportional auf eine Zapfwellenleistung von 50 kW umgerechnet.

4.2.2 Kraftstoffpreis/-kosten

Der Kraftstoffverbrauch und die Kraftstoffkosten haben, wie hier gezeigt wird, einen wesentlichen Einfluß auf die Gesamtkosten eines Schleppers. Kraftstoffpreise sind politische Preise und können sich sehr schnell ändern, nicht nur absolut, sondern auch im Verhältnis der verschiedenen Kraftstoffe zueinander.

Vergleicht man den spezifischen bzw. volumenbezogenen Energiegehalt (MJ/kg bzw. MJ/l) der verschiedenen Kraftstoffe und ihren aktuellen Preis, **Tafel 6**, dann stellt man fest, daß in Brasilien zum Berichtszeitpunkt die Energie im Dieseldieselkraftstoff am billigsten war (100 %). Demgegenüber ist der energiebezogene Preis von Ethanol 45 % und von Benzin sogar 63 % höher. Verbunden mit dem guten Nutzwirkungsgrad des Dieselmotors ergibt sich hier privatwirtschaftlich ein doppelter wirtschaftlicher Vorteil für das Dieselfahren und den Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff. Auf volkswirtschaftlicher Ebene ist natürlich eine andere Beurteilung angebracht als einzelbetrieblich und privatwirtschaftlich.

Kraftstoff	Spez. Heizwert MJ/kg	Dichte kg/l	Vol.-bez. Heizwert MJ/l	Preis Crz/l	Energ.-bez. Preis Crz/MJ	Rel. energ.-bez. Preis %
Benzin	43,5	0,73	31,8	445	14,0	163
Dieseldieselkraftst.	42,4	0,83	35,0	300	8,6	100
Ethanol	26,8	0,79	21,2	262	12,6	145

Tafel 6. Preise (volumen- bzw. energiebezogen) der verschiedenen Kraftstoffe in Brasilien im November 1983; 1 DM = 370 Crz.

Aus dem spezifischen Kraftstoffverbrauch der Vergleichsschlepper wird – einheitlich für Schlepper mit einer Nennleistung an der Zapfwelle von 50 kW – für 500 Arbeitsstunden und für 1000 Arbeitsstunden pro Jahr der Verbrauch bei der statistisch gemittelten Teillast über 10 Jahre berechnet, **Tafel 7**.

Schon bei 500 h/Jahr machen die Kraftstoffkosten ein Mehrfaches der Investitionskosten aus. Die Schwankungsbreite in den Kraftstoffkosten für die verschiedenen Alkoholschlepper liegt weit über dem Anschaffungspreis des teuersten Schleppers. Damit wird der Verbrauch kostenbestimmend.

Bei einem Vergleich der Gesamtkosten (hier reduziert auf die Summe von Investitions- und Kraftstoffkosten) zeigt sich eindeutig, daß der Schlepper mit Zündstrahlverfahren – als Alkoholschlepper mit dem höchsten Preis je kW installierte Zapfwellenleistung – aufgrund seines relativ niedrigen Verbrauches von den Alkoholschleppern am niedrigsten liegt, allerdings doch wesentlich höher ($\approx 40\%$) als der Standard-Diesel-Schlepper, der auch in diesem Vergleich am besten abschneidet.

Bei 1000 h/a werden die Unterschiede noch deutlicher, die Rangfolge bleibt jedoch die gleiche.

Für Schlepper Nr. 4 erweist sich, daß eine für das gewählte Verbrennungsverfahren (Otto) gute Lösung mit hohem Nutzwirkungsgrad und einem vergleichsweise sehr niedrigen Verkaufspreis im Endeffekt doch relativ hohe Gesamtkosten verursachen kann, **Bild 1**. Dies wird insbesondere auch durch den vom Verbrennungsverfahren her gegebenen höheren Teillastverbrauch des Ottoverfahrens gegenüber dem Dieselfahren verursacht.

Erst wenn Ethanol zu wesentlich geringerem Preis zur Verfügung steht, wie es in den Alkoholdestillierungen der Fall sein kann, oder wenn sich das Preisverhältnis Ethanol/Dieseldieselkraftstoff entsprechend zugunsten des Ethanols verschieben sollte, können sich die Verhältnisse ändern. Da die betriebsinternen Kosten einer Destillation für Ethanol jedoch nicht verallgemeinert werden können, soll eine derartige Rechnung hier nicht durchgeführt werden. Sie ist nach dem gleichen Verfahren mit jedem speziellen Kraftstoffpreis leicht nachvollziehbar.

Da alle Kosten auf Schlepper gleicher Leistung bezogen wurden, können auch die entsprechenden Lohnkosten für alle Schlepper gleich hoch angesetzt werden, so daß für einen vollständigen Vergleich lediglich Instandhaltungskosten fehlen. Hierüber sollen in Zukunft weitere Informationen aus langfristigen Praxiseinsätzen und Umfragen gesammelt werden.

Schlepper Nr.		1	2	3	4	5
1. Jährl. Kraftstoffverbrauch (1000 h Teillast)	l/Jahr Eth. DK.	— 9200	11000 1900	20200 —	28100 —	17500 —
2. Leistungsbezogener jährl. Verbrauch	l/kW Jahr Eth. DK.	— 298	417 72	601 —	671 —	751 —
3. Verbrauch bei Teillast (33 kW) in 10 Jahren	Eth. DK.	— 98340	137610 23760	198330 —	221430 —	247830 —
4. Kraftstoffkosten für 10 Jahre (33 kW) bei 1000 h/Jahr	1000 Crz. Eth. DK.	— 29502	36054 7128	51962 —	58015 —	64931 —
	Σ	29502	43182	51962	58015	64931
bei 500 h/Jahr bez. auf Standard-Schl.	1000 Crz. Σ	14751	21591	25981	29008	32466
	%	100	146	176	197	220
5. Investitionskosten	1000 Crz.	8891	10753	7974	5395	9451
6. Gesamtkosten (Σ 4. + 5.) für 10 Jahre (33 kW) bei 500 h/Jahr	1000 Crz.	23642	32344	33955	34403	41917
	absolut	23642	32344	33955	34403	41917
bez. auf Stand.-Schl.	%	100	137	144	146	177
Anteil d. Inv.-Kosten	%	38	33	23	16	23
bei 1000 h/Jahr	1000 Crz.	38393	53935	59936	63410	74382
	absolut	38393	53935	59936	63410	74382
bez. auf Stand.-Schl.	%	100	140	156	165	194
Anteil d. Inv.-Kosten	%	23	20	13	9	13

Tafel 7. Kraftstoffkosten und Gesamtkosten (Kraftstoffkosten plus Investitionskosten) der Prüfschlepper für 10 Jahre; Teillast (33 kW), 500 bzw. 1000 h/Jahr, Ethanol 262 Crz/l, Dieseldieselkraftstoff 300 Crz/l.

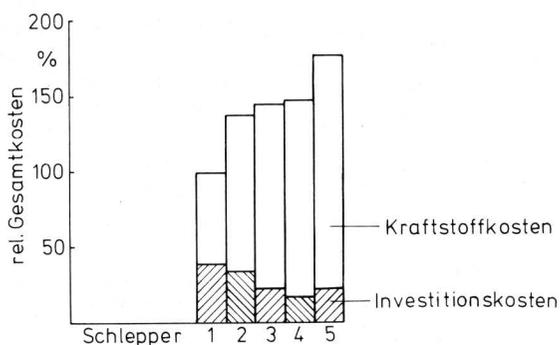


Bild 1. Gesamtkosten (Investitionskosten und Kraftstoffkosten) der geprüften Schlepper für 10 Jahre; Teillast (33 kW), 500 h/Jahr, Ethanol 262 Crz/l, Dieseldieselkraftstoff 300 Crz/l.

5. Zusammenfassung

Auf dem brasilianischen Markt sind inzwischen funktionstüchtige Alkoholschlepper verfügbar, bei denen sowohl verfahrensbedingte als auch von der technischen Lösung abhängige deutliche Unterschiede technischer Kenngrößen und Beurteilungskriterien festzustellen sind. Eine erste ökonomische Betrachtung zeigt enorme Kostenunterschiede und bei allen Varianten Mehrkosten gegenüber dem Standard-Diesel-Schlepper. Das Ottoverfahren erweist sich gegenüber dem Zündstrahl-Dieselfverfahren als die kostengünstigere Konzeption für ethanolbetriebene Motoren.

Private Betriebe werden bei den gegebenen Kraftstoffpreisen weiterhin wenig Interesse an Alkoholschleppern zeigen. Volkswirtschaftliche Interessen jedoch (hier vor allem die hohe Devisenbelastung durch Ölimporte), strategische Gründe und Fragen des Risikos bei Unterbrechung oder Ausbleiben der Ölimporte sowie spezielle Kostenverhältnisse in der zuckerrohr- und alkoholproduzierenden Industrie lassen eine weitere staatlich subventionierte Verbreitung von Alkoholschleppern – und damit auch eine technische Weiterentwicklung – erwarten.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, F. Schoedder u. G. Vellguth: Äthanol aus nachwachsenden Rohstoffen als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 125/37.
- [2] •Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 18. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976.
- [3] Wolf, W.: Alkohole und ihre motorische Verbrennung. Erdöl und Kohle, Petrochemie, Ergänzungsband COMPENDIUM 1974/75, S. 666/86.
- [4] •Grohe, H.: Otto- und Dieselmotoren – kurz und bündig. 6. Aufl. Würzburg: Vogel 1982.
- [5] Firmenunterlagen der Firmen CBT, Ford, MF, MWM und VW do Brasil.