

Machbarkeitsstudie

Umrüstung von Fahrzeugen der Forstwirtschaft auf Pflanzenöl
als Kraftstoff

Transferstelle für Rationelle und Regenerative Energienutzung in Bingen (TSB)

Prof. Dr.-Ing. Winfried Sehn
Dipl.-Ing. (FH) Helmut Gerber

April 2004

1	EINLEITUNG.....	3
2	MOTORISCHE NUTZUNG VON PFLANZEÖLTREIBSTOFFEN.....	3
2.1	RME – RAPSÖLMETHYLESTER (BIODIESEL).....	4
2.2	ZUMISCHUNG VON DIESEL ZUM PFLANZENÖL	5
2.3	PFLANZENÖLMOTOREN.....	6
2.4	UMRÜSTUNG EINES VORHANDENEN MOTORS ZUM BETRIEB MIT PFLANZENÖL	6
3	AUFGABENSTELLUNG.....	7
4	PFLANZENÖL ALS TREIBSTOFF.....	9
4.1	LAGERUNG UND BETANKUNG.....	11
5	MOTORUMRÜSTKONZEPTE.....	12
5.1	PROBLEMFELDER.....	12
5.2	GEBRÄUHLICHE UMRÜSTMAßNAHMEN.....	15
5.3	EINTANKLÖSUNG.....	16
5.4	ZWEITANKLÖSUNG	16
6	ABGASEMISSIONEN.....	17
7	BETRIEBSUMFELD.....	18
8	ANBIETER FÜR UMRÜSTUNGEN	19
9	WIRTSCHAFTLICHKEIT.....	21
10	ZUSAMMENFASSUNG.....	24
11	EMPFEHLUNG	24
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	25
13	LITERATURVERZEICHNIS	26

1 Einleitung

Die EU-Zielvorgaben zum verstärkten Einsatz regenerativer Energieträger einerseits und die besondere Umweltsensibilität beim Einsatz von Maschinen in der Landschaftspflege andererseits waren Anlass für diese Studie. Ziel war es, die Verwendung von kaltgepresstem Rapsöl in Forstmaschinen zu untersuchen. Vorteile dieses Kraftstoffes sind die dezentrale verbrauchsnahe Versorgungsstruktur mit positiven Auswirkungen auf die Wertschöpfung in ländlichen Gebieten, eine günstige CO₂-Bilanz, geringere Kraftstoffkosten sowie die biologische Abbaubarkeit. Dem gegenüber stehen notwendige Veränderungen an Motor und Fahrzeug sowie besondere Erfordernisse bezüglich Betrieb, Wartung und der Kraftstoffbereitstellung.

Diese Studie soll dazu beitragen, die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen eines Pflanzenöleinsatzes abschätzen zu können.

2 Motorische Nutzung von Pflanzeöltreibstoffen

Für die motorische Nutzung von Treibstoffen aus Pflanzenölen eignen sich insbesondere Motoren, die nach dem Diesel-Verfahren arbeiten. Bedingt durch die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Dieselmotoren und Pflanzenölen sind für einen dauerhaften Motorbetrieb Anpassungsmaßnahmen erforderlich:

Anpassung des Treibstoffes an den Motor

- chemische Umstrukturierung des Pflanzenöles (RME, PME, FAME, Biodiesel) durch Veresterung.
- Zumischung von Diesel und anderen Additiven.

Anpassung des Motors an den Kraftstoff

- Neufahrzeuge: Ausrüstung mit speziell entwickelten Pflanzenölmotoren (z.B. Elsbett Duotherm Motor).
- Werksseitige Ausrüstung des serienmäßigen Motors mit angepassten Komponenten (z.B. Zylinderkopf mit Wirbelkammer, spezielle Einspritzverfahren,..)
- Nachrüstung eines Motors für den Betrieb mit Pflanzenöl.

Erfahrungsberichte zeigen, dass RME betankte Fahrzeuge eine Verbrauchssteigerung von bis zu 5% aufweisen und eine minimale Leistungsabnahme haben können. In seltenen Fällen kann es zu einer Verdünnung des Motoröls kommen, insbesondere bei langen Fahrten mit schwacher Last oder bei verschlissenen Motoren. Ein weiterer Nachteil des RME ist seine aggressive Eigenschaft, welche sich besonders gegenüber Kunststoffen äußert. RME entzieht den Kunststoffen den Weichmacher, dies hat eine Versprödung zur Folge. So sind Dichtungen im Motorraum und an den Zapfsäulen besonders anfällig auf das RME. Für den Einsatz von RME als Kraftstoff werden somit besondere Freigaben der Fahrzeughersteller benötigt. Viele Hersteller gaben voreilig die Freigaben, welche jetzt stückweise zurückgezogen werden, da sich gezeigt hat, dass doch nicht alle Dichtungen dem RME gegenüber resistent sind. Alternative Kunststoffe sind z.B. Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Polyvinylidenfluorid (PVDF). Diese sind gegenüber dem RME resistent. Eine generelle Zusage, ob ein bestimmter Fahrzeugtyp für RME geeignet ist kann somit nicht getroffen, und muss beim Hersteller erfragt werden. Einige Fahrzeughersteller, z.B. BMW bieten Umrüstkits für RME im Zubehör an, so dass durch geringen Aufwand das Fahrzeug auf den Betrieb von „Biodiesel“ umgerüstet werden kann.

2.2 Zumischung von Diesel zum Pflanzenöl

Will man den Aufwand für die Umesterung vermeiden aber gleichzeitig mit unveränderten Motoren fahren, muss man auf die inzwischen nicht mehr aktuellen Kammermotoren zurückgreifen. Die Nebenkammern bieten für das über Zapfendüsen eingespritzte schwerflüchtige Pflanzenöl günstige Randbedingungen für eine gute Gemischbildung und Verbrennung. Die bei abnehmenden Temperaturen auftretenden Startprobleme kann man durch Beimischung von Dieseldieselkraftstoff mindern. Diese Maßnahme ist jedoch bei direkt einspritzenden Motoren ohne weitere Anpassungen nicht zu empfehlen.

Eine Zumischung von Dieseldieselkraftstoff zum Pflanzenöl wurde von der Universität Hohenheim in einem von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projekt untersucht. Hierzu wurden serienmäßige Dieselmotoren (Deutz 2012, Direkteinspritzer) ohne Anpassungsmaßnahmen mit Mischungen aus Dieseldieselkraftstoff und Pflanzenöl (25%-75%) betrieben. Als Ergebnis der Prüfläufe (300h Motorenbetrieb, 8-Punkte-Stufenzyklus) war festzustellen, dass in jedem Mischungsverhältnis nachteilige Auswirkungen auf den Motorbetrieb festzustellen waren. Hier sind zu nennen: Verkockte Einspritzdüsen, - Einlassventile, - Auslassventile, - Kolbenringe, Motorölverdünnung, erhöhter Verschleiß, erhöhter Kraftstoffverbrauch, schlechtere Abgaswerte, geringere Spitzenleistung,....

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist deshalb vom Betrieb nicht speziell umgerüsteter Motoren, insbesondere Direkteinspritzern, mit Pflanzenöl oder Pflanzenölmischungen abzuraten.



Abbildung 2: Verkockte Einspritzdüse [Mau03]

2.3 Pflanzenölmotoren

Die relativ gute Eignung von Kammermotoren für den Pflanzenölbetrieb resultiert daher, dass sich Zapfendüsen selbst von Verkockung reinigen und ein Kontakt von Kraftstoff und Schmieröl vermieden wird. Dies wird auch durch spezielle Pflanzenölmotoren erreicht. Der wohl bekannteste pflanzenöлтаugliche Motor arbeitet nach dem Duotherm-Verfahren von Ludwig Elsbett. Dabei wird der Kraftstoff mit einer oder zwei Einloch-Zapfendüsen tangential in eine im Kolben befindliche halbkugelförmige Brennmulde eingespritzt. Durch Rotationskräfte bildet sich eine heiße Brennzzone im inneren des Zylinders, in der das Pflanzenöl rückstandsfrei ausbrennen kann.

Weitere Anbieter für spezielle Pflanzenölmotoren sind die Firma AMS, Antriebs- und Maschinentechnik Schönbeck; Firma AAN, Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH sowie Fa. Willi Mahler in der Schweiz.

2.4 Umrüstung eines vorhandenen Motors zum Betrieb mit Pflanzenöl

Durch Anpassung von Motorenkomponenten wie Einspritzanlage, Kraftstoffförderpumpen, etc. kann auch ein für den Betrieb mit Dieselkraftstoff ausgelegter Motor mit Pflanzenöl betrieben werden. Die Umrüstmöglichkeiten von vorhandenen Forstfahrzeugen sowie die Chancen und Risiken sind Gegenstand der folgenden Erörterungen.

3 Aufgabenstellung

Grundlage für die Untersuchungen ist eine Maschinenliste der in Frage kommenden Forstmaschinen, erstellt von der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Zentralstelle der Forstverwaltung (Herr Edgar Alt). Durch Kontaktieren der Forstämter, sowie der Maschinen- und Motorenhersteller wurde eine weiter spezifizierten Auswahlliste erstellt.

Neues FA	MA- Nr.	MA	Beschreibung	Kauf	Datum	Ergebnis kumuliert	Verbrauch je MAS	MAS je Jahr	ca. Verbrauch je Jahr
				EUR	Mo./Jahr	MAS	L/h	h	L/a
18		12	HSM 805	171.217	3 2002	1.145,0	10,0	1.150	11.500
12	02	12	John-Deere	175.065	4 1999	4.260,0	6,0	1.250	7.500
12	910	20	EMA-Doll Linck 76 RL	959.486	1 1992	8.891,0	40,0	750	30.000
16	805	12	HSM 805	185.599	4 1999	4.120,5	10,0	1.200	12.000
21	906	12	HSM 805 B	128.474	12 1995	8.982,0	6,0	1.250	7.500
21	919	13	Rottne Rapid	219.260	11 1999	5.012,5	12,0	1.700	20.400
21		12	HSM			2003	0,0	10,0	0
21	924	22	Timberjack 1270 B	370.431	11 1997	8.594,5	14,0	1.600	22.400
21	917	22	Valmet 911	393.106	8 2001	2.136,0	14,0	1.800	25.200
13		12	HSM	208.077	8 2003	0,0	10,0	0	0
13	843	24	Bagger	42.948	10 1998	6.020,5	12,0	2.250	27.000
30		11	HSM 805	152.662	9 2001	1.191,0	10,0	600	6.000
42	119	11	MB-Trac 800	66.601	10 1994	8.676,0	10,0	1.050	10.500
42	400	11	HSM 805	184.064	10 2001	1.145,5	10,0	1.150	11.500
42	45	12	WF-Trac	181.657	1 2000	3.742,5	8,0	1.250	10.000
23	10	13	Forwarder	178.161	5 1999	6.554,7	12,0	1.900	22.800
23	9	13	Valmet 8050	108.793	7 2002	251,0	14,0	1.800	25.200
23	319	20	EMA 6	833.704	11 1997	3.828,0	40,0	750	30.000
23	16	22	Harvester	360.100	5 1999	5.772,5	15,0	1.650	24.750
24	159	11	Deutz Agroton KL-3	77.205	10 1996	7.428,5	8,0	1.100	8.800
24	121	11	Valmet	80.784	3 1999	4.294,5	12,0	1.150	13.800
								Summa	326.850

Tabelle 1: Maschinenliste SG-Süd



Abbildung 3: Ortstermin Forstamt 21 (Hochwald)

Diese Auswahlliste beinhaltet alle für eine Bewertung der Umrüstbarkeit auf Pflanzenölbetrieb erforderlichen Daten, soweit sie bei den Forstämtern, Maschinenbetreibern und –herstellern in Erfahrung zu bringen waren.

Bezeichnung	Kategorie	Anz	Bj.	Motorenherst.	Motorenbezeichnung	Zyl.	Leistung KW/PS	Hubraum ccm	Einspritz- pumpe	Verbr./ MAS
Deutz Agtron 6.00S	Schlepper	1	1996	Deutz	?	4		4038	?	8
HSM 805	Forstschlepper	6	1999-	Iveco	8045 SE 00	4	85/115	3900	Bosch	10
HSM 805 A	Forstschlepper	1	1987	Deutz	F5L912	5	64/85	4710	Bosch	10
MB Trac 800	Forstschlepper	2	1989	Mercedes	OM 314	4	64/85	3782	Bosch	10
Valmet 6200A	Schlepper	1	1998	Valmet	420DRSE	4	59/80	4400	?	12
Valmet 8050	Schlepper	1	2002	SISU-Diesel	?	6	81/110	6596	?	14
Valmet 911	Harvester	1	2001	SISU-Diesel	66EWA	6	140/190	6600	Stanadyne	14
Rottne Rapid	Forstschlepper	1	1999	John-Deere	4045 TF 250	4	93/125	4500	?	12
Ponsse S10	Harvester	1	1999	Perkins	1004-40 TW Fastram	4	92/123	?	?	12
Ponsse HS16	Harvester	1	1999	Caterpillar	3116 TA	6	157/213	?	?	15

Tabelle 2: Auswahlliste TSB

- Die Entrindungsmaschine EMA kommt für eine Umrüstung nicht in Frage, da ihr Aktionsradius sehr groß ist, und somit Betankungsprobleme auftreten werden.
- Der Forstspezialschlepper HSM 805B ist mit einer Einspritzpumpe der Firma Lucas ausgerüstet, die für den Betrieb mit Pflanzenöl nach Aussage verschiedener Umrüstfirmen nicht geeignet ist.

Die Problemfelder einer Umrüstung auf Pflanzenöl als Treibstoff werden im Folgenden erörtert, und Umrüstkonzepte für die Forstmaschinen besprochen und bewertet.

4 Pflanzenöl als Treibstoff

Für einen wartungs- und störungsarmen Betrieb von Dieselmotoren sollte ein Kraftstoff von gesicherter hoher Qualität verwendet werden. Von den in Frage kommenden Pflanzenölen ist Rapsöl zur motorischen Verwendung am besten geeignet, da hier mit Abstand die meisten Einsatzerfahrungen vorliegen und auch die Standardisierung durch Festschreibung der Mindestanforderungen für eine motorische Nutzung am weitesten fortgeschritten ist. Darüber hinaus ist Rapsöl mit einem geringen Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren im Vergleich zu anderen einheimischen Ölen relativ stabil gegenüber Oxidations- und Alterungsprozessen und eignet sich somit gut für eine Lagerung in Vorrattanks. Im Gegensatz zu Dieselkraftstoff, wo sich bei tiefen Temperaturen irreversible Parafinabscheidungen bilden, wird infolge niedriger Temperaturen festgewordenes wachssames Pflanzenöl wieder rückstandsfrei flüssig. Pflanzenöle mit höheren Wachsanteilen (z.B. Sonnenblumenöl) sind für den Winterbetrieb weniger geeignet.

Reines unbehandeltes Rapsöl wurde von der „Kommission Bewertung wassergefährdender Stoffe“ (KBwS) aufgrund seiner Abbaubarkeit (nach 21 Tagen zu 95% abgebaut) und seiner geringen aquatischen Toxizität in der Neufassung der „Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe vom 17. Mai 1999“ als nicht wassergefährdend eingestuft. Bedingt durch den hohen Flammpunkt unterliegt Rapsöl nicht der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) und wird nicht als Gefahrstoff eingestuft.

Kenngröße	Einheit	Dieselmkraftstoff	Rapsöl
Dichte (15°C)	kg/dm ³	0,840	0,920
kin. Viskosität (20°C)	mm ² /s	3,08	78,7
Flammpunkt	°C	68	230
CFPP-Wert	°C	-7	+5
Schwefelgehalt	%	0,035	<0,001
Cetanzahl	-	51,5	~39
Heizwert Hu	kJ/g	42,7	36-39

Tabelle 3: Treibstoffeigenschaften

- Die Dichte von Rapsöl ist ca. 11% höher als die des Dieselmkraftstoffs.
- Der Flammpunkt von Rapsöl liegt wesentlich höher als der von Dieselmkraftstoff, was eine hohe Lager- und Transportsicherheit mit sich bringt.
- Der Heizwert von Rapsöl liegt unter dem von Dieselmkraftstoff. Der für eine motorische Nutzung relevante *volumenbezogene* Heizwert ist allerdings aufgrund der höheren Dichte des Rapsöls nur etwa 2% geringer als der von Dieselmkraftstoff. Folglich sind der zu erwartende Kraftstoffverbrauch und die Leistung eines Motors im Pflanzenölbetrieb nur wenig geringer als bei Dieselmtrieb.
- Die kinematische Viskosität von Pflanzenöl ist bei 20°C ca. 25 mal so hoch wie die des Dieselmkraftstoffs. Eine hohe Viskosität verschlechtert bei nicht umgerüsteten Motoren die

Fließ- und Pumpfähigkeit sowie das Zerstäubungsverhalten des Kraftstoffes. Die Viskosität von Rapsöl nimmt mit steigender Temperatur ab, und erreicht erst bei ca. 100°C den Wert von Dieselkraftstoff bei 20°C.

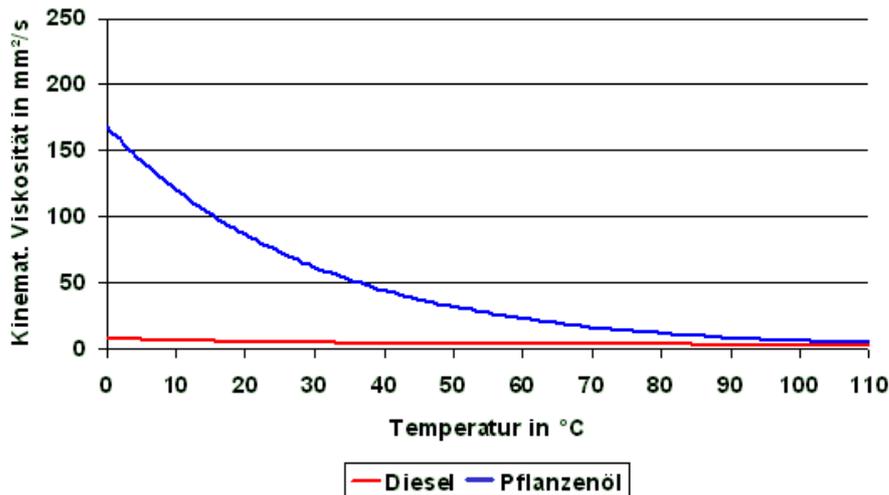


Abbildung 4: Temperaturverhalten von Pflanzenöl

- Aufgrund des sehr geringen Schwefelgehaltes von Pflanzenöl werden bei der Verbrennung nur sehr geringe Mengen an SO_x und partikelgebundene Sulfate freigesetzt. Daneben sichert schwefelarmer Kraftstoff langfristig hohe Umsetzraten von Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen in Oxidationskatalysatoren.

Weitere kritische Kenngrößen für die Qualität des Rapsölkraftstoffes sind Aschegehalt, Koksrückstand, Wassergehalt, und Neutralisationszahl.

In dem von der TU-München Weihenstephan erarbeiteten „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff“ (RK-Qualitätsstandard) sind die für einen sicheren Motorenbetrieb zulässigen Ober- bzw. Untergrenzen für alle wesentliche Parameter festgelegt und sollten bei Lieferung größerer Kraftstoffmengen vor dem Betankungsvorgang durch Probenahme mit einem Schnelltest (zu beziehen z.B. bei Fa. ASG GmbH, Augsburg) überprüft werden.[StMLU03] Ein Probenkoffer mit je 250 Teststreifen für die Grenzwerte von Gesamtverschmutzung, Wassergehalt und Säurezahl kostet 270 €. (Stand Februar 2004)

Eigenschaften / Inhaltsstoffe		Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
			min.	max.	
für Rapsöl charakteristische Eigenschaften					
Dichte (15 °C)	kg/m³	900	930		DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220			DIN EN 22719
Heizwert	kJ/kg	35000			DIN 51900-3
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm²/s		38		DIN EN ISO 3104
Kälteverhalten					Rotationsviskosimetrie (Prüfbedingungen werden erarbeitet)
Zündwilligkeit (Cetanzahl)					Prüfverfahren wird evaluiert
Koksrückstand	Masse-%		0,40		DIN EN ISO 10370
Iodzahl	g/100 g	100	120		DIN 53241-1
Schwefelgehalt	mg/kg		20		ASTM D5453-93
variable Eigenschaften					
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25		DIN EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0		DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	5,0			ISO 6886
Phosphorgehalt	mg/kg		15		ASTM D3231-99
Aschegehalt	Masse-%		0,01		DIN EN ISO 6245
Wassergehalt	Masse-%		0,075		pr EN ISO 12937

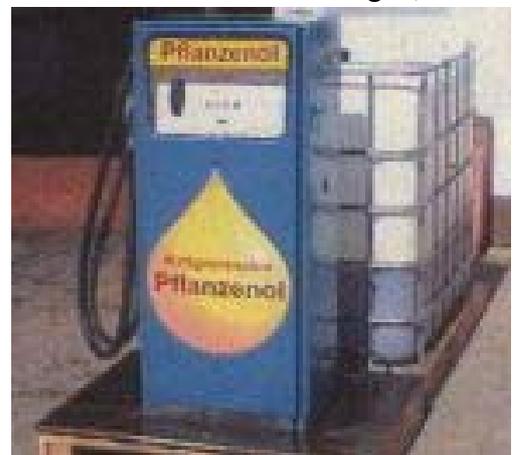
4.1 Lagerung und Betankung



Pflanzenöle sind im Gegensatz zu Heizöl und Dieselmotorkraftstoff nicht additiviert und somit auch alterungsempfindlicher (oxidativer Verderb, Bildung freier Fettsäuren). Die Oxidationsvorgänge von Ölen und Fetten werden begünstigt durch Sauerstoffzutritt, Licht, Wärme und katalytisch wirkende Schwermetallionen (Kupfer,..). Negative Auswirkungen auf die Eigenschaften als

Kraftstoff (z.B. erhöhte Viskosität, korrosive Wirkung,..) sind die Folge. Bei der motorischen Nutzung kann es außerdem zu Rückstandsbildungen in Kraftstoffleitungen, Verharzungen und zu Beeinträchtigung der Schmierfähigkeit des Motorenöles kommen. Um ein vorzeitige Alterung des Pflanzenöles zu vermeiden sollte es deshalb konstant kühl und dunkel gelagert werden. Der Sauerstoffzutritt sollte möglichst gering gehalten, sowie der Eintrag von Wasser vermieden werden.

Als ortsfeste ober- und unterirdische Lagerbehälter eignen sich Stahl- und Kunststoffbehälter mit den notwendigen Peripherieeinrichtungen wie eine pflanzeölgerechte Kraftstoffpumpe, Füll- und Entlüftungseinrichtung, Füllstandsanzeiger etc.. Bestehende Tankanlagen, die zur Lagerung von Heizöl oder Diesel verwendet werden, können nach einer Reinigung und Anpassung (Pumpeleistung, kupferfreie Leitungen) zur Lagerung von Pflanzenöl benutzt werden. Zum Betankung im Forst eignen sich sowohl Tankfahrzeuge als auch mobile Kleintanks (500-1000 l Fassungsvermögen). Eine Zumischung von Dieselmotorkraftstoff im Lagertank sollte vermieden werden, da hierdurch die Lagerstabilität der Mischung stark eingeschränkt werden kann.



5 Motorumrüstkonzepte

Die zur einer Umrüstung auf Pflanzenölbetrieb in Frage kommenden Dieselmotoren kann man in zwei wesentliche Gruppen einteilen.

- **Direkteinspritzer**

Beim DI-Verfahren wird der Kraftstoff mit einer Einspritzdüse unter sehr hohem Druck (bis ca. 1600 bar) direkt in den Brennraum eingespritzt und verbrennt dort mit der komprimierten Luft. Die meisten großvolumigen Dieselmotoren wie sie auch in Forstmaschinen eingesetzt werden gehören in diese Gruppe.

- **Vor- und Wirbelkammerverfahren**

Beim Vor- und Wirbelkammerverfahren verläuft die Verbrennung in zwei Stufen. Zunächst wird der Kraftstoff in der Nebenkammer teiloxidiert. Durch den dabei entstehenden Druck strömt der Kammerinhalt in die Hauptkammer. Dort wird das Gemisch mit der darin befindlichen Luft stark verwirbelt, wodurch sich die Verbrennung fortsetzt. Aufgrund dieser starken Verwirbelung des Kraftstoff/Luft-Gemisches sowie der längeren Verweilzeit im Brennraum sind Vor- und Wirbelkammernmotoren meist besser zur Umrüstung geeignet als Direkteinspritzer. Aufgrund des mit diesem Verfahren verbundenen geringeren inneren Wirkungsgrades sind heutzutage nur noch ältere Pkw mit Kammermotoren ausgerüstet.

5.1 Problemfelder

Durch die spezifischen physikalischen und chemischen Unterschiede zwischen Dieseldieselkraftstoff und Pflanzenöl, hier insbesondere die bei gleicher Temperatur wesentlich höhere Viskosität, ergeben sich verschiedene Probleme beim Betrieb eines Dieselmotors mit Pflanzenöl.

- **Fremdstoffeintrag in den Motor**

Bei Verwendung fremdstoffbelasteter (Verunreinigungen, Sedimente,..) Pflanzenöle kann ein Eintrag dieser Stoffe in das Motoröl erfolgen, was eine Schmieröleindickung und später Motorschäden durch Überhitzung zur Folge haben kann.

Lösung: Verwendung von Pflanzenöl mit hohem Reinheitsgrad gemäss RK-Qualitätsstandard. Filterung des Kraftstoffes unter Verwendung spezieller pflanzenölgerechter Filter mit hoher Abscheidewirkung. Filterung des Motoröles mit speziellen Feinfiltern. Beachtung bzw. Verkürzung der Ölwechselintervalle.

- **Motorölverdünnung**

Wird der Kraftstoff im Brennraum nicht vollständig verbrannt, können sich unverbrannte Kraftstoffteilchen an die Zylinderwände anlegen, von wo sie durch den Kolben in das Motoröl transportiert werden. Hierbei kommt es durch die schlechte Zerstäubung des Kraftstoffes im Gegensatz zu Dieselmotor zu einer Anreicherung im Motoröl. Da der Siedepunkt des Pflanzenöles im Gegensatz zum Siedepunkt von Diesel im Motorbetrieb nicht mehr überschritten wird, kann der Kraftstoff nicht mehr aus dem Motoröl ausgasen. Durch die Ölverdünnung werden wichtige Motorkomponenten nicht mehr ausreichend geschmiert, und es kommt zu Motorschäden.

Lösung: Anpassung des Einspritzsystems (Einspritzdüsen, Einspritzdruck,..) an den Kraftstoff zur Erzielung einer bestmöglichen Zerstäubung und Verwirbelung des Kraftstoffes oder Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffes, hier insbesondere der Viskosität, durch Kraftstoffvorwärmung. Beachtung bzw. zusätzliche Verkürzung der Ölwechselintervalle.

- **Verstopfung von Einspritzkomponenten**

Verschmutzte, vorgealterte Pflanzenöle können Einspritzdüsen, Kraftstofffilter etc. verstopfen oder verharzen.

Lösung: Nur hochreines Rapsöl nach RK-Qualitätsstandard mit geringen Anteil an Phospholipiden (Schleimstoffen) Wachsen und Verunreinigungen einsetzen. Keine übermäßige Kraftstofferwärmung, Rückführung des vorgewärmten Kraftstoffes in das Einspritzsystem, Einsatz speziell abgestimmter Kraftstoff-Filtersysteme, begrenzte Lagerfähigkeit des Pflanzenöles beachten.

- **Ablagerungen im Brennraum**

Teiloxidierte Brennstoffteilchen sowie bei der Verbrennung im Motor entstehende Aschepartikel lagern sich an Kolben, Kolbenringen, Einspritzdüsen und Ventilen ab, und können so zu Motorschäden führen.

Lösung: Neben der Kraftstoffvorwärmung zur Verbesserung der Zerstäubungsqualität und damit des Ausbrandverhaltens des Kraftstoffes ist auf die Einhaltung des Grenzwertes für den Koksrückstand im Kraftstoff zu achten. Rapsöl weist in der Regel einen Koksrückstand von 0,3 Masse-% auf. Praxiserfahrungen zeigen, dass bei Koksrückständen unter 0,4 Masse-% keine kraftstoffbedingten Betriebsstörungen an pflanzenöлтаuglichen Motoren auftreten. Ablagerungen durch aufgeschmolzene Aschepartikel sind kaum zu vermeiden und können je nach Motortyp nach einigen tausend Betriebsstunden (6000-10000h) zu Motorschäden führen.

Hier ist prophylaktisch eine regelmäßige gründliche Untersuchung des Brennraumes (z.B. Endoskopie) anzuraten um Verschmutzungstendenzen rechtzeitig erkennen zu können.

- **Schlechtes Kaltstartverhalten**

Bedingt durch die hohe Viskosität und die hohe Siedetemperatur des Pflanzenöls im Vergleich mit Dieselkraftstoff ergibt sich bei niedrigen Motortemperaturen ohne spezielle Einspritzsysteme eine ungenügende Zerstäubung des Kraftstoffes. Die Förderdrücke und Förderleistungen der Einspritz- und Förderpumpen sind ungenügend. Der Motor springt nicht an.

Lösung: Kraftstoff- und Motorvorwärmung zur Verringerung der Viskosität des Pflanzenöls oder Anfahren der Maschine im Dieselbetrieb. Zumischung von Diesel zum Pflanzenöl. Additivierung des Pflanzenöls, verstärkte Glühkerzen, längere Glühdauer.

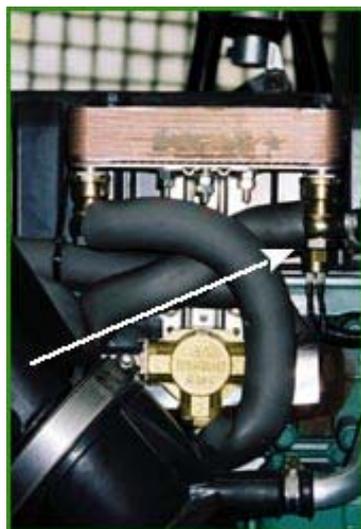
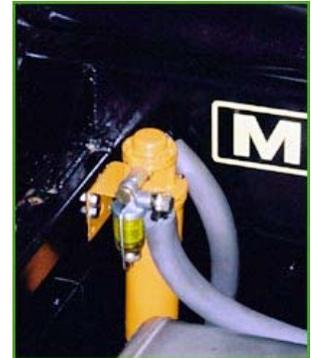


Abbildung 5: Kolben mit Verkokungen [Mau03]

5.2 Gebräuchliche Umrüstmaßnahmen

Basierend auf den bekannten Problemfeldern und den entsprechenden Lösungsmöglichkeiten ergeben sich folgende technische Umsetzungsmöglichkeiten für eine Umrüstung.

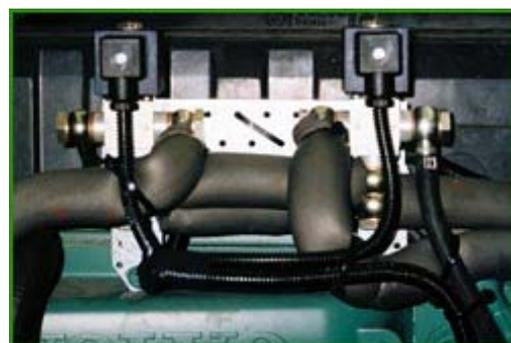
Damit für einen Motorkaltstart ausreichend Kraftstoff an den Einspritzdüsen zur Verfügung steht, sind eine ausreichende Pumpenleistung und genügend große Leitungsquerschnitte erforderlich. Um auch bei niedrigen Temperaturen und der damit verbundenen hohen Viskosität des Pflanzenöls einen sicheren Motorbetrieb gewährleisten zu können, ist es meist erforderlich, eine zusätzliche Kraftstoffförderpumpe möglichst in unmittelbarer Nähe zum Kraftstofftank zu installieren.



Eine Vorwärmung des Kraftstoffes unmittelbar vor der Einspritzung verringert die Viskosität des Pflanzenöls und führt meist zu einer besseren Zerstäubungsqualität und somit zu einer besseren Verbrennung des Kraftstoffes im Zylinder. Vorgewärmtes Pflanzenöl ist irreversibel vorgealtert und neigt zum Verharzen. Deshalb sollte eine übermäßige Vorwärmung des Kraftstoffes im Tank vermieden (Thermostatisierung), und einmal vorgewärmter Kraftstoff möglichst umgehend verbrannt werden. Vorteilhaft ist deshalb die Rückführung des Leckkraftstoffstromes aus dem Einspritzsystem nicht zurück in den Tank, sondern über eine Rückführeinrichtung wieder in den Kraftstoffvorlauf. Ein elektrisches Vorheizen des Motorkühlwassers kann ebenfalls die Kaltstarteigenschaften des Motors verbessern.

Das gesamte Einspritzsystem insbesondere aber Einspritzpumpen und Einspritzdüsen werden durch die höhere Viskosität des Pflanzenöls stärker belastet. Gemäß den Aussagen von Umrüstfirmen haben sich Einspritzpumpen von Bosch für den dauerhaften Einsatz mit Pflanzenöl meist als tauglicher erwiesen als Pumpen anderer Hersteller.

Die höhere Viskosität des Pflanzenöls im Vergleich zum Dieselkraftstoff und der hohe Gehalt an Phospholipiden (Schleimstoffen) machen ein speziell abgestimmtes Filtersystem notwendig. Direkte Eingriffe in die Motorsteuerung oder die Einspritzanlage (geänderte Einspritzdüsen, Glühkerzen, Steuerzeiten etc.) sind aufwendig, und werden deshalb von Umrüsterfirmen nur selten angeboten.



Bei einer Umrüstung ist ferner darauf zu achten, dass die am Motor vorhandenen kraftstoffführenden Komponenten beständig gegenüber dem Langzeitkontakt mit Pflanzenöl bzw. dem Wechselbetrieb mit Diesel und Pflanzenöl sind. Zu vermeiden ist hier die Verwendung von katalytisch wirkenden Materialien wie z.B. Kupfer, bzw. kupferhaltige Legierungen (z.B. Messing). Der Betrieb einer Standheizung mit Pflanzenöl ist nicht ohne weitere Umbauarbeiten an der Standheizung möglich.

Ein umgerüstetes Fahrzeug sollte auch weiterhin alternativ mit Diesel betrieben werden können, um bei mangelnder Verfügbarkeit des Pflanzenöles trotzdem betrieben werden zu können. Bei der Verwendung von Vorwärmeinrichtungen für den Pflanzenölbetrieb muss berücksichtigt werden, dass eine übermäßige Erwärmung von Dieselmotorkraftstoff zu vermeiden ist (Flammpunkt 68°C). Deshalb sind entweder die Vorwärmeinrichtungen auf ein niedriges Temperaturniveau zu begrenzen oder sie müssen bei Dieselmotorbetrieb abgeschaltet bzw. durch ein automatisches Kraftstofferkennungssystem umgangen werden.

Bei Fahrzeugumrüstungen ist außerdem zu prüfen, ob die allgemeine Betriebserlaubnis weiterhin bestehen bleibt oder neu beantragt werden muss.

5.3 Eintanklösung

Der Motor wird wie im Dieselmotorbetrieb unter Verwendung spezieller Filter, zusätzlicher Kraftstoffförderpumpen und evtl. Kraftstoffvorwärmeinrichtungen aus dem serienmäßigen Fahrzeugtank mit Kraftstoff versorgt. Diese Lösung ist bei reinem Pflanzenölbetrieb (keine Zumischung von Diesel oder Additiven) nur für Kammermotoren geeignet. Hier muss allerdings ohne externe Motorvorwärmung bei niedrigen Außentemperaturen mit schlechtem Kaltstartverhalten gerechnet werden. Bei modernen direkteinspritzenden Motoren ist eine Anpassung der Einspritzanlage (Düsen, Steuerzeiten, Pumpe,..) angebracht, was in der Nachrüstung sehr kostenintensiv ist. Eine evtl. vorhandene Standheizung kann nicht oder nur durch eine Nachrüstung weiterhin betrieben werden.

Aufgrund dieser Umstände kommt dieses Umrüstkonzept als Nachrüstung für die meisten Forstmaschinen nicht in Betracht.

5.4 Zweitanklösung

Beim „Zwei Tank System“ wird zusätzlich zum serienmäßigen Kraftstofftank ein zweiter Tank für den Startkraftstoff (Diesel) benötigt. Der Motor wird im Dieselmotorbetrieb angefahren und bei Erreichen der für einen sicheren Betrieb mit Pflanzenöl erforderlichen Temperaturen (Motor, Kraftstoff) auf Pflanzenölbetrieb umgeschaltet.

Vor Abstellen des Motors muss einige Minuten im Dieselbetrieb gefahren werden, um beim nächsten Startvorgang wiederum Dieselkraftstoff an den Einspritzdüsen zur Verfügung zu haben. Eine evtl. vorhandene Standheizung kann aus dem Dieseltank betrieben werden.

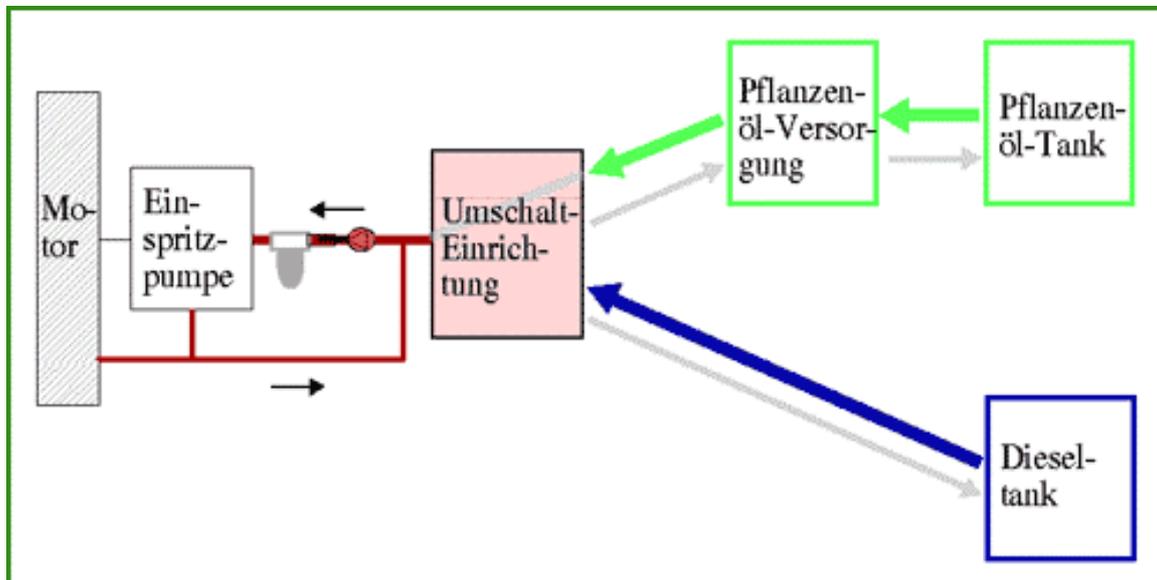


Abbildung 6: Schema Zweitanklösung [Eco04]

6 Abgasemissionen

Wissenschaftlich fundierte Daten über die Abgasemissionen auf Pflanzenölbetrieb umgerüsteter landwirtschaftlicher Maschinen liegen im wesentlichen aus dem „100-Traktoren-Demonstrationsprojekt des BMVEL“ vor [FNR03]. Die Abgasemission ist im Betrieb mit Rapsöl zumindest in einer Komponente (Stickoxide, Kohlenmonoxid) schlechter als im Betrieb mit Dieselkraftstoff vor der Umrüstung.

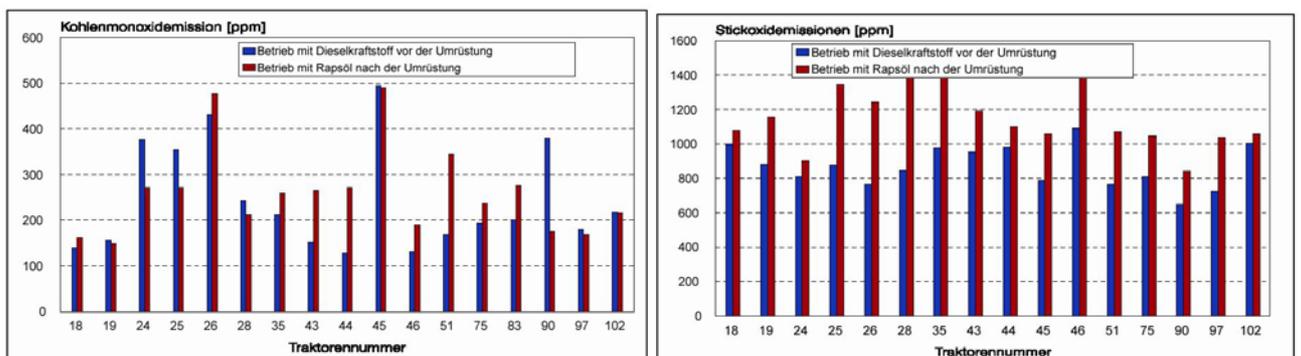


Abbildung 7: Abgasemissionen [FNR03]

7 Betriebsumfeld

Ein erfolgreiches Betreiben eines auf Pflanzenölbetrieb umgerüsteten Fahrzeuges ist nach den Erfahrungen der Umrüster in hohem Masse von der Akzeptanz der Maßnahme beim Bedien- und Servicepersonal der Maschine abhängig. Für umgerüstete Fahrzeuge sind kürzere Wartungsintervalle (Ölwechsel, Kraftstofffilterwechsel,..) und häufigere Sichtinspektionen anzuraten, was für das Wartungspersonal einen erhöhten Aufwand bedeutet.

Das Bedienpersonal muss bei den Zweitanklösungen die Einrichtung für den Kraftstoffwechsel betätigen um einen sicheren Kaltstart zu gewährleisten. Die häufigsten Gründe für Betriebsstörungen bei umgerüsteten Fahrzeugen sind Schäden, die durch Motorölverunreinigung (Ölverdünnung, Fremdstoffeintrag, etc.), d.h. Wartungsfehler verursacht werden. Fahrzeuge, die an einem Maschinenstützpunkt mit Wartungshalle und -personal, eigener Tankstelle und Betriebshof mit ausreichendem Platz für eine zusätzliche Pflanzenöl-Tankanlage stationiert sind, eignen sich deshalb besser für eine Umrüstung.

Maschinenbediener sollten über die technischen Anforderungen eines umgerüsteten Fahrzeuges sowie die Vorteile und Risiken des Pflanzenölbetriebes informiert sein.

8 Anbieter für Umrüstungen

- Firma **naturpower** Pflanzenöltechnik Alternative Antriebssysteme
Inhaber: Jens Heinrich
Weinberge 26
15806 Zossen
fon : 03377-302307
fax : 03377-302308
funk : 0171-5180211
web: www.naturpower.de
Umrüstkosten: ca. 3000 - 4000€. Bisher wurden über 170 Dieselmotoren in Fahrzeugen und Aggregaten auf Pflanzenöl umgerüstet. Dabei sind u.a. Motoren / Fahrzeuge der Marken Daimler-Benz, VOLVO, MAN, SCANIA, VW, Opel, Peugeot, Citroen, Renault, Nissan, Mitsubishi, Toyota, BMW und Multicar sowie Stromaggregate der Marke LOMBARDINI. Nachgerüstet werden Wärmetauscher zur Kraftstoffvorwärmung mit Motorkühlwasser, Zweittank für Diesel, Ultraschall-Entgasungseinrichtung, Magnetventile mit Steuergerät und Bedienungseinheit im Führerhaus, Wärmeisolierung der Kraftstoffleitungen, spezielle Kraftstofffilter, Kraftstoffförderpumpe am Pflanzenöltank. Die Umrüstungen können auch an einem Maschinenstützpunkt der Forstverwaltung durchgeführt werden. Eine zusätzliche Versicherung des umgerüsteten Fahrzeug gegen Pflanzenöl bedingte Motordefekte ist möglich. Kosten hierfür ca. 2,00€ - 2,50 € pro kW Motorleistung.
- **VWP (Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie)**
VWP, Am Steigbühl 2, 90584 Allersberg
Ortsteil Göggelsbuch, Tel. (09174) 28 62
web: www.pflanzenöl-motor.de
Umrüstkosten ca. 3000-4000€. Umrüstung für Eintank und Zweitanksysteme. Die Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP) bestehen aus Forschungs- und Entwicklungsbetrieben, die sich mit dem Einsatz von pflanzlichen Ölen in Landwirtschaft und Technik befassen. Das Spektrum der Entwicklung reicht von Herstellung pflanzlicher Öle bis zur Umrüstung von Serien PKWs, Kleintransportern und Traktoren sowie Blockheizkraftwerken und Stromerzeugern. VWP haben den Zuschlag für die Umrüstung der meisten Traktoren (70 Deutz Fahr Schlepper) im Rahmen des 100 Traktoren-Programms erhalten und somit einen sehr großen praktischen Erfahrungsschatz. Die Fahrzeuge müssen für eine Umrüstung zum Umrüster (VWP, 90584 Allersberg) transportiert werden, was mit einem erhöhten finanziellen Aufwand (Transportkosten) verbunden ist. Eine Versicherung des umgerüsteten Fahrzeuges gegen umrüstungsbedingte Motordefekte ist möglich.

- **Albrecht Transporte**

Neißstraße 14

67574 Osthofen

Tel: (06242) 4198 + 6620

Fax: (06242) 6333

web: www.salatoelbomber.de

Die in Rheinland-Pfalz ansässige Spedition Albrecht bietet Umrüstungen nach dem Zweitankprinzip an. Albrecht hat einen großen Teil der eigenen Speditions-LKW (ca. 10 Fahrzeuge) sowie Kundenfahrzeuge umgebaut. Umrüstungen können beim Kunden vor Ort durchgeführt werden, da die Fa. Albrecht über ein speziell ausgerüstetes Werkstattfahrzeug verfügt.

- **Steckenreuter KFZ-Werkstätte**

Kfz-Meister Gunther Steckenreuter

Am Zimmerplatz 6

36287 Breitenbach am Herzberg

Tel: 06675 / 919272 Mobil:0177 / 2948322

Angeboten werden neben Zweitanksystemen auch Eintanksysteme. Bei den Eintanksystemen werden neben den üblichen Maßnahmen (Kraftstofffilter, Vorwärmung,..) auch spezielle Einspritzdüsen eingebaut, die durch eine spezielle Geometrie und Oberflächenbehandlung einen dauerhaften Betrieb mit Pflanzenöl gewährleisten sollen. Die Kosten für die Umrüstung betragen je nach Umrüstsystem und Fahrzeug 700-2000€ und können vor Ort (Forstamt) ausgeführt werden.

- **Fa. AAN, Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH:**

Alte Leipziger Strasse50

99735 Nordhausen

web: www.aan-energie.de

Hersteller von Diesel und Pflanzenölbetriebenen BHKW. Eigenentwicklung eines pflanzenölauglichen Motors mit Brennmulde im Kolben und Zapfendüsen. Bietet auch Umrüstungen von Fahrzeugen an. 2-Tank Umrüstung besteht aus speziellen Kraftstofffiltern, zusätzliche Förderpumpe, Magnetventile Verkabelung etc. Es wurden bis Anfang 2004 ca. 20 Fahrzeuge umgerüstet. Preis des Umrüstsatzes zum Selbsteinbau ca. 2000 €.

9 Wirtschaftlichkeit

Um die Umrüstmöglichkeiten eines Fahrzeuges bewerten zu können, müssen die wirtschaftlichen Randbedingungen erörtert werden. Beispielfaßhaft kann man von folgender Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgehen.

Beispielfahrzeug, Leistung 100 kW

- Kosten für die Umrüstung: 3000 €.
- Kosten für Versicherung (2 Jahre) gegen Motorschäden 2,00€ /kW – Einmalzahlung 2000 €
- Dieselpreis: 0,85 €/l.
- Pflanzenölpreis: 0,50 €/l.
- Kraftstoffverbrauch: 10 l/h.
- Maschinenarbeitsstunden pro Jahr: 1000 h/a.

Basierend auf diesen Grunddaten kann eine grafische Wirtschaftlichkeitsanalyse erstellt werden. Der Schnittpunkt des Investitionshorizonts (Umrüstkosten) mit der Kurve der kraftstoffbedingten Kosteneinsparung ist der Amortisationspunkt der Umbaumaßnahme.

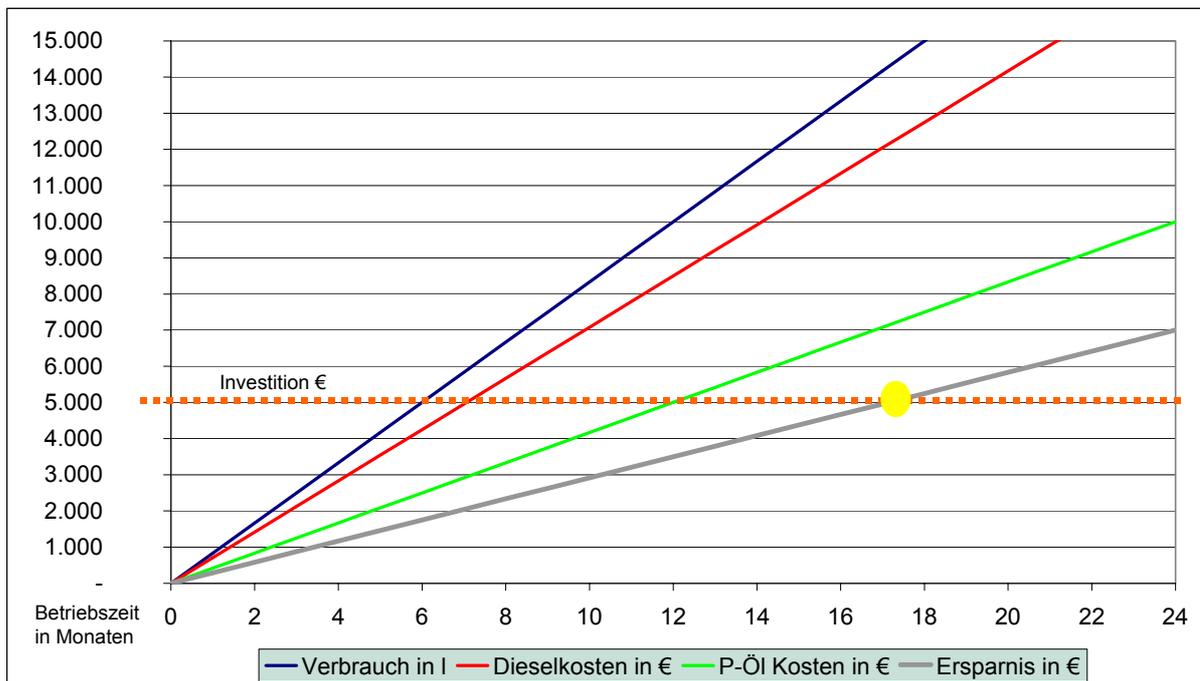


Abbildung 8: Beispiel Wirtschaftlichkeit

Um die Umrüstung verschiedener Fahrzeuge auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersuchen zu können ist eine Variation der wichtigsten Fahrzeugparameter Kraftstoffverbrauch und Maschinenarbeitsstunden pro Jahr durchzuführen. Die Differenz der Kraftstoffkosten für

Diesel und Pflanzenöl kann für den kurzen zu erwartenden Amortisationszeitraum als konstant angesehen werden. Die Investitionskosten ergeben sich aus den Kosten für die Umrüstmaßnahmen und den Kosten für eine optionale Maschinenversicherung gegen umrüstungsbedingte Motorschäden.

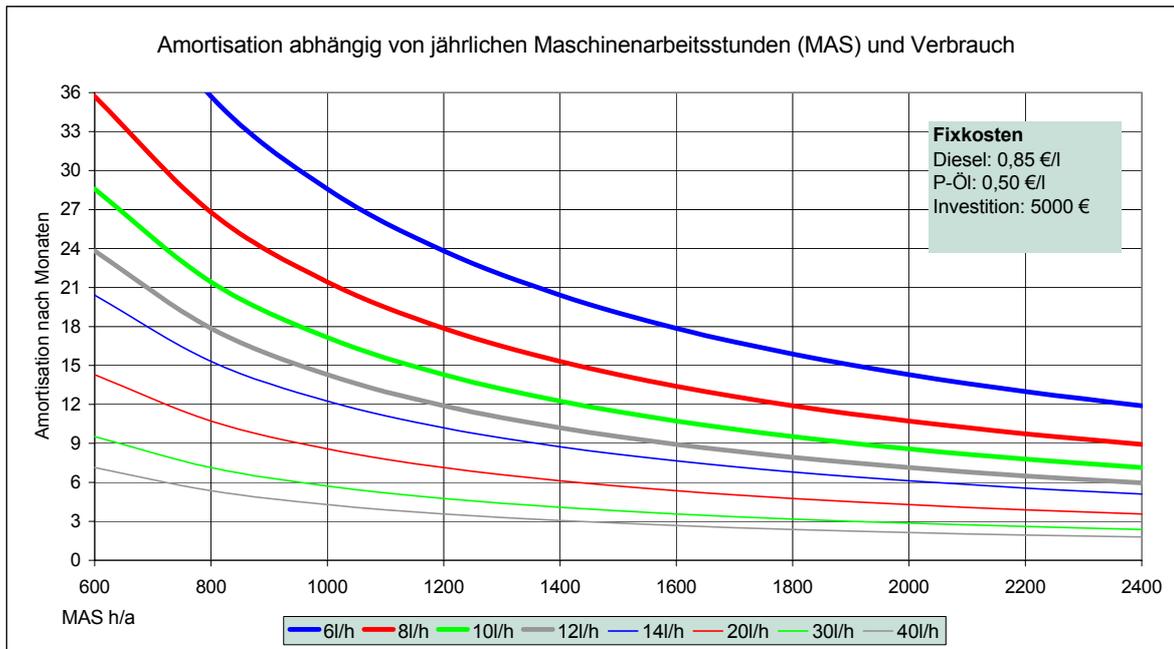


Abbildung 9: Amortisation, Investition 5000 €

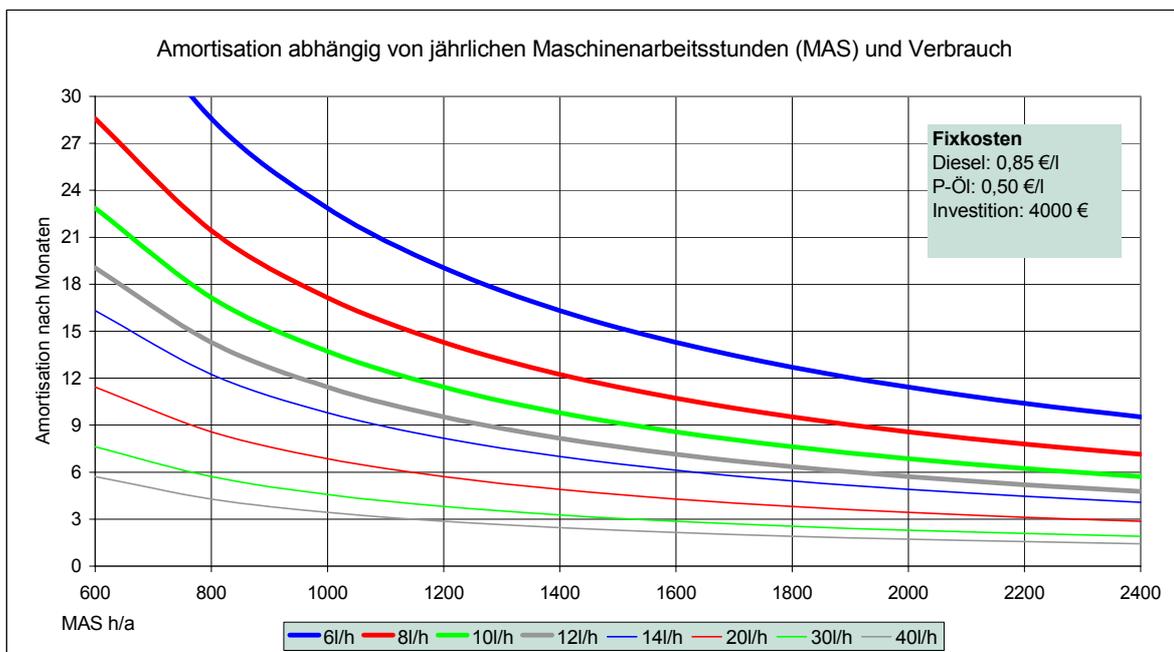


Abbildung 10: Amortisation, Investition 4000 €

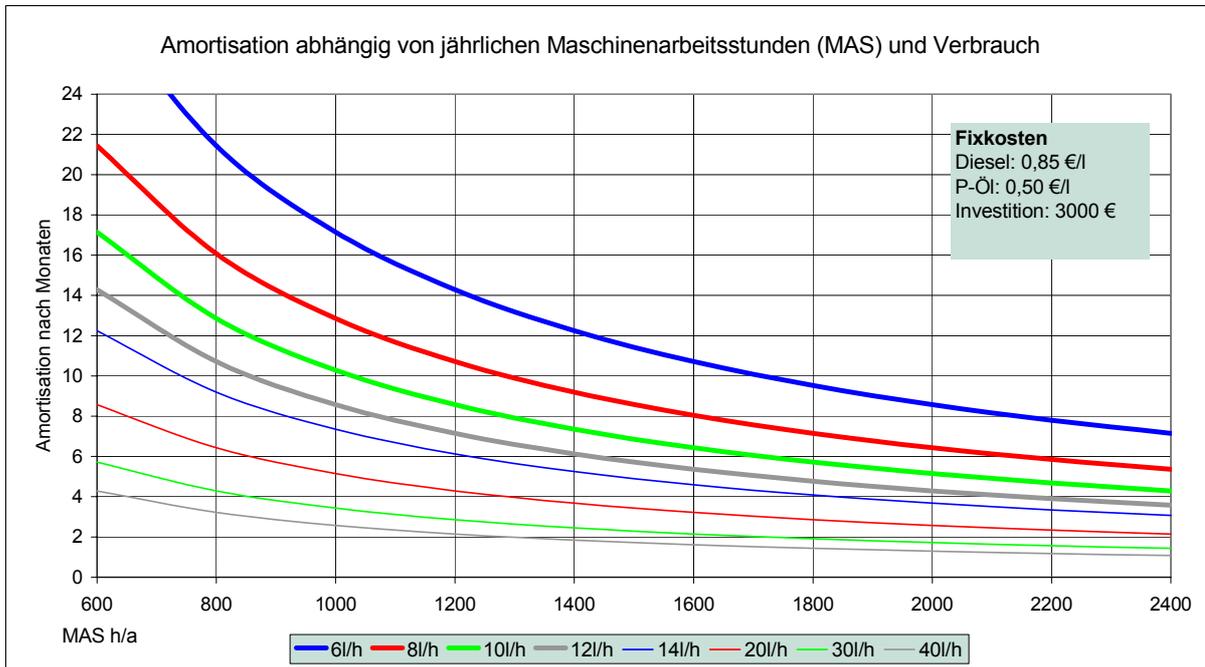


Abbildung 11: Amortisation, Investition 3000 €

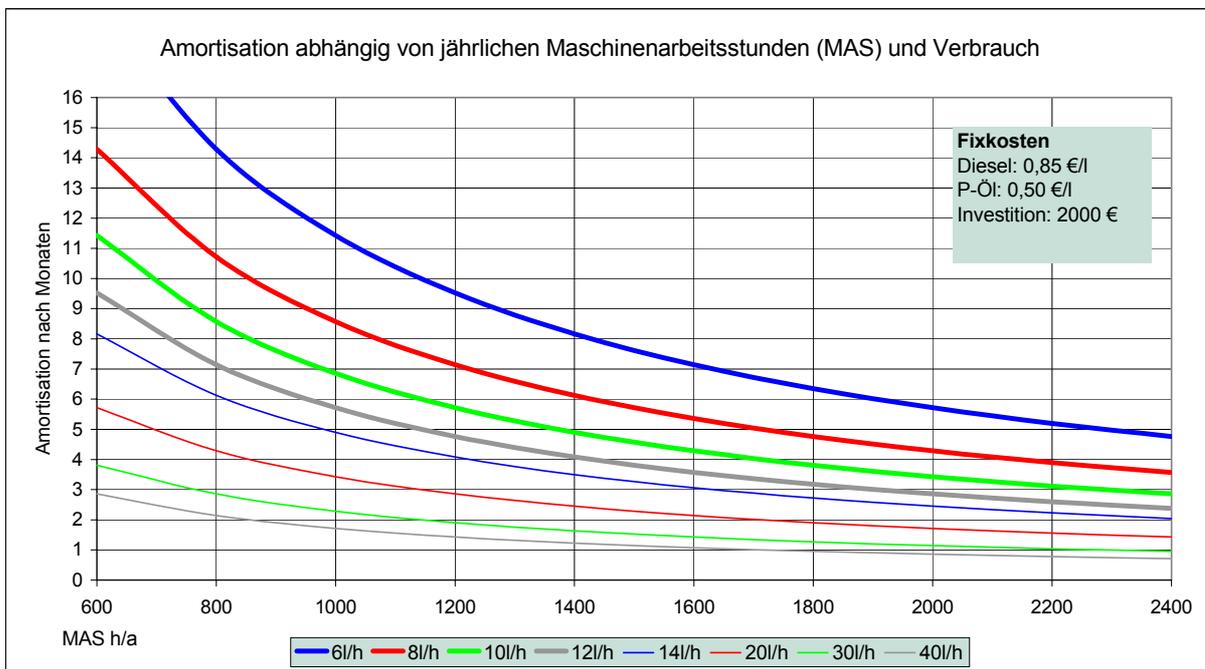


Abbildung 12: Amortisation, Investition 2000 €

Aus diesen Grafiken ist erkennbar, dass sich die marktüblichen Investitionen für eine Umrüstung bei der Mehrheit der in Frage kommenden Fahrzeuge nach spätestens zwei Jahren amortisiert haben.

10 Zusammenfassung

Die Studie hat gezeigt, dass eine Umrüstung der in Frage kommenden Forstfahrzeuge des Landes Rheinland-Pfalz unter ökonomischen und ökologischen Aspekten sinnvoll erscheint. Allerdings ist eine Umrüstung der Maschinen auch mit deutlichen Risiken verbunden, welche aber durch geeignete Maßnahmen beherrschbar sind. Hier ist insbesondere die Anpassung des Fahrzeuges an den Treibstoff durch einen erfahrenen Umrüstanbieter zu achten, Inspektions- und Ölwechselintervalle sind ggf. zu verkürzen und das Bedien- und Wartungspersonal sollte über die Notwendigkeit sowie die Risiken der Maßnahme informiert sein.

Die Qualität des einzusetzenden Pflanzenöl-Kraftstoffes spielt für einen störungsarmen Betrieb der umzurüstenden Fahrzeuge eine wichtige Rolle. Eingesetzt werden sollte nur Rapsöl nach dem RK-Qualitätsstandard. Die Einhaltung der Qualitätskriterien ist nach Möglichkeit zu überprüfen.

Um die Umrüstmaßnahme abzusichern bieten einige Firmen auch Maschinenversicherungen an, die einen kraftstoffbedingten Ausfall der Maschine und die damit verbundenen Instandsetzungskosten auffangen.

Betriebserfahrungen von BHKW- Herstellern haben gezeigt dass nach einer Betriebszeit von 6000 - 8000h mit Motorschäden durch unvermeidbare Ascheablagerungen, sowie Korrosionserscheinungen an kupfer- und chromhaltigen Bauteilen (z.B. Lagerschalen) durch Pflanzenölkontakt zu rechnen ist. Im Einzelfall ist deshalb abzuklären ob die für eine Umrüstung vorgesehene Maschine diesen Betriebsstundenbereich erreicht, was in vielen Fällen nicht der Fall sein wird, da die Maschinen schon vorher abgeschrieben sind und veräußert werden.

11 Empfehlung

Der Einsatz forstwirtschaftlicher Fahrzeuge auf nicht versiegelten Flächen und z. T. in Natur- und Wasserschutzgebieten lässt sich durch den Einsatz biologischer Betriebsstoffe umweltfreundlicher gestalten. Zudem ist durch vergleichbare Einsatzbedingungen und Geräte bei Forst- und Landwirtschaft ein gemeinschaftliches Vorgehen bei der Nutzung biogener Betriebsstoffe naheliegend. Eine Umstellung von Schleppern und Pkw der Forstwirtschaft auf Pflanzenölbetrieb ist aufgrund der hierzu vorliegenden Erfahrungen mit den geringsten Risiken verbunden und würde an den Maschinenstandorten die Erfahrungen und das Vertrauen erzeugen, das für eine eventuell folgende Umstellung von sehr teuren Arbeitsgeräten notwendig ist.

Die TSB bietet an, die Einführung von Pflanzenölen in der Forstwirtschaft wissenschaftlich zu betreuen, um die Entwicklungstendenzen im Motorenbereich, bei denen andere Kraftstoffeigenschaften, wie sie bei Pflanzenölen vorliegen als Optimierungsgrundlage dienen, im notwendigen Umfang in die Maßnahmen einfließen lassen zu können.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturformel RME	4
Abbildung 2: Verkockte Einspritzdüse [Mau03]	6
Abbildung 3: Ortstermin Forstamt 21 (Hochwald)	8
Abbildung 4: Temperaturverhalten von Pflanzenöl	10
Abbildung 5: Kolben mit Verkokungen [Mau03]	14
Abbildung 6: Schema Zweitanklösung [Eco04]	17
Abbildung 7: Abgasemissionen [FNR03]	17
Abbildung 8: Beispiel Wirtschaftlichkeit	21
Abbildung 9: Amortisation, Investition 5000 €	22
Abbildung 10: Amortisation, Investition 4000 €	22
Abbildung 11: Amortisation, Investition 3000 €	23
Abbildung 12: Amortisation, Investition 2000 €	23

13 Literaturverzeichnis

- [FNR03] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 31.03.2003
Statusseminar: Das 100-Traktoren-Demonstrationsprojekt des BMVEL.
- [Mau03] MAURER, K., 2003, Motorprüflauf mit Rapsöl-Diesel-Mischungen.
Schlussbericht Forschungsprojekt Universität Hohenheim, FNR 22026800.
- [StMLU02] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG
UND UMWELTFRAGEN, 2002, WIDMANN, THUNECKE, REMMELE
Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke, Leitfaden.
- [Har03] HARTMANN, H, 2003, Handbuch für Bioenergie-Kleinanlagen,
Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe Straubing.
- [Eco04] ECOPOWER GMBH, Webseite der Firma Ecopower.www.ecopower.de