

MATERIALIEN

Umwelt & Entwicklung Bayern

Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

Leitfaden



Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen



MATERIALIEN

Umwelt & Entwicklung Bayern

Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

Leitfaden

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München
Internet: <http://www.umweltministerium.bayern.de>
E-Mail: poststelle@stmlu.bayern.de

- April 2002 -

© StMLU, alle Rechte vorbehalten

Durchführung: TU München - Weihenstephan
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik
Vorstand: Prof. Dr. Dr.h.c. H. Schön

Projektleiter: Dr. B. A. Widmann
Projektbearbeiter
und Autoren: Dipl.-Ing.agr. K. Thuneke
Dipl.-Ing.agr. E. Remmele

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

Vorbemerkungen:

In der Reihe "Materialien" des StMLU erscheinen Dokumentationen, Studien, Untersuchungen, Gutachten und sonstige fachliche Ausarbeitungen der Abteilungen des StMLU, die einen breiteren Kreis von Bearbeitern vorwiegend im Geschäftsbereich und außerhalb des Geschäftsbereichs nur in sehr begrenzten Fällen auch direkt vom jeweiligen Thema Betroffenen sowie den an der Erarbeitung Beteiligten als Arbeitsmaterial zur Kenntnis gebracht werden sollen. Die Auflage ist daher sehr gering. Außenstehende Interessierte können in der Bibliothek des StMLU oder bei der fachlich zuständigen Abteilung des StMLU Einsicht nehmen.

Die in den "Materialien" vertretenen Anschauungen und Gesichtspunkte sind Meinungen des oder der Verfasser und werden in der Regel nicht aufgrund ihrer Darstellung in dieser Reihe vom StMLU vertreten.

Die Verteilung der aufgrund finanzieller oder materieller Beteiligung an der Herstellung als Gegenleistung an Personen oder Institutionen abgegebenen Exemplare liegt nicht in der Verantwortung des StMLU.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Pflanzenölbereitstellung	3
2.2	Pflanzenöleigenschaften und Kraftstoffqualität	4
2.2.1	Zusammensetzung und Eigenschaften von Pflanzenöl	4
2.2.2	Qualitätsanforderungen für Rapsölkraftstoff	5
2.3	Pflanzenölmotor	11
2.4	Aufbau von Pflanzenöl-BHKW	14
2.5	Planung von Pflanzenöl-BHKW	20
2.5.1	Planung und Auslegung.....	20
2.5.2	Betriebsweise	21
2.5.3	Einsatzgebiete	22
2.6	Gesetzliche Rahmenbedingungen	23
2.6.1	Genehmigung	23
2.6.2	Verordnung über brennbare Flüssigkeiten.....	27
2.6.3	Wasserrechtliche Auflagen und Anforderungen.....	28
2.6.4	Mineralölsteuer	28
2.6.5	Stromsteuer	30
2.6.6	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).....	31
2.7	Wirtschaftliche Aspekte	31
2.7.1	Kosten.....	31
2.7.2	Erlöse, Einsparung bei Eigenverbrauch, Förderung	34
2.7.3	Wirtschaftlichkeitsrechnung	35
2.8	Umweltaspekte	39
2.8.1	Energie- und CO ₂ -Bilanz bei der Rapsölbereitstellung	40
2.8.2	Primärenergieeinsparung durch BHKW	41
2.9	Abgasemissionen	43
3	Praktische Hinweise	46
3.1	Kraftstoff	46
3.1.1	Kraftstoffqualität.....	46
3.1.2	Beschaffung.....	47
3.1.3	Qualitätskontrolle und -sicherung.....	47
3.2	Kraftstofflagerung	49
3.3	Kraftstoffzuführung und Einspritzsystem	51
3.4	Motor	54
3.5	Aufstellungsort	55
3.6	Wartung und Überwachung	55
4	Schlussfolgerungen	57
5	Wichtige Adressen	59
	Quellenverzeichnis	64

1 Einführung

Der Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl als Kraftstoff in pflanzenöлтаuglichen Dieselmotoren gewinnt aus Gründen des Boden- und Gewässerschutzes, aber auch wegen der Verminderung der Kohlendioxidbelastung in der Atmosphäre sowie der Ressourcenschonung zunehmend an Bedeutung. Bei der Verwendung pflanzenöлтаuglicher Motoren, können im Vergleich zur Nutzung von Fettsäuremethylester in konventionellen Dieselmotoren der Schritt der Umesterung des Pflanzenöls und die damit verbundenen Kosten sowie der Rohstoff- und Energieeinsatz für die Umwandlung entfallen.

Die Verwendung naturbelassener Pflanzenöle zur Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken (BHKW) unter hoher Ausnutzung des Energieinhaltes des Kraftstoffes spielt eine immer wichtigere Rolle. Insbesondere pflanzenöлтаugliche Aggregate im unteren Leistungsbereich werden verstärkt als ein Baustein im Gesamtkonzept einer dezentralen Strom- und Wärmeversorgung mit regenerativen Energieträgern nachgefragt. Gründe dafür sind sowohl zunehmende Anforderungen des Boden- und Gewässerschutzes in umweltsensiblen Gebieten, wie z.B. der Alpenregion oder Wasserschutzgebieten, aber auch der Preisanstieg von fossilen Kraft- und Brennstoffen. Ein weiterer Grund ist die verbesserte Wirtschaftlichkeit des Betriebs durch den im kürzlich verabschiedeten Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)) garantierten höheren Vergütungssatz bei der Einspeisung von Strom aus Biomasse.

Die Erfahrungen mit pflanzenölbetriebenen BHKW in der Praxis sind bislang sehr gegensätzlich. Neben dauerhaft funktionstüchtigen Aggregaten traten an anderen Anlagen immer wieder schwerwiegende Betriebsstörungen auf, so dass mehrere BHKW nach meist nur kurzer Laufzeit den Betrieb einstellten. Die Ursachen von Betriebsstörungen werden üblicherweise nicht analysiert. Erfahrungen wurden nicht aufbereitet und sind für Planer und Betreiber nicht verfügbar. Somit werden Schwachstellen nicht erkannt und die Vermeidung bereits früher gemachter Fehler ist schwer möglich.

Umfassende Untersuchungen über einen längeren Zeitraum zum Betriebsverhalten von pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerken unter Einbeziehung der Kraftstoffqualität, der installierten Technik und der Betriebszustände der Anlage wurden erstmals im Rahmen eines vom *Bayerischen Landesamt für Umweltschutz* mit Mitteln des *Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen* geförderten Untersuchungsvorhaben mit dem Titel: „*Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke - Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung*“ durchgeführt. Die Ergebnisse des Vorhabens bilden die Grundlage für den vorliegenden Leitfaden, der eine Hilfestellung für

Anlagenplaner, Betreiber und Entscheidungsträger bei Fragen zur Planung, Ausführung und zum Betrieb von Pflanzenöl-BHKW geben soll. Darin sollen weniger motorisch betriebenen BHKW allgemein betrachtet werden, als vielmehr pflanzenölspezifische Gesichtspunkte im Vordergrund stehen. Insbesondere sollen die wechselseitigen Anforderungen von Pflanzenöl und Motor bzw. den Peripheriekomponenten aufgezeigt werden. Darüber hinaus sollen mit Hilfe des Leitfadens Schwachstellen frühzeitig - möglichst schon in der Planungs- und Bauphase - erkannt und vermieden bzw. beseitigt werden können, um eventuelle Schadensfälle abzuwenden. Der „Leitfaden Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke“ soll einen Beitrag für einen sicheren, wirtschaftlichen und umweltgerechten Betrieb von pflanzenölbetriebenen BHKW leisten.

2 Grundlagen

2.1 Pflanzenölbereitstellung

Für die Bereitstellung von Pflanzenölkraftstoff gibt es zwei verschiedene gängige Produktionsverfahren: Das Abpressen und Extrahieren der Ölsaaten in industriellen Ölmühlen und das ausschließlich mechanische Abpressen in dezentralen kleineren Ölmühlen [18].

Verfahrensschritte bei der Pflanzenölgewinnung in **zentralen Großanlagen**:

- Vorbehandlung der Ölsaaten (Reinigung, Trocknung, evtl. Schälung, Zerkleinerung, Konditionierung)
- Ölgewinnung (mechanische Vorpressung, Rückstand wird durch Lösungsmittelextraktion weiter entölt)
- Nachbehandlung des Extraktionsschrots (Entfernung und Rückgewinnung des Lösungsmittels)
- Raffination (Entfernen von bei der Extraktion eingetragenen unerwünschten Begleitstoffen durch Entschleimung, Entsäuerung, Bleichung, Desodorierung)

Verfahrensschritte bei der Pflanzenölgewinnung in **dezentralen Anlagen**:

- Vorbehandlung der Ölsaaten (Reinigung, Trocknung, evtl. Walzung)
- Ölgewinnung durch Kaltpressung (ausschließlich mechanische Entölung, meist durch Schneckenpressen)
- Ölreinigung (Abscheidung von Trubstoffen durch Sedimentation, Filtration oder Zentrifugation)

In Deutschland gibt es derzeit etwa 14 zentrale und 120 dezentrale Ölmühlen. Die zentralen Ölgewinnungsanlagen sind überwiegend im nördlichen Teil des Bundesgebiets logistisch an die großen Wasserstraßen angebunden, wohingegen sich v.a. im Süden dezentrale Anlagen etabliert haben, davon etwa 53 allein in Bayern. In Tabelle 1 werden wichtige Aspekte der Pflanzenölbereitstellung in zentralen und dezentralen Anlagen einander gegenübergestellt.

Tabelle 1: Aspekte der Pflanzenölbereitstellung in zentralen und dezentralen Ölmühlen (Auszug aus dem KTBL Arbeitspapier 267 [36])

Kriterien der Ölsaatenverarbeitung	zentral	dezentral
Verarbeitungskapazität	500 - 4000 t Ölsaaten/Tag	0,5 – 25 t Ölsaaten/Tag
Einzugsbereich und Vermarktung	weltweit	regional (ca. 50 km)
Produkte	<ul style="list-style-type: none"> • Voll- und Halbraffinate • Extraktionsschrot (Restfettgehalt < 1 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • v.a. kaltgepresste Pflanzenöle • Presskuchen als Eiweißfuttermittel (Restfettgehalt 10-18 %)
Umweltaspekte	<ul style="list-style-type: none"> • hohes Transportaufkommen • Energiebedarf: 1,7 GJ/t Ölsaaten • Einsatz von Lösungsmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • kurze Transportwege • Energiebedarf: 0,1-0,5 GJ/t Ölsaaten • kein Einsatz von Lösungsmittel • keine produktionsbedingten Abwässer • Wirtschaften in Stoffkreisläufen
Wirtschaftliche Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlichkeit gegeben 	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von regionalen Marktgegebenheiten • Wertschöpfung für die Landwirtschaft

2.2 Pflanzenöleigenschaften und Kraftstoffqualität

Bei der Verwendung von Pflanzenölen sind bedingt durch deren von Dieselkraftstoff abweichende Eigenschaften spezifische Anforderungen an die Kraftstofflagerung, die Kraftstoffzuführung an den Motor als auch an den Motor selbst zu berücksichtigen. Um einen störungsarmen Betrieb zu gewährleisten ist darüber hinaus Pflanzenöl von bestimmter Qualität erforderlich.

2.2.1 Zusammensetzung und Eigenschaften von Pflanzenöl

Pflanzliche Öle bestehen überwiegend aus Triglyceriden, also Ester aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin und drei Fettsäuren. Die Fettsäuren bestehen aus Kohlenstoffketten und können gesättigt (keine Doppelbindungen zwischen benachbarten C-Atomen), einfach ungesättigt (eine Doppelbindung) oder mehrfach ungesättigt sein (mehrere Doppelbindungen). Die Anteile der vorkommenden Fettsäuren an der gesamten Fettsäuremenge in einem Pflanzenöl ist weitgehend genetisch fixiert und wird als Fettsäuremuster bezeichnet. Neben den Triglyceriden können auch Mono- oder Diglyceride (Ester mit einer bzw. zwei Fettsäuren) und freie Fettsäuren im Pflanzenöl vorkommen. Diese sind überwiegend Spaltprodukte des Fettabbaus.

Neben den Glyceriden sind auch Fettbegleitstoffe, wie Phospholipide im Pflanzenöl enthalten. Phospholipide setzen die Oxidationsstabilität im Pflanzenöl herab und verursachen durch ihre Hydratisierbarkeit (Quellung mit Wasser) Störungen bei technischen Prozessen, wie z.B. Verstopfungen von Filtern oder Einspritzdüsen.

Aufbau und Zusammensetzung pflanzlicher Öle bestimmen im Wesentlichen die charakteristischen Eigenschaften, wie Dichte, Viskosität, Flammpunkt und Iodzahl.

Durch Sauerstoffzutritt, Licht, Wärme sowie katalytisch wirkende Metallionen werden Öle oxidiert. Dabei erfolgt ein peroxidischer Einbau von Sauerstoff in das Ölmolekül. Mit steigendem Sauerstoffanteil nimmt die Neigung zur Polymerisierung (Vernetzung von Molekülbestandteilen) zu, wodurch die Viskosität des Pflanzenöls ansteigt. Öle mit einem hohen Anteil an gesättigten Fettsäuren sind an der Luft relativ beständig, Öle mit vielen Doppelbindungen sind dagegen weniger haltbar.

Öle sind in Wasser unlöslich und gegenüber dem alleinigen Angriff von Wasser weitgehend resistent. In Gegenwart von Mikroorganismen oder Enzymen wird die hydrolytische Spaltung begünstigt. Dabei werden Fettsäuren vom Glyceridmolekül abgespalten.

Pflanzenöle sind innerhalb von 21 Tagen zu über 95 % biologisch abgebaut (gemäß CEC L-33-A-94) und gelten als „nicht wassergefährdend“ [1]. Deshalb ist der Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff v.a. in umweltsensiblen Gebieten sinnvoll.

2.2.2 Qualitätsanforderungen für Rapsölkraftstoff

Beim Einsatz von Pflanzenöl ist ebenso wie bei anderen Kraftstoffen eine gesicherte Qualität erforderlich, um einen störungsarmen und umweltschonenden Motorbetrieb zu gewährleisten. Im Rahmen eines Arbeitskreises unter Federführung der TU München Weihenstephan, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, wurden deshalb kraftstoffrelevante Mindestanforderungen für Rapsöl, dem in Deutschland am stärksten verbreiteten Pflanzenöl, erarbeitet und in dem „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) 5/2000“ zusammengefasst (Abbildung 1) [22]. Dieser hat nicht den Status einer nationalen oder internationalen Norm, kann aber als vertragliche Qualitätsvereinbarung beim Erwerb und Vertrieb von Pflanzenölkraftstoff zugrunde gelegt werden. Die darin festgelegten Qualitätskriterien können unterteilt werden in rapsölcharakteristische weitgehend konstante Kenngrößen und in variable Eigenschaften, die durch die Sortenwahl sowie die Produktions- und Lagerungsverfahren beeinflusst werden.

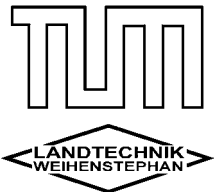


	LTV-Arbeitskreis Dezentrale Pflanzenölgewinnung, Weihenstephan			in Zusammenarbeit mit:  
	Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) 05/2000			
Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min.	max.	
für Rapsöl charakteristische Eigenschaften				
Dichte (15 °C)	kg/m ³	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)	mm ² /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

Abbildung 1: Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) [22]

Für Rapsöl charakteristische Eigenschaften

Die **Dichte** ist weitgehend genetisch fixiert und dient zur Unterscheidung verschiedener Pflanzenöle. Rapsöl weist eine Dichte von nahezu konstant 920 kg/m^3 bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$ auf.

Der **Flammpunkt** ist die Temperatur, bei der entflammbare Dämpfe gebildet werden. Mit zunehmendem Anteil an freien Fettsäuren sinkt der Flammpunkt. Rapsöl besitzt einen Flammpunkt von ca. 230°C , der eine hohe Lagerungs- und Transportsicherheit gewährleistet. Deshalb werden Pflanzenöle im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen keiner Gefahrenklasse gemäß der Verordnung brennbarer Flüssigkeiten (VbF) zugeordnet [31]. Bereits geringe Vermischungen mit ca. 0,5 Masse-% Dieselkraftstoff führen zu einer Unterschreitung des Grenzwerts von $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Deshalb dient der Flammpunkt auch zur Identifizierung von Beimischungen anderer Kraftstoffe. Der höhere Flammpunkt weist auf ein verändertes Siedeverhalten von Pflanzenölen hin. Dies ist durch einen Siedebeginn auf hohem Temperaturniveau (ca. $300\text{-}320 \text{ }^\circ\text{C}$) und ein rasches Siedeende bei ca. $350 \text{ }^\circ\text{C}$ gekennzeichnet.

Der **Heizwert** eines Kraftstoffs beschreibt dessen Energiegehalt. Rapsöl hat einen unteren Heizwert (H_u) von ca. 36000 bis 39000 kJ/kg , mit einem Mittel von ca. 38200 kJ/kg . Der für die motorische Verbrennung relevante volumenbezogene Heizwert ist aufgrund der höheren Dichte des Pflanzenöls mit ca. 35100 kJ/l nur um etwa 2 % geringer als der Heizwert für Dieselkraftstoff mit 35900 kJ/l . Folglich ist der Kraftstoffverbrauch eines Pflanzenölmotors annähernd gleich hoch wie bei Dieselmotoren. Im Gegensatz dazu liegt der volumenbezogene Heizwert von Biodiesel mit ca. 32700 kJ/l etwa 9 % niedriger als bei Dieselkraftstoff.

Die **kinematische Viskosität** beträgt für Rapsöl bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ca. $35 \text{ mm}^2/\text{s}$ und ist damit etwa 10 mal so hoch wie bei Dieselkraftstoff. Eine hohe Viskosität verschlechtert bei nicht umgerüsteten Motoren die Fließ- und Pumpfähigkeit sowie das Zerstäubungsverhalten des Kraftstoffs. Bei Überschreiten des Grenzwerts von maximal $38 \text{ mm}^2/\text{s}$ (bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$) können verstärkt Probleme beim Kaltstart und Ablagerungen an Düsen und Ventilen auftreten. Die Viskosität von Rapsöl nimmt mit steigender Temperatur ab und erreicht erst bei mehr als $100 \text{ }^\circ\text{C}$ den Wert von Dieselkraftstoff. Auch Fettsäuremuster und Ölalterungsgrad haben Einfluss auf die Viskosität, wohingegen sich die Art des Ölgewinnungsverfahrens (Kaltpressung in dezentralen Anlagen, Extraktion und Raffination in zentralen Ölmühlen) nicht auswirkt.

Zur Charakterisierung des **Kälteverhaltens** von Kraftstoffen stehen verschiedene Kennwerte wie Cloudpoint (CP), Cold-Filter-Plugging-Point (CFPP) oder Pourpoint (PP) zur Verfügung. Diese Verfahren sind nicht zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Pflanzenöl geeignet, da der Übergang von der flüssigen in die feste Phase bei verschiedenen Kraftstoffen sehr unterschiedlich verläuft. Ein Prüfverfahren zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Rapsöl mittels eines Rotationsviskosimeters

wird derzeit entwickelt. Unter 3.2 wird noch näher auf das Kälteverhalten von Rapsöl eingegangen.

Ähnlich wie beim Kälteverhalten, ist das für Dieselkraftstoff angewandte Prüfverfahren zur Bestimmung der **Zündwilligkeit** für Pflanzenöl wenig aussagekräftig, da die verwendeten Prüfmotoren nicht pflanzenöлтаuglich sind. Derzeit wird ein neues motorunabhängiges Prüfverfahren, angelehnt an die Ermittlung der Cetanzahl von Schweröl, erprobt.

Der **Koksrückstand** beschreibt die Tendenz eines Kraftstoffs, bei der Verbrennung kohlenstoffhaltige Rückstände zu bilden. Anders als bei Dieselkraftstoff und FAME, bei denen der Koksrückstand durch Verschwelen der letzten 10 % des Destillationsrückstandes bestimmt wird, wird bei Rapsöl die Gesamtprobe verwendet. Rapsöl weist einen Koksrückstand von etwa 0,3 Masse-% auf. Praxiserfahrungen zeigen, dass bei Koksrückständen unter 0,4 Masse-% keine kraftstoffbedingten Betriebsstörungen in pflanzenöлтаuglichen Motoren auftreten.

Die **Iodzahl** ist ein Maß für die mittlere Anzahl an Doppelbindungen der Fettsäuremoleküle und charakterisiert die Art des Pflanzenöls. Pflanzenöle mit großer Iodzahl sind meist weniger alterungsbeständig und neigen deshalb eher zum Verharzen sowie zur Bildung von Ablagerungen im Motor als Pflanzenöle mit hohem Sättigungsgrad. Rapsöl ist bei einer mittleren Iodzahl von ca. 115 g/100g in kühler, dunkler Umgebung und Vermeidung von oxidationsfördernden Bedingungen weitgehend lagerstabil.

Aufgrund des von Natur aus sehr niedrigen **Schwefelgehalts** von Pflanzenöl von weniger als 0,001 Masse-% werden bei der Verbrennung nur geringe Mengen an SO_x und partikelgebundene Sulfate freigesetzt. Daneben sichert schwefelarmer Kraftstoff langfristig hohe Umsetzungsraten von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Aldehydemissionen in Oxidationskatalysatoren. Der Grenzwert für Rapsölkraftstoff wurde deshalb auf maximal 0,002 Masse-% (= 20 mg/kg) festgesetzt.

Variable Eigenschaften von Rapsöl

Die **Gesamtverschmutzung** beschreibt den Massenanteil ungelöster Fremdstoffe (Partikel) im Kraftstoff. Hohe Fremdstoffgehalte im Kraftstoff führen zu Verstopfungen von Filtern, Einspritzdüsen und erhöhen die Gefahr von Schäden an der Einspritzpumpe und Ablagerungen im Brennraum, weshalb dieser Kenngröße eine hohe Bedeutung beizumessen ist. Da der Grenzwert von maximal 25 mg/kg in der Praxis häufig nicht eingehalten wird, kommt es immer wieder zu motorischen Betriebsstörungen, die auf stark verschmutztes Pflanzenöl zurückgeführt werden können.

Die **Neutralisationszahl** oder Säurezahl ist ein Maß für den Anteil freier Fettsäuren im Pflanzenöl. Sie wird beeinflusst vom Raffinationsgrad und dem Alterungsgrad eines Öls. Wasser und Mikroorganismen führen zu einer hydrolytischen Abspaltung von Fettsäuren und damit zu einem Anstieg der Neutralisationszahl. Saure Verbin-

dungen im Kraftstoff führen zu Korrosion, Verschleiß und Rückstandsbildung im Motor. Außerdem besteht die Gefahr, dass saure Komponenten des Kraftstoffs mit dem Motoröl reagieren und dadurch die Motorölstandzeit verkürzen, bzw. Motorschäden verursachen. Deshalb sollte die Neutralisationszahl von Rapsölkraftstoff den Grenzwert von 2,0 mg KOH/g nicht überschreiten.

Die **Oxidationsstabilität** kennzeichnet den Alterungsgrad des Kraftstoffs. Hohe Temperaturen und Sauerstoffeintrag bei der Lagerung beschleunigen den Verderb, der üblicherweise mit einem Anstieg der Viskosität einhergeht. Dabei entstehen unlösliche Verbindungen, die in Filtern und Leitungen zu Verstopfungen führen können. Erfolgt ein Eintrag von vorgealtertem Kraftstoff ins Motoröl, kann es verstärkt zu Wechselwirkungen zwischen Kraftstoff und Motoröl kommen, die die Schmierfähigkeit des Motoröls beeinträchtigen. Die Oxidationsstabilität schwankt sehr stark zwischen verschiedenen Pflanzenölproben und sollte geprüft nach ISO 6886 nicht unter 5 h betragen.

Phosphor liegt in Pflanzenölen in Form von Phospholipiden vor. Neben der oben beschriebenen Hydratisierbarkeit und Minderung der Oxidationsstabilität senkt Phosphor die Verbrennungstemperatur und ist in Ablagerungen im Motor nachweisbar. Da Phosphor wie Schwefel auch als Katalysatorgift wirkt, gilt es, den Gehalt im Kraftstoff möglichst gering zu halten. Der Phosphorgehalt im Pflanzenöl ist abhängig vom Raffinationsgrad oder kann bei nicht raffinierten Pflanzenölen durch entsprechende Prozessführung beim Abpressen unter dem geforderten Wert von 15 mg/kg gehalten werden.

Der **Aschegehalt** beschreibt den Anteil anorganischer Feststoffe, wie z.B. Staub im Kraftstoff. Hohe Aschegehalte können zu Abrasionen in Einspritzsystemen führen. Deshalb sollten Werte von 0,01 Masse-% nicht überschritten werden.

Der **Wassergehalt** von Pflanzenölen wird durch die Feuchte der Ölsaaten beeinflusst, kann auch bei unsachgemäßer Lagerung des Öls ansteigen. Bei niedrigen Temperaturen kann freies Wasser durch Gefrieren zu Filterverstopfungen führen. In Hochdruckeinspritzsystemen besteht zudem die Gefahr, dass freies Wasser zu Schäden an Pumpen und Düsen führt. Darüber hinaus kommt es in Lagergefäßen bevorzugt an der Grenzschicht zwischen Wasser und Kraftstoff zum Wachstum von Mikroorganismen, die wiederum die Ölalterung beschleunigen (Abspaltung freier Fettsäuren), weshalb es verstärkt zu Korrosionen kommen kann.

Tabelle 2: Vergleich wichtiger Eigenschaften von Dieselkraftstoff und Rapsöl

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
kin. Viskosität (40 °C)	[mm ² /s]	3,2	33,1
Flammpunkt	[°C]	68	230
CFPP-Wert	[°C]	-7	+5 ⁴⁾
Schwefelgehalt	[%]	0,035	<0,001
Cetanzahl	--	51,5	~ 39 ⁴⁾
Heizwert H _u	[kJ/g]	42,7	36-39

¹⁾ klimatisch abhängige Anforderungen: gemäßigtes Klima

²⁾ nach bisher gültiger DIN 51 601

³⁾ CFPP Klasse B

⁴⁾ Werte sind mit Dieselmkraftstoff nicht direkt vergleichbar, da Methode für Mineralöle

Wie aus Tabelle 2 zu ersehen ist, unterscheidet sich Rapsöl in wesentlichen Eigenschaften vor allem hinsichtlich Viskosität und Flammpunkt von Dieselmkraftstoff, so dass ein Einsatz in konventionellen Dieselmotoren wegen z.T. unzureichender Pumpfähigkeit, ungenügender Zerstäubung, unvollständiger Verbrennung oder verstärkter Rückstandsbildung dauerhaft nicht möglich ist. Aus diesen Gründen ist also entweder eine chemische Veränderung des Pflanzenöls, wie bei der Umesterung zu Fettsäuremethylester (Biodiesel) oder eine Anpassung der Motorentechnik an die Anforderungen des Pflanzenöls erforderlich.

2.3 Pflanzenölmotor

Wie bei konventionellen Dieselmotoren werden auch bei Pflanzenölmotoren direkt-einspritzende Verfahren (DI) und indirekt einspritzende Verfahren mit einer Vor- oder Wirbelkammer (IDI) unterschieden. Insbesondere bei den direkt einspritzenden Motoren, kann weiterhin zwischen speziell für Pflanzenöl entwickelten oder weiterentwickelten Motoren und umgerüsteten Serienmotoren unterschieden werden [16].

Beim **Vor- und Wirbelkammerverfahren** verläuft die Verbrennung in zwei Stufen. Zunächst wird der Kraftstoff in der Nebenkammer teiloxydiert. Durch den dabei entstehenden Druck strömt der Kammerinhalt in die Hauptkammer. Dort wird das Gemisch mit der sich darin befindlichen Luft stark verwirbelt, wodurch sich die Verbrennung fortsetzt. Aufgrund des großvolumigen Brennraums, der starken Verwirbelung des Kraftstoff/Luft-Gemisches und der längeren Verweilzeit des Kraftstoffs in der Brennkammer sind Vor- und Wirbelkammermotoren meist besser für die Verbrennung von Pflanzenöl geeignet, als direkteinspritzende Motoren.

In der Praxis wurden verschiedene Umrüstetechniken realisiert. Traktoren mit luftgekühlten Wirbelkammermotoren der Firma Deutz waren bereits Ende der 80er Jahre mit dem sogenannten Dual-Brennstoffsystem erhältlich. Dabei wird das Fahrzeug mit einem zusätzlichen Tank ausgestattet. Der Startvorgang erfolgt mit Dieseldieselkraftstoff. Sobald die Betriebstemperatur erreicht ist, wird auf Pflanzenöl umgeschaltet. Vor dem Abstellen des Motors ist wieder auf Dieseldieselkraftstoff umzustellen, damit die Einspritzleitungen und Düsen gespült und für den neuen Startvorgang mit Dieseldieselkraftstoff gefüllt sind. Auch Stationärmotoren für Blockheizkraftwerke wurden mit dem Dual-Brennstoffsystem angeboten. Ähnliche Systeme, z.T. zusätzlich mit einer Kraftstoffvorheizung ausgerüstet, sind heute zur Umrüstung konventioneller Dieselmotoren v.a. für Pkw aber auch für Nutzfahrzeuge erhältlich.

Als pflanzenöлтаuglich ohne eigenen Startkraftstoff gelten auch großvolumige, wassergekühlte indirekt einspritzende Motoren der Motorenfabrik Mannheim (MWM), die im Untertagebetrieb eingesetzt werden. Diese werden allerdings heute nicht mehr gebaut. Pflanzenöлтаugliche Vorkammermotoren, die ohne zweiten Kraftstoffkreislauf betrieben werden können, sind mittlerweile weit verbreitet und überwiegend als umgerüstete Seriedieselmotoren für Pkw oder auch für BHKW realisiert.

Speziell für Pflanzenöl entwickelte oder weiterentwickelte **direkteinspritzende Motoren** gewährleisten durch einen größer gestalteten Brennraum, z.B. durch Brennmulden im Kolben oder Zylinderkopf, eine verbesserte Brennstoff/Luft-Verteilung. Ebenso sind speziell entwickelte direkteinspritzende Pflanzenölmotoren häufig durch

eine besondere Materialauswahl von Kolben und Zylinder und die Verwendung von Einlochdüsen gekennzeichnet.

Der wohl bekannteste pflanzenölaugliche Motor mit Direkteinspritzung arbeitet nach dem Duotherm-Verfahren von Ludwig Elsbett. Dabei wird der Kraftstoff mit einer (bei größeren Motoren mit zwei) Einloch-Zapfendüse mit variablem Querschnitt tangential in eine im Kolben befindliche halbkugelförmige Brennmulde eingespritzt. Rotationskräfte sorgen dafür, dass die kältere schwerere Luft am Außenbereich des entstehenden Gemischwirbels ein zum Kolben hin isolierendes Luftpolster bildet. Im Innern entsteht dagegen durch die sich dort ansammelnde leichtere heiße Luft eine zentrale heiße Brennzone. Ein geteilter Gelenkkolben mit einem Stahl- oder Graugussoberteil dichtet den Brennraum gut zum Zylinder hin ab und minimiert die Wärmeverluste. Die Wärmeabfuhr erfolgt über den spritzölgekühlten Aluminium-Gleitschuh.

Der Pflanzenölmotor der Firma AMS, Antriebs- und Maschinentechnik, Schönebeck ist eine eigene Weiterentwicklung einer ursprünglichen Lizenz am Duotherm-Verfahren von Elsbett. Die Konstruktionsmerkmale sind im Wesentlichen ähnlich dem Elsbett-Motor. Haupteinsatzbereiche für den AMS-Motor sind stationäre Anwendungen, wie z.B. Blockheizkraftwerke.

Ein weiterer direkt einspritzender Motor für Pflanzenölkraftstoffe ist die Entwicklung der Firma AAN, Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH. Hauptmerkmale hier sind auch eine halbkugelförmige Brennmulde im Kolben und die Verwendung von Zapfendüsen. Der Ferrotherm-Kolben wurde zusammen mit der Firma Mahle GmbH, Stuttgart entwickelt.

Eine etwas andere Bauform weist die Entwicklung von Willy Mahler (Schweiz) auf. Der Brennraum ist dabei in den Zylinderkopf hinein erweitert, wodurch der Kolben weniger belastet wird. Der mit zwei Einspritzdüsen ausgestattete Mahler-Motor befindet sich derzeit noch in Erprobung.

Neben den speziell für Pflanzenöl konstruierten Motoren, sind derzeit auch immer mehr **Umrüstungen** von seriengefertigten Vorkammermotoren und Motoren mit Direkteinspritzung für den Einsatz von Pflanzenöl erhältlich. Die angebotenen Umrüsttechnologien sind sehr vielfältig und je nach Motortyp sowie Konzept der Umrüstung und Qualität der Ausführung mehr oder weniger aufwendig. Eine vergleichende Untersuchung und Bewertung der verschiedenen Umrüstkonzepte liegt nicht vor. Neben den bereits beschriebenen Systemen mit Startkraftstoff, die teilweise auch für direkt einspritzende Motoren angeboten werden, sollen nachfolgend die wichtigsten Maßnahmen zur vollständigen Umrüstung genannt werden, ohne dabei aber auf technische Details einzugehen oder eine Wertung der Maßnahmen durchzuführen.

Damit für einen Motorkaltstart ausreichend Kraftstoff an den Einspritzdüsen zur Verfügung steht, sind eine ausreichende Pumpenleistung und genügend große Leitungsquerschnitte erforderlich. Insbesondere die bei kleineren Serien-Pkw-

Motoren mit Verteilereinspritzpumpen verwendeten Flügelzellenpumpen sind unterhalb von ca. +10 °C aufgrund der höheren Viskosität oft nicht in der Lage, Pflanzenöl in der erforderlichen Menge aus dem Tank zur Einspritzpumpe zu fördern [20]. Um dem entgegenzuwirken, kann eine zusätzliche Kraftstoffförderpumpe den notwendigen Kraftstoffvordruck sicherstellen oder Filter- und Leitungsvorwärm-einrichtungen einen besseren Kraftstofffluss in den Leitungen gewährleisten.

Besonders für die Startphase ist es wichtig, dass das Pflanzenöl bei der Einspritzung fein zerstäubt und mit der Luft im Brennraum stark verwirbelt wird. Einspritzdüsen mit spezieller Düsengeometrie, veränderte Einspritzwinkel und die Erhöhung des Einspritzdrucks können zu einer besseren Zerstäubung des Pflanzenöls beitragen. Der Einsatz von Zapfendüsen ist bei Pflanzenölmotoren weit verbreitet und hat sich v.a. hinsichtlich einer geringen Verkokungsanfälligkeit besser bewährt als Mehrlochdüsen.

Eine Vorwärmung des Kraftstoffs unmittelbar vor der Einspritzung an den Einspritzdüsen verringert die Viskosität des Pflanzenöls und führt meist zu einer verbesserten Zerstäubungsqualität. Allerdings ist vorgewärmtes Pflanzenöl irreversibel vorgealtert und neigt zum Verharzen. Deshalb sollte eine übermäßige Erwärmung des Kraftstoffs unbedingt vermieden und einmal vorgewärmter Kraftstoff möglichst umgehend verbrannt werden. Vorteilhaft ist deshalb die Rückführung des Leckkraftstoffstroms nicht zurück in den Tank, sondern über eine Rückführeinrichtung (mit Filter und Entlüftungseinheit) wieder in den Kraftstoffvorlauf.

Elektrisches Vorheizen des Motorkühlwassers ist vor allem bei Stationärmotoren ein probates Mittel zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens.

Auch die geometrische Ausrichtung der Vorglüheinrichtung hat Einfluss auf das Kaltstart- und Warmlaufverhalten. Insbesondere bei Pflanzenöl ist es vorteilhaft, wenn der Kraftstoffstrahl möglichst nah an die heißen Zonen in Glühstiftnähe gelangt, um leichter verdampfen zu können. Für eine gute Anströmung der Glühkerze ist die Einbaulage der Glühkerze mit der Ausrichtung des Einspritzstrahls abzustimmen. Zusätzlich kann durch direktes Auftreffen des Kraftstoffs auf die Glühkerze eine bessere Gemischaufbereitung und damit eine bessere Selbstentzündung erreicht werden. Sowohl längere Vorglühzeiten als auch längere Nachglühzeiten begünstigen ein besseres Kaltstart- und ruhigeres Warmlaufverhalten von Pflanzenölmotoren und tragen zur Verbrauchsminderung und zur Unterdrückung von teiloxidierten Zwischenprodukten, z.B. Aldehyden, Kohlenwasserstoffen und somit unter Umständen zur Geruchsminderung der Motorabgase bei. Aufgrund der bei diesen Maßnahmen im Allgemeinen stärker beanspruchten Glühkerzen ist auf eine gute Qualität mit ausreichender Lebensdauer zu achten.

Durch eine Vorverlegung des Förderbeginns der Einspritzpumpe kann der Selbstzündvorgang verlängert werden, um die bei höheren Temperaturen verdampfenden komplexen Pflanzenölmoleküle möglichst vollständig zu oxidieren.

Bei einer Umrüstung ist ferner darauf zu achten, dass die am Motor vorhandenen kraftstoffführenden Komponenten (v.a. Einspritzpumpe, Dichtungen, Leitungen etc.) beständig gegenüber dem Langzeiteinsatz von Pflanzenöl, bzw. dem Wechselbetrieb mit Dieseldieselkraftstoff und Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel) sind. Die Auswahl von technisch ausgereiften Motorbauteilen, von bester Verarbeitungsqualität ist in Hinblick auf die allgemein stärkere Beanspruchung der Materialien (höhere Viskosität) empfehlenswert. Unbedingt zu vermeiden sind die Verwendung von katalytisch wirksamen Materialien wie z.B. Kupfer, bzw. kupferhaltige Legierungen (z.B. Messing).

Da die Verbrennungstemperaturen mit Pflanzenöl im Allgemeinen etwas höher sind (z.T. höhere Vollastleistungen mit Pflanzenöl als mit Dieseldieselkraftstoff durch im Pflanzenölmolekül enthaltenen Sauerstoff und typisches Siedeverhalten von Pflanzenöl), ist eine ausreichende thermische Stabilität v.a. von Kolben- und Zylinder, bzw. eine angemessene Kühlung zu gewährleisten.

Ein pflanzenöлтаuglicher Motor sollte auch weiterhin zumindest für mobile Einsatzzwecke mit Dieseldieselkraftstoff betrieben werden können. Dies wird üblicherweise von den Umrüstfirmen garantiert. Bei der Verwendung von Vorwärmanrichtungen für Pflanzenöl muss berücksichtigt werden, dass eine übermäßige Erwärmung von Dieseldieselkraftstoff zu vermeiden ist. Deshalb sind entweder Kraftstoffheizungen auf niedrigem Temperaturniveau zu begrenzen oder müssen bei Dieseldieselbetrieb abgeschaltet, bzw. durch Kraftstofferkennungssysteme umgangen werden.

Werden Fahrzeuge umgerüstet, so ist zu prüfen, ob die allgemeine Betriebserlaubnis durch die Umrüstmaßnahmen weiterhin bestehen bleibt oder nicht.

Grundsätzlich können pflanzenöлтаugliche Motoren sowohl mobil v.a. in Pkw und Nutzfahrzeugen, als auch stationär in Antriebs- und Stromaggregaten sowie Blockheizkraftwerken verwendet werden.

2.4 Aufbau von Pflanzenöl-BHKW

Der Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff in Blockheizkraftwerken mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren verbindet die Umweltvorteile des erneuerbaren Energieträgers Pflanzenöl mit dem hohen Gesamtwirkungsgrad bei der dezentralen Strom- und Wärmeabgewinnung.

Ein Blockheizkraftwerk besteht aus einem oder mehreren BHKW-Modulen mit den notwendigen Hilfseinrichtungen, Schalt- und Steuerungseinrichtungen, Schallschutzdämmung, Abgasabführung sowie dem Aufstellungsraum. Hauptbestandteil eines BHKW-Moduls ist das BHKW-Aggregat, das sich aus dem Verbrennungsmotor und

dem Generator mit den entsprechenden Kraftübertragungs- und Lagerungselementen zusammensetzt. Weitere wesentliche Bestandteile eines Moduls sind Wärmeüberträger sowie Einrichtungen zur Steuerung, Regelung und Überwachung. Hinzu kommen Komponenten des Ansaug- und Abgassystems, der Kraftstoffzuführung, Anlasser und dergleichen. Eine ausführliche Beschreibung der Systemkomponenten sowie von Leistung, Wirkungs- und Nutzungsgraden wird in der VDI-Richtlinie 3895 vorgenommen [27].

Die mechanische Energie des Motors wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die entstehende Abwärme aus den Kühlkreisläufen und dem Motorabgas wird über Wärmeübertrager und ein Wärmeverteilungsnetz dem Verbraucher zugeführt. Blockheizkraftwerke sind meist auf den Wärmebedarf ausgelegt und werden parallel zum elektrischen Netz betrieben. Daneben können sie auch stromgeführt zur völligen oder teilweisen Inselversorgung eingesetzt werden, wo sie Stromaggregate ersetzen oder ergänzen. Entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb ist eine sorgfältige Einbeziehung der Wärmeverbraucher in das Gesamtsystem. Bei zu groß dimensionierten Anlagen führt eine unzureichende Wärmenutzung zu bedeutenden ökonomischen Einbußen.

Kraftstoffsystem

Der Kraftstoff wird für leistungsstärkere BHKW meist in größeren Lagerbehältern, die entweder unter- oder oberirdisch aufgestellt sind, bevorratet. Je nach den örtlichen Gegebenheiten erfolgt eine Zwischenlagerung des benötigten Kraftstoffs in einem zentralen Tagestank in Aggregatsnähe. Die Befüllung des Tagestanks wird automatisch über eine entsprechende Füllstandsregelung mit Pumpeinrichtung vorgenommen. Bei BHKW mit geringem Kraftstoffverbrauch dienen oft Tankbehälter mit bis zu ca. 1000 l Fassungsvermögen wechselweise zur Kraftstofflagerung und -versorgung. Die Kraftstoffzuführung besteht im Wesentlichen aus Rohr- und Schlauchleitungen, Druckregelventilen, Kraftstoffvorfilter, Förderpumpe, Kraftstofffilter, Einspritzpumpe und Einspritzdüsen. Bei der Verwendung von Pflanzenöl als Kraftstoff sind insbesondere bei der Kraftstoffversorgung die spezifischen Anforderungen des Pflanzenöls an die Materialauswahl und Dimensionierung der Komponenten zu berücksichtigen. Wichtige Hinweise dazu geben die Kapitel 3.2 und 3.3.

Motor

Für BHKW-Anwendungen stehen derzeit mehrere pflanzenöлтаugliche Motoren zur Verfügung. Kleinere BHKW mit einer Leistung bis zu etwa 25 kW_{el} werden meist mit umgerüsteten herkömmlichen Stationärdieselmotoren betrieben. Bewährt haben sich unter anderem 3- und 4-Zylinder-Vorkammermotoren der Hersteller Kubota und Farymann in einem Leistungsspektrum von ca. 8-35 kW mechanischer Leistung. Pflanzenölmotoren für mittlere und größere BHKW bis zu einer elektrischen Leistung von

ca. 400 kW werden von den Firmen Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH, AAN (früher: TMW) und Antriebs- und Maschinentechnik Schönebeck, AMS (früher: DMS) in der Regel mit Direkteinspritzung z.T. auf Basis von MAN-Motoren angeboten. Die früheren Anbieter von BHKW-Motoren Elsbett und VWP haben sich derzeit aus diesem Marktsegment zurückgezogen. Eine Liste von Motorenherstellern für Pflanzenöl-BHKW und auch für mobile Anwendungen enthält Tabelle 10 (Seite 59). Darüber hinaus gibt es noch weitere Anbieter, die entweder Lizenznehmer der aufgeführten Motorenhersteller sind oder Aggregate dieser Firmen vertreiben. Aufgrund der momentan sehr großen Dynamik im Markt von Pflanzenölmotoren, erhebt diese Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit.

Luft- und Abgassystem

Die Verbrennungsluft wird entweder von Außen oder aus dem BHKW-Gebäude (gute Belüftung vorausgesetzt) dem Motor über einen Luftfilter zugeführt. Je nach Größe und Konzeption sind BHKW-Motoren entweder als Saugmotoren oder als aufgeladene Motoren mit Turbolader ausgeführt.

Zur nachmotorischen Minderung der Abgasemissionen sind für den Dieselmotor die Abgasrückführung und Abgasreinigungssysteme wie Oxidationskatalysatoren, Entstickungskatalysatoren und Partikelabscheidesysteme (sogenannte Rußfilter) verfügbar.

Bei der **Abgasrückführung** wird dem Abgas des Motors ein definierter Teilstrom entnommen und der Ansaugluft beigemischt. Dies führt zu einer Verminderung des Sauerstoffgehalts und niedrigeren Temperaturen im Brennraum, wodurch NO_x -Reduktionsraten zwischen 40 und 80 % erreicht werden können. Mit zunehmender Abgasrückführungsrate bewirkt jedoch der geringere Sauerstoffanteil bei der Verbrennung einen Anstieg der Rußemissionen.

Oxidationskatalysatoren setzen die Energieschwelle für die Einleitung von Oxidationsreaktionen herab und erhöhen gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit. Dem Beginn solcher Reaktionen geht die Anlagerung der oxidierbaren Stoffe wie CO und HC und des Sauerstoffs an der katalytisch aktiven Schicht voraus, an der die Molekülbindungen gelockert werden. Der optimale Arbeitsbereich für die bis zu mehr als 90 %ige Umsetzung der CO- und HC-Emissionen liegt bei ca. 200-350 °C.

Oxidationskatalysatoren eignen sich besonders gut für den Einsatz von schwefelarmen Kraftstoff wie Pflanzenöl, weil dadurch hohe Umsetzungsraten schädlicher Abgaskomponenten dauerhaft erzielt werden können. Insbesondere werden auch Aldehyde, zu denen Stoffe gehören, die für die pflanzenöltypischen Gerüche verantwortlich gemacht werden, durch Oxidationskatalysatoren um über 80 % reduziert. Aus diesen Gründen ist der Einsatz von Oxidationskatalysatoren für alle pflanzenölbetriebenen BHKW unbedingt zu fordern.

Mithilfe eines **Entstickungskatalysators** können Stickstoffoxide wirkungsvoll reduziert werden. Dabei wird vor dem Katalysator ein Reduktionsmittel (Ammoniak-, bzw. Harnstoff-Wasser, ggf. auch Kohlenwasserstoffe) in flüssigem oder gasförmigem Zustand dem Rauchgasstrom über ein Düsensystem zugeführt. Die Einspritzmenge richtet sich beim SCR-Katalysator nach der aktuellen NO_x -Rate im Abgas, der Temperatur und dem Aufbau des Katalysators. Die Arbeitstemperatur des Katalysators liegt zwischen 250 und 450 °C. Dabei werden Umsetzungsraten bis über 90 % erreicht. Aufgrund der aufwendigeren Technik werden SCR-Katalysatoren derzeit v.a. bei größeren Motoren (in der Regel Motoranlagen $> 1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$) eingesetzt. Bei einer weiteren Verschärfung der Abgasgesetzgebung hinsichtlich der NO_x -Emissionen wird der Einsatz von Entstickungsmaßnahmen auch bei kleineren Motoren bald unumgänglich sein.

Zur Reduzierung von NO_x -Emissionen im Abgas von Dieselmotoren hat sich neben den nachmotorischen Maßnahmen auch das Wasser-/Kraftstoff-Emulsionsverfahren (Wassereindüsung) als motorische Maßnahme bewährt. Hierbei wird dem Kraftstoff vor der Verbrennung ein Anteil zwischen ca. 10 % und max. ca. 40-50 % Wasser zugesetzt. Die NO_x -Emissionen lassen sich damit max. um ca. die Hälfte der ursprünglichen Motoremissionen mit reinem Kraftstoff ohne Wasseranteil reduzieren. Erfahrungen beim Einsatz mit Pflanzenöl liegen bislang nicht vor.

Mit **Partikelfiltern** lassen sich bei Selbstzündungsmotoren Partikel-Abscheideraten von 90 % und mehr erreichen. Insbesondere können auch die als stark gesundheitsgefährdend einzustufenden Feinstaubpartikel aus Verbrennungsmotorabgasen deutlich reduziert werden. Neben einer hohen Abscheiderate sind gleichzeitig gute Dauerbeständigkeit, hohe spezifische Speicherfähigkeit, Unempfindlichkeit gegenüber Überlastung und Thermoschock, geringe Verstopfungsneigung und gutes Abgasgegendruckverhalten zu fordern. Mit zunehmender Betriebszeit verringern die zurückgehaltenen Partikel den Filterquerschnitt und erhöhen den Abgasgegendruck. Damit der Filter nicht verstopft, ist von Zeit zu Zeit oder bei Erreichen eines bestimmten Abgasgegendrucks eine Regenerierung des Rußfilters notwendig. Bei Stationärmotoren erfolgt die Regeneration oft durch aktives Abbrennen des Rußes z.B. durch Eindüsung von Propangas in den Abgasstrom. Darüber hinaus sind im Rußfiltereinsatz abgelagerte unverbrennbare Inertanteile des Abgasstroms von Zeit zu Zeit durch Waschen bzw. Ausblasen mit Druckluft zu entfernen.

Die Abgasableitung wird durch einen Kompensator mit dem Abgasrohr des BHKW verbunden, damit Schwingungen nicht übertragen werden, und Temperaturschwankungen nicht zu Materialschäden, wie Rissen an den Abgasrohren, Schalldämpfern und Wärmeübertragern führen.

Der Abgasstrom kann, sofern nach der Bayerischen Bauordnung (BayBO) [5] und Feuerungsverordnung – (FeuV) [32] zulässig, in einen bestehenden Kamin eingeleitet werden. Ansonsten ist eine möglichst isolierte Abgasableitung entsprechend den Vorgaben der TA Luft über Firsthöhe anzubringen, um einer Kondensatbildung im Kamin vorzubeugen und eine effektive Abführung des Abgases zu gewährleisten. Werden Abgasrohre zur Abgasableitung verwendet, so sollten diese aus Edelstahl sein, um Korrosionen zu verhindern. Eine Kondensatsammelstelle mit Ablassschraube zur Entfernung von Kondensat und eingedrungenem Regenwasser ist an der tiefsten Stelle des Abgasstrangs vorzusehen.

Generator und elektrische Einbindung

Die mechanische Energie des Motors wird im Generator zu Strom umgewandelt. Um ein BHKW unabhängig vom Netz z.B. als Notstromaggregat betreiben zu können, ist ein Synchrongenerator erforderlich. Eine Synchronisierungseinrichtung sorgt dafür, dass vor dem Aufschalten auf das Netz Spannung, Frequenz und Phase von Generator und Netz weitgehend übereinstimmen. Im Gegensatz zu Synchrongeneratoren sind Asynchrongeneratoren meist robuster, wartungsärmer und im unteren Leistungsbereich auch kostengünstiger. Da Asynchrongeneratoren ihre Erregerblindleistung aus dem Netz beziehen, sind sie nicht im Inselbetrieb einsetzbar.

Die elektrische Netzanbindung kann bis zu einer installierten elektrischen Leistung von ca. 1 MW an das vorhandene Niederspannungsnetz erfolgen. Bei größeren Anlagen wird meist in ein Mittelspannungsnetz eingespeist. Nur in seltenen Fällen ist eine eigene Leitung zum nächsten Netzknotenpunkt oder eine Trafostation notwendig, da die vorhandenen Kapazitäten in der Regel ausreichen. Die Bedingungen werden für den jeweiligen Fall von dem zuständigen Energieversorgungsunternehmen festgelegt.

Wärmeübertrager und thermische Einbindung

Ein Wärmeübertrager oder Wärmetauscher überträgt Wärmeenergie eines heißen Fluidstroms über eine wärmeleitende Heizfläche auf einen kälteren Fluidstrom. Die übertragene Wärmemenge soll möglichst groß sein, die Übertragung soll auf kleinster Fläche und bei minimalem Druckverlust der Medien stattfinden. Neben diskontinuierlich durchflossenen Wärmeübertragern (Regeneratoren) kommen bei BHKW vorwiegend kontinuierlich durchflossene Wärmeübertrager, sogenannte Rekupatoren zum Einsatz. Rekupatoren unterscheiden sich nach ihrer Arbeitsweise in Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstromwärmeübertrager. Je nach Anforderung kommen verschiedene Bauarten wie Rohrbündel-, Platten-, Taschen- und Spiralrohrwärmeübertrager zum Einsatz. Bei BHKW kann Wärmeenergie der Ladeluft (bei aufgeladenen Motoren), des Generatorkühlwassers, des Motorkühlwassers, des Motoröls oder des Motorabgases durch in Reihe geschaltete Wärmeübertrager ins

Heizwasser übertragen werden. Daneben findet die Wärmeauskopplung auch manchmal in zwei getrennten Heizkreisen statt, um z.B. in einem Heizkreislauf ein höheres Temperaturniveau zu bekommen. Betriebsbedingte Ablagerungen an den Wärmeübertragern (z.B. Ruß im Abgaswärmeübertrager, Kalk im Kühlwasserwärmeübertrager) erfordern von Zeit zu Zeit eine Reinigung der Wärmetauscherflächen, um die Wärmeübertragung nicht zu beeinträchtigen. Neben dem Bestreben die Wärmeverluste zu minimieren sind saubere und richtig dimensionierte Wärmeübertrager für die effektive Abfuhr der Motorabwärme erforderlich und tragen damit wesentlich zur Betriebssicherheit der Anlage bei.

Abgaswärmeübertrager können zum einen so ausgeführt sein, dass ein regelmäßiges Abkehren der Tauscherflächen mit einer Rußbürste z.B. ca. alle 1000 Bh erforderlich ist, zum anderen gibt es Bauarten, die selbstreinigend sind (z.B. Kugelregen- bzw. Kettenzugsysteme oder Dampfblasen). Die Entfernung des Rußes kann bei selbstreinigenden Wärmeübertragern auch kontinuierlich erfolgen, beispielsweise durch eine im Abgasstrom fibrierende Metallwendel. Auch bei der Verwendung von Rußfiltern mit hohen Partikelabscheidegraden ist eine Reinigung des nachgeschalteten Abgaswärmeübertragers etwa einmal jährlich empfehlenswert, sofern keine selbstreinigende Bauart verwendet wird.

Geschlossene und halboffene Kühlwasserkreisläufe mit **Wasserwärmeübertragern**, enthalten oft eine Vielzahl von metallischen Werkstoffen. Die gleichzeitige Anwesenheit von Stahl, Kupfer, Kupferlegierungen und Aluminium führt zu Korrosionen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, im Wasserkreislauf Inhibitoren einzusetzen, die die eingesetzten Werkstoffe vor Korrosionen schützen. Meist werden dafür kombinierte Frost- und Korrosionsschutzmittel eingesetzt. Für eine ausreichende antikorrosive Wirkung dieser Wasserzusätze ist es erforderlich, die geforderte untere Konzentrationsgrenze im Wasser nicht zu unterschreiten. Bei Anlagen, bei denen häufig Kühlwasser nachgefüllt werden muss, ist deshalb der Gehalt an Korrosionsschutzmittel regelmäßig zu kontrollieren, um eine zu starke Verdünnung zu vermeiden. Die Frostschutzeigenschaften werden im Allgemeinen über eine Dichtemessung (Spindel) ermittelt, der Korrosionsschutz kann mit speziellen Testkits überprüft werden. Zusätzliche Wirkstoffe im Frost- und Korrosionsschutz sind häufig auch Dispergatoren, die bei Wasser mit hohem Härtegrad die Bildung von Ablagerungen verhindern und so für saubere Wärmetauscherflächen sorgen.

Um nach Abstellen des Motors Hitzestau am Aggregat zu vermeiden, ist ein Pumpennachlauf erforderlich um überschüssige Wärme abzuführen. Gleiches gilt entsprechend für die Ventilatoren der Kabinenbelüftung.

Wird ein Spitzenlastkessel zusätzlich zum BHKW betrieben, so ist darauf zu achten, dass Ventile im Wasserleitungssystem integriert sind, die bei Stillstand des Aggregats einen Wasserdurchfluss des Aggregats verhindern, da sonst eine erhebliche Wärmemenge des Kesselheizwassers über die Wärmeübertrager an das BHKW ab-

gegeben wird. Neben den auftretenden Verlusten führt dies mitunter auch zu einer hohen thermischen Belastung des Aggregats.

BHKW werden meist wärmegeführt betrieben und dienen zur Deckung des Grundwärmebedarfs. Zusätzlich installierte Spitzenlastkessel werden zugeschaltet, wenn die eingetauschte Motorabwärme nicht mehr die nötige Vorlauftemperatur im Heizkreislauf liefert. Um tageszeitliche Schwankungen zwischen Strom- und Wärmebedarfsspitzen ausgleichen zu können, werden Wärmespeicher eingesetzt. Aus diesen Pufferspeichern heraus decken die Wärmeverbraucher ihren Wärmebedarf. Erst wenn die eingestellte Temperatur der Pufferspeicher nicht mehr mit dem BHKW gedeckt werden kann, schaltet sich der Spitzenlastkessel zu. Die Auslegung der Speicher hängt von der thermischen Leistung des BHKW, vom Wärmebedarf und der nutzbaren Temperaturdifferenz ab. So beträgt die maximal zulässige Rücklauftemperatur zum BHKW je nach Anlage etwa 60-70 °C, um eine ausreichende Motorkühlung zu gewährleisten.

2.5 Planung von Pflanzenöl-BHKW

2.5.1 Planung und Auslegung

Für die Planung und Auslegung von Pflanzenöl-BHKW gelten prinzipiell die gleichen Grundsätze, wie für Aggregate, die mit Dieseldieselkraftstoff betrieben werden. Diese werden in der VDI-Richtlinie 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungskraftmaschinen“ beschrieben. Lediglich bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind hinsichtlich Investitions- und Brennstoffkosten, sowie für die erzielbaren Erlöse bei der Stromeinspeisung, von Dieselaggregaten abweichende Annahmen zu treffen. Diese werden in Kapitel 2.7 näher erläutert. Gemäß VDI 3985 [27] ist es Aufgabe der Planung, „in Zusammenarbeit mit dem Betreiber die erforderlichen Grundlagen für die Auslegung von Blockheizkraftwerken zu erarbeiten und auf dessen Basis Konzepte zu erstellen.“ Dazu zählen u. a.:

- Durchführung einer Voruntersuchung, Bedarfsanalyse und Bestandsaufnahme
- Erstellung von BHKW-Konzepten (Modulvorauswahl, Betriebsweise)
- Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der Konzepte
- Vorplanung und Entwurfsplanung auf Grundlage einer Vorentscheidung
- ggf. Vorgespräche mit der Genehmigungsbehörde (Kreisverwaltungsbehörde)
- Ausführungsplanung und Erstellung von Ausschreibungsunterlagen sowie Leistungsverzeichnissen
- Gegebenenfalls Einholung eines immissionsschutztechnischen Gutachtens

Ob ein BHKW wirtschaftlich betrieben werden kann, hängt entscheidend von der gewählten Leistung ab. Bei Aggregaten, die nicht vorwiegend zur netzunabhängigen Stromversorgung eingesetzt werden, sollte die Auslegung so erfolgen, dass die anfallende Wärme in großem Umfang genutzt werden kann.

Grundlage für die Auslegung bildet eine Analyse eines Jahresverlaufs des Wärmeleistungsbedarfs. In einer geordneten thermischen Jahresdauerlinie wird aufgetragen, wie viele Stunden pro Jahr eine bestimmte thermische Leistung in kW benötigt wird. Als Richtgröße sollte die thermische Gesamtleistung des BHKW im Allgemeinen etwa 30 % der notwendigen thermischen Spitzenleistung abdecken. So wird sichergestellt, dass durch das BHKW etwa 60-80 % des Jahreswärmebedarfs bei 4000 bis 6000 Jahresstunden abgedeckt sind [14]. Zusätzlich zu erfassende Tagesganglinien des Strom- und Wärmeleistungsbedarfs geben Aufschluss darüber, inwieweit der Strom- und Wärmebedarf zeitlich übereinstimmen. Sind Wärmeverbrauchswerte nicht bekannt oder erfassbar, so kann der Wärmebedarf auch berechnet und eine verbraucherspezifische Jahresdauerlinie zugrunde gelegt werden. Verschiedene BHKW-Konzeptionen lassen sich mit Hilfe der VDI 2067 [29] "Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung" kalkulieren und miteinander vergleichen.

Um die erforderliche thermische Leistung abzudecken, werden häufig mehrere Module eingesetzt, die bei Bedarf nacheinander zugeschaltet werden können. Daraus ergibt sich eine bessere Optimierungsmöglichkeit der Gesamtanlage mit längeren Laufzeiten der Einzelaggregate bei Nennlast. Ein Teillastbetrieb der Aggregate ist wegen des sinkenden elektrischen Wirkungsgrads und der schlechteren motorischen Verbrennung zumindest im Netzparallelbetrieb nicht anzustreben. Zudem sprechen die höhere Versorgungssicherheit beim Ausfall eines Aggregats z.B. bei Störung oder Wartung für die Modulbauweise. Demgegenüber ist zu berücksichtigen, dass Reparatureingriffe bei mehreren Aggregaten insgesamt häufiger notwendig sind und auch die Investitionskosten beim Einsatz mehrerer Aggregate im Allgemeinen höher ausfallen, als bei einem Aggregat mit entsprechend größerer Leistung. Dennoch können verschiedene Anlagenbauteile wie beispielsweise Kraftstofftanks, Steuerungs- und Regelungseinheiten, Abgasleitungen auch für mehrere Aggregate genutzt werden.

2.5.2 Betriebsweise

BHKW werden entweder wärmegeführt, stromgeführt oder in einer Kombination daraus betrieben.

Ein **wärmegeführtes BHKW** richtet sich nach dem Wärmebedarf der Verbraucher. Zusätzliche Wärmeerzeuger können das Aggregat bei der Deckung des momenta-

nen Wärmebedarfs unterstützen. Der produzierte elektrische Strom wird ganz oder teilweise (abzüglich des Eigenverbrauchs) in das Stromnetz eingespeist.

Stromgeführte BHKW versorgen im Netzparallelbetrieb, bei Bedarf unterstützt durch das öffentliche Netz, die Verbraucher; im Inselbetrieb decken sie den Leistungsbedarf der Verbraucher alleine. Dabei sollte ein möglichst großer Teil der anfallenden Wärme genutzt werden. Gegebenenfalls können mit entsprechenden Wärmespeichern zeitliche Verschiebungen von Strom- und Wärmebedarf zumindest teilweise ausgeglichen werden.

Bei einer **kombinierten Betriebsweise** wird das Aggregat z.B. wärmegeführt betrieben und zusätzlich zur Spitzenstromabdeckung eingesetzt. Die Auswahl der Betriebsweise erfolgt in erster Linie nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

2.5.3 Einsatzgebiete

Einsatzgebiete für Pflanzenöl-BHKW sind vorrangig dort, wo gleichzeitig Strom und Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (<100 °C) zur Deckung des Brauchwasser-, Heiz- oder Prozesswärmebedarfs benötigt wird und dort, wo die spezifischen Vorteile des Pflanzenölkraftstoffs besonders zu tragen kommen. Letzteres ist beispielsweise bei der dezentralen Strom- und Wärmeversorgung in ländlichen Gebieten der Fall oder in Gegenden, wo es gilt, hohe Auflagen des Boden- und Gewässerschutzes zu erfüllen (z.B. Berghütten, Naturschutzgebiete).

2.6 Gesetzliche Rahmenbedingungen

2.6.1 Genehmigung

Als öffentlich-rechtliche Genehmigung kommen für Blockheizkraftwerke entweder eine **baurechtliche Genehmigung** nach dem Baugesetzbuch (BauGB) und der Bayerischen Bauordnung (BayBO) [5] oder eine **immissionsschutzrechtliche Genehmigung** nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [11] in Frage.

Baurechtliche Genehmigung

Blockheizkraftwerke sind Anlagen, die zur Raumbeheizung oder zur Brauchwassererwärmung dienen und fallen demnach nach Art. 1 Abs. 2 Nr. 6 der BayBO in deren Anwendungsbereich [5]. Zudem fallen Blockheizkraftwerke in den Geltungsbereich der Verordnung über Feuerungsanlagen, Wärme- und Brennstoffversorgungsanlagen (Feuerungsverordnung - FeuV) [32]. Gemäß Art. 62 der BayBO ist die Errichtung, die Änderung oder die Nutzungsänderung baulicher Anlagen genehmigungspflichtig. Keiner Genehmigung bedürfen nach Art. 63 BayBO die Errichtung und Änderung von Feuerstätten mit einer Nennwärmeleistung bis zu 50 kW. Nicht genehmigungspflichtig sind ebenfalls die Erneuerung und Modernisierung von Feuerstätten mit einer Nennwärmeleistung von mehr als 50 kW, wenn keine wesentliche Erhöhung der Leistung erfolgt.

Folgende bauordnungsrechtliche Anforderungen sind in der BayBO und der Feuerungsverordnung (FeuV) unter anderem festgelegt:

Bayerische Bauordnung [5]

- Aufstellung nur in Räumen, bei denen nach Lage, Größe, baulicher Beschaffenheit und Benutzungsart Gefahren nicht entstehen (Art. 41 Abs. 3)
- Abgase sind so ins Freie zu führen, dass Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen (Art. 41 Abs. 4)
- Brennstoffe sind so zu lagern, dass Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen (Art. 41 Abs. 6)
- für Schall- Schwingungs- und Erschütterungsschutz ist zu sorgen, so dass keine Gefahren, vermeidbare Nachteile oder vermeidbare Belästigungen entstehen (Art. 16 Abs. 2, 3)

Feuerungsanlagenverordnung [32]

- Aufstellung in Räumen mit Anlagen zur Luftabsaugung nur, wenn Abgasabführung durch entsprechende Maßnahmen überwacht bzw. sichergestellt wird (§§ 10, 4)
- Bauteile mit brennbaren Baustoffen und Einbaumöbel müssen so weit von der Feuerstätte (BHKW) entfernt oder so abgeschirmt sein, dass keine höheren Temperaturen als 85 °C auftreten können (§ 4)

- für eine ausreichende Verbrennungsluftversorgung im Aufstellraum ist zu sorgen (§ 3)
- die Verbrennungsabgase sind über eigene dichte Leitungen über Dach abzuführen (§ 11)
- Abgasanlagen sind so zu bemessen, dass die Abgase sicher ins Freie abgeführt werden und bestimmte Mindestabstände zu brennbaren Baustoffen eingehalten werden (§§ 7, 8)

Immissionsschutzrechtliche Genehmigung

Die Errichtung und der Betrieb von stationären Verbrennungsmotoranlagen fallen in den Geltungsbereich des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) [11]. Gemäß Nr.1.4, Spalte 2 des Anhangs zur 4. BImSchV [35] (Fassung vom 20.04.98) sind Verbrennungsmotoranlagen beim Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl ab 1 MW Feuerungswärmeleistung, FWL (entspricht ca. $400 \text{ kW}_{\text{mech}}$) immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtig. Werden mehrere Aggregate eingesetzt, so wird die maßgebende Leistungsgrenze durch Aufsummieren der einzelnen Feuerungswärmeleistungen gebildet, sofern ein enger räumlicher und betrieblicher Zusammenhang gegeben ist (§ 1 Abs. 3 der 4. BImSchV).

Werden BHKW gemeinsam mit bereits eigenständig genehmigungspflichtigen Anlagen (z.B. mit Heiz- oder Dampfkesseln) betrieben, kann sich das Genehmigungsverfahren dieser Anlage auch auf das BHKW als Nebeneinrichtung erstrecken. So können z.B. auch Verbrennungsmotoren mit einer Feuerungswärmeleistung $< 1 \text{ MW}$ formell immissionsschutzrechtlich als Nebeneinrichtung genehmigungspflichtig werden.

Immissionsschutzrechtliche Anforderungen

Zur Begrenzung der Emissionen sind für immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtige BHKW die Emissionsbegrenzungen der TA Luft 86 [7] bzw. die sich hieraus ableitenden Werte der Konkretisierung der Dynamisierungsklauseln vom 06.08.1991 und des StMLU-Schreibens (UMS) (zum Rußfiltereinsatz bei stationär betriebenen Dieselmotoren; Az. 8267-7/84-41178) vom 29.11.1996 heranzuziehen (Tabelle 3). Daraus lassen sich die derzeit geforderten Emissionsgrenzwerte für den Pflanzenölbetrieb ableiten (Tabelle 4).

Für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) kleiner 1 MW sind derzeit keine allgemeingültigen Vorschriften zur Emissionsbegrenzung einschlägig. Diese Anlagen unterliegen nicht der Genehmigungspflicht nach dem BImSchG, sind jedoch baurechtlich genehmigungsbedürftig, sofern die Nennwärmeleistung 50 kW überschreitet (siehe oben). Im Rahmen einer Neuauflage der TA-Luft wird jedoch auch die Einführung von Emissionsbegrenzungen für stationäre Verbrennungsmotoranlagen mit einer FWL $< 1 \text{ MW}$ diskutiert. Emissionsbegrenzungen werden auch für

diese Anlagen - unabhängig vom eingesetzten Kraftstoff (Diesel, Heizöl oder Pflanzenöl) - aus Sicht des Immissionsschutzes für erforderlich gehalten (Tabelle 5).

Die Kreisverwaltungsbehörden (unterer Immissionsschutz), die Bezirksregierungen und das Landesamt für Umweltschutz (in Bayern) bzw. die jeweilige Landesbehörde für Immissionsschutz können hier zur Beratung herangezogen werden. Aus den in Tabelle 3 genannten Vorschriften leiten sich für Pflanzenöl-BHKW derzeit die in Tabelle 4 und Tabelle 5 genannten Emissionsbegrenzungen ab.

Tabelle 3: Wichtige immissionsschutzrechtliche Vorschriften für genehmigungsbedürftige Verbrennungsmotoranlagen > 1MW Feuerungswärmeleistung (FWL) (Selbstzündungsmotoren)

Schadstoff	Vorschrift	FWL	Anforderung [*]
Kohlenmonoxid (CO)	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	≥ 1 MW	≤ 0,65 g/Nm ³
Staub	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	≥ 1 MW	≤ 0,13 g/Nm ³ (alter Grenzwert), Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
	Konkretisierung der Dynamisierung, Nr.3.3.1.4.1 (1991 Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI))	≥ 1 MW	50 mg/Nm ³ durch motorische Maßnahmen, Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
		< 1MW	Zielwert: 80 mg/Nm ³ durch motor. Maßnahmen, Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
	UMS ^{**}) vom 26.11.96	≥ 1 MW	20 mg/Nm ³ durch Einsatz von Rußfiltern
		< 1MW	Zielwert: 20 mg/Nm ³ durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit
Stickstoffoxide (NO _x), angegeben als NO ₂	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	< 3 MW	≤ 4,0 g/Nm ³ , Ausschöpfung motorischer und anderer dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen
	Konkretisierung der Dynamisierung, Nr.3.3.1.4.1	≥ 1 MW	Zielwert: 1,0 g/Nm ³ durch den Einsatz von Entstickungskatalysatoren (SCR)
krebserzeugende Stoffe	TA Luft 86, Nr. 2.3	≥ 1 MW	Minimierungsgebot (Einsatz von Rußfiltern)
organische Stoffe	TA Luft 86, Nr. 3.1.7	≥ 1 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Stoffe der Klasse I: 20 mg/Nm³ (bei einem Massenstrom ≥ 0,1 kg/h) • Stoffe der Klasse II: 0,10 g/Nm³ (bei einem Massenstrom ≥ 2 kg/h) • Stoffe der Klasse III: 0,15 g/Nm³ (bei einem Massenstrom ≥ 3 kg/h)

^{*}) angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

^{**}) Schreiben des StMLU

Tabelle 4: Emissionsbegrenzungen für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Pflanzenöl-BHKW (d.h. Gesamtfeuerungswärmeleistung ≥ 1 MW) [3], [37]

Schadstoff	FWL	Anforderung ^{*)}
Kohlenmonoxid (CO)	≥ 1 MW	$\leq 0,65$ g/Nm ³
Staub	≥ 1 MW	20 mg/Nm ³ entsprechend UMS v. 26.11.1996 (derzeit nur durch den Einsatz von Rußfiltern sicher zu gewährleisten)
Stickstoffoxide (NO _x), angegeben als NO ₂	≥ 1 MW	$\leq 1,0$ g/Nm ³ (durch Katalysatoren oder motorische Maßnahmen)
Gerüche/HC	≥ 1 MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

^{*)} angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

Tabelle 5: Empfohlene Emissionsbegrenzungen (derzeitige Orientierungswerte) für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (d.h. Gesamtfeuerungswärmeleistung < 1 MW) [37]

Schadstoff	FWL	Anforderung ^{*)}
Kohlenmonoxid (CO)	< 1 MW	$\leq 0,65$ g/Nm ³
Staub	< 1 MW	Zielwert: 20 mg/Nm ³ durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit
Stickstoffoxide (NO _x), angegeben als NO ₂	≥ 500 kW < 1 MW	$\leq 2,5$ g/Nm ³ , (durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
	< 500 kW	$\leq 3,0$ g/Nm ³ , (Zielwert 2,5 g/Nm ³ , durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
Gerüche/HC	< 1 MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

^{*)} angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

Lärmschutz- und Erschütterungsschutzrechtliche Anforderungen

BHKW sind so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen, z.B. in Form von erheblichen Lärmbelastigungen für die Nachbarschaft ausgeschlossen werden. Dazu ist die technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) anzuwenden [23]. Als Maßnahmen zur Verringerung der Lärmemissionen werden BHKW schwingungsisoliert aufgestellt und mit einer Schallschutzkapselung umgeben.

Zur Beurteilung des für die Nachbarschaft zumutbaren Lärms wurden Immissionsrichtwerte festgelegt. Diese betragen für Orte außerhalb von Gebäuden:

in Industriegebieten:		70 dB
in Gewerbegebieten:	tags	65 dB
	nachts	50 dB
in Kern-, Dorf- und Mischgebieten:	tags	60 dB
	nachts	45 dB
in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	tags	55 dB
	nachts	40 dB
In reinen Wohngebieten	tags	50 dB
	nachts	35 dB
In Kurgebieten, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	tags	45 dB
	nachts	35 dB

Grundsätzlich ist zu beachten, dass ein Blockheizkraftwerk wegen des im Einzelfall relativ geringen Abstands zur Wohnbebauung Lärmprobleme bzw. Erschütterungen verursachen kann. In diesem Fall wird man nicht umhinkommen, ein Schallschutzgutachten erstellen zu lassen. Darin sollten nicht nur der „A-bewertete Beurteilungspegel“ ermittelt werden, sondern auch die tieffrequenten Geräuschanteile der Motoren untersucht bzw. beurteilt werden. Maßgebliche Ermittlungs- und Beurteilungsvorschrift ist die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) vom 26.08.1998 (GMBI, S. 503) [23].

Unabhängig davon ist für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen d.h. lediglich baurechtlich zu genehmigende Anlagen § 22 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BimSchG) zu beachten [11]. Demnach sind „nicht genehmigungsbedürftige Anlagen ... so zu errichten und zu betreiben, dass

- schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind,
- nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden und
- die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können.“

2.6.2 Verordnung über brennbare Flüssigkeiten

Bedingt durch den hohen Flammpunkt von mehr als 100 °C unterliegt Pflanzenöl nicht der Verordnung über brennbarer Flüssigkeiten (VbF) und wird nicht als Gefahr-gut klassifiziert [31]. Somit bestehen für den Transport von Pflanzenöl keine Sondervorschriften. Auch die Gefahrgutverordnung Straße (GGVS), die die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter regelt, findet keine Anwendung. Spezielle Anforderungen an Fahrzeug und Fahrer sowie das Mitführen von Begleitpapieren sind beim Transport von Rapsölkraftstoff nach RK-Qualitätsstandard (Abbildung 1, Seite 6) nicht notwendig [6].

2.6.3 Wasserrechtliche Auflagen und Anforderungen

Zum Schutz von Umwelt und Gesundheit werden Chemikalien auf ihre Gefährlichkeit hin untersucht und eingestuft. Ein wichtiges Kriterium ist die Einstufung nach ihrer Wassergefährdung; unterschieden werden drei Wassergefährdungsklassen (WGK):

- schwach wassergefährdend
- wassergefährdend
- stark wassergefährdend

„Reines unbehandeltes Rapsöl wurde von der Kommission Bewertung Wasser gefährdender Stoffe (KBwS) aufgrund seiner Abbaubarkeit und seiner geringen aquatischen Toxizität in der Neufassung der *Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe - VwVwS* vom 17.Mai 99 im Anhang 1 als nicht wassergefährdend eingestuft (KBwS-Datenblatt Nr.660). Einstufungen durch die KBwS gelten bundesweit“ (Merkblatt Nr. 3.2/6 [4]) Der Zusatz von Additiven kann jedoch die Einstufung in eine WGK zur Folge haben. Mit der neuen VwVwS wird die frühere WGK 0 (im allgemeinen nicht wassergefährdend) nicht weiter fortgeführt.

Trotz der Einstufung von Pflanzenöl als nicht wassergefährdend, unterliegt der Umgang mit Rapsöl dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [13]. Gemäß WHG § 1a Abs. 2 „ist jedermann verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Wassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu verhüten...“. Auch das Grundwasser fällt in den Geltungsbereich.

Die Einordnung von Rapsöl als „nicht wassergefährdender Stoff“ gemäß der Liste nicht wassergefährdender Stoffe des Anhangs 1 der VwVwS stellt jedoch keine bindende Vorschrift dar, weshalb Rapsöl von Entscheidungsträgern mitunter auch als potentiell wassergefährdend betrachtet werden kann [6]. Insbesondere dann sind auch weitere Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes z.B. hinsichtlich der Lagerung und Abfüllen für wassergefährdende Stoffe zu beachten.

Neben dem Wasserhaushaltsgesetz des Bundes sind die teilweise sehr unterschiedlichen länderspezifischen Gesetze und Verordnungen bei der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen, die mit wassergefährdenden Stoffen umgehen, zu berücksichtigen, sofern diese für Rapsöl zutreffend sind.

2.6.4 Mineralölsteuer

Rapsöl ist gemäß § 1 des Mineralölsteuergesetzes (MinöStG) nicht als Mineralöl einzuordnen und ebenso wie Fettsäuremethylester von der Mineralölsteuer befreit [19].

Die Befreiung gilt nur, wenn keine Mischung mit mineralölsteuerpflichtigen Komponenten vorgenommen wird. Bereits die Beimischung kleiner Mengen von Mineralöl zu Rapsöl (z.B. Zugabe von Dieselmotorkraftstoff zur Erhöhung der Kältestabilität von Rapsöl im Winter) führt dazu, dass der gesamte Mischkraftstoff ein neues, voll mineralölsteuerpflichtiges Erzeugnis wird. Lediglich ein Anteil von höchstens etwa 3 % mineralischem Kraftstoff im Pflanzenöl, der sich aufgrund von Vermischung mit Restmengen in Tanks oder Tanklastzügen ergeben kann, ist steuerlich unbedenklich. Eine Ausnahme beinhaltet §2 der Mineralölsteuer-Durchführungsverordnung (MinöStV) [33]. Demnach ist das Mischen von „Mineralölen mit Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, die kein Mineralöl im Sinne des Gesetzes sind, beim Befüllen von Hauptbehältern von Beförderungsmitteln, Spezialcontainern, Arbeitsmaschinen und -geräten, land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen sowie Kühl- und Klimaanlage“, nicht mineralölsteuerpflichtig [33]. Dies gilt jedoch nicht für BHKW.

Wird Gasöl zum unmittelbaren Heizen verwendet, ermäßigt sich der Steuersatz nach §3 Abs. 2 MinöStG [19]. Gekennzeichnetes, mineralölsteuerermäßigtes Mineralöl darf auch in ortsfesten Anlagen verwendet werden, wenn die Anlage ausschließlich der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Kraft (Kraft-Wärme-Kopplung) dient. Blockheizkraftwerke gelten auch dann als ortsfest „wenn sie zur Erzielung einer höheren Auslastung für die abwechselnde Nutzung an nicht mehr als zwei Standorten ausgelegt sind“ [9]. Entsprechend §3 Abs. 2 MinöStG (siehe oben) unterliegen auch Mischkraftstoffe dem ermäßigten Steuersatz, wenn die Anlage ausschließlich der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Kraft dient. Beim Einsatz in nicht ortsfesten Anlagen (z.B. Notstromaggregate) unterliegen dagegen Kraftstoffmischungen aus Pflanzenöl und Mineralöl dem Regelsteuersatz.

Durch das Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform [9] und das Gesetz zur Fortführung der Ökologischen Steuerreform [12] wurde das Mineralölsteuergesetz in wichtigen Punkten geändert. Demnach werden nun Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad ab 70 % von der bestehenden Mineralölsteuer vollständig ausgenommen.

Es wird erwartet, dass nach nationalem Recht in Deutschland auch in absehbarer Zukunft keine Mineralölsteuer für Rapsölkraftstoff zu entrichten sein wird. Allerdings bleibt abzuwarten, ob infolge der auf europäischer Ebene stattfindenden Steuerharmonisierung Pflanzenölkraftstoff auch weiterhin von der Mineralölsteuer ausgenommen sein wird.

2.6.5 Stromsteuer

Die Stromsteuer ist eine Verbrauchssteuer und wird im Stromsteuergesetz (StromStG) geregelt [9], [12]. Das Stromsteuergesetz trat mit Wirkung zum 01. April 1999 in Kraft und wurde durch das Gesetz zur Fortführung der ökologischen Steuerreform mit Wirkung zum 15. Februar 2000 geändert. Üblicherweise wird die Stromsteuer durch den Stromversorger erhoben und zuzüglich Mehrwertsteuer auf der Rechnung ausgewiesen. Das Stromsteuerrecht unterscheidet vier verschiedene Steuersätze je nach Art und Weise der Erzeugung des Stromes, der (zweckgebundenen) Verwendung sowie den eigentlichen Verwendern.

Der festgelegte Steuersatz für Strom beträgt seit Januar 2001 30,00 DM/MWh und wird in 2002 auf 17,9 €/MWh und in 2003 auf 20,5 €/MWh angehoben.

Strom ist gemäß § 9 Abs. 1 des Stromsteuergesetzes (StromStG) von der Steuer befreit, wenn er:

1. aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt und aus einem ausschließlich aus solchen Energieträgern gespeisten Netz oder einer entsprechenden Leitung entnommen wird
2. zur Stromerzeugung entnommen wird (z.B. Strom, der in den Neben- und Hilfsanlagen einer Stromerzeugungseinheit, wie BHKW verbraucht wird (§12 StrStV))
3. wenn er in Anlagen mit einer Nennleistung bis zu 2 Megawatt erzeugt und in räumlichen Zusammenhang zu dieser Anlage entnommen und von demjenigen, der die Anlage betreibt oder betreiben lässt, geleistet wird

Die steuerfreie Verwendung von Strom zur Stromerzeugung ist erlaubnispflichtig. Auf Antrag wird von dem örtlich zuständigen Hauptzollamt eine entsprechende Erlaubnis mit Erlaubnisschein erteilt. Gemäß §10 der Verordnung zur Durchführung des Stromsteuergesetzes (Stromsteuer-Durchführungsverordnung - StromStV) ist unter Verzicht auf eine förmliche Einzelerlaubnis die Entnahme von Strom nach § 9 Abs. 1 Nr. 1 und 3 des Gesetzes (siehe oben) allgemein erlaubt.

Demnach ist Strom aus pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken von der Stromsteuer befreit, wenn er in Anlagen mit einer Nennleistung bis zu 2 Megawatt erzeugt und in räumlichen Zusammenhang zu dieser Anlage entnommen wird oder wenn er aus einem ausschließlich mit erneuerbaren Energieträgern gespeisten Netz oder einer entsprechenden Leitung entnommen wird. Allerdings kommen entsprechende Netze bzw. Leitungen, die ausschließlich aus erneuerbarem Strom gespeist werden, derzeit in der Praxis kaum vor.

2.6.6 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Ziel des Erneuerbare-Energien-Gesetzes [8] ist es, „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich zu erhöhen, um entsprechend den Zielen der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland den Anteil Erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch bis zum Jahr 2010 mindestens zu verdoppeln“. Das Gesetz regelt die Abnahme und die Vergütung von Strom, der neben anderen regenerativen Energieträgern, ausschließlich aus Biomasse, und damit auch aus Pflanzenöl, gewonnen wird. Es verpflichtet den Netzbetreiber, entsprechende Anlagen an ihr Netz anzuschließen, den gesamten angebotenen Strom aus diesen Anlagen vorrangig abzunehmen und den eingespeisten Strom zu vergüten. Die Vergütung beträgt für Strom von neu in Betrieb genommenen Anlagen

- bis zu einem Leistungsanteil von einschl. 500 kW_{el} mindestens 0,20 DM/kWh,
- ab 500 kW_{el} bis einschließlich 5 MW_{el} mindestens 0,18 DM/kWh,
- ab 5 MW_{el} bis einschließlich 20 MW_{el} mindestens 0,17 DM/kWh.

Die Einspeisevergütung ist für die Dauer von 20 Jahren ohne Berücksichtigung des Inbetriebnahmejahrs zu gewähren. Die Mindestvergütungen werden beginnend ab dem 1.1.2002 jährlich jeweils für mit diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen um jeweils eins von Hundert gesenkt.

Die notwendigen Anschlusskosten an den technisch und wirtschaftlich günstigsten Verknüpfungspunkt des Netzes sind vom Anlagenbetreiber zu tragen. Kosten für einen infolge eines Neuanschlusses einer Anlage erforderlichen Netzausbaus trägt der Netzbetreiber. Dieser kann den auf ihn entfallenden Kostenanteil bei der Ermittlung des Netznutzungsentgelts in Ansatz bringen [8].

2.7 Wirtschaftliche Aspekte

2.7.1 Kosten

Neben der übergeordneten Umweltverträglichkeit ist aus Sicht des Betreibers zu fordern, dass die Summe der Kosten für die Anschaffung, den Betrieb, sowie für planbare und nicht planbare Ausfallzeiten abzüglich des Wiederverkaufswertes der Anlage möglichst gering sind. So kann z.B. ein höherer Anschaffungspreis akzeptiert werden, wenn dadurch Folgekosten aus Wartungs- und Reparaturarbeiten stärker reduziert werden können [20].

Die Ermittlung der Kosten von Wärmeerzeugungsanlagen und Motorheizkraftwerke (z.B. Pflanzenöl-BHKW) erfolgt mithilfe der Annuitätenmethode gemäß VDI 2067 [29]. Demnach ergeben sich die Jahreskosten eines BHKW aus der Summe der kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten.

Die **kapitalgebundenen Kosten** leiten sich aus den erforderlichen Investitionen für die gesamte BHKW-Anlage ab. Zusätzlich hat auch die Abschreibungsdauer und der zugrundezulegende Zinssatz entscheidenden Einfluss auf die Höhe der kapitalgebundenen Kosten [38].

Die Gesamt-Investitionskosten wiederum setzen sich zusammen aus den Investitionskosten der einzelnen BHKW-Komponenten. Für Pflanzenöl-BHKW sind für die thermische und elektrische Einbindung, für die Abgasanlage, für bauliche Maßnahmen, sowie für die Planung etwa gleich hohe Kosten, wie bei Heizölbetriebenen BHKW anzusetzen. Lediglich für den Motor können sich höhere Kosten ergeben. Dies begründet sich vor allem dadurch, dass spezielle Pflanzenölmotoren im Allgemeinen in geringeren Stückzahlen als konventionelle Stationär-Dieselmotoren gefertigt werden und teilweise andere bzw. zusätzliche Bauteile (z.B. Vorwärmeinrichtungen) Einsatz finden. Werden herkömmliche Motoren für den Betrieb mit Pflanzenöl umgerüstet, so ergeben sich je nach durchgeführten Änderungen ebenso mitunter höhere Anschaffungskosten. Gemäß eigenen Erhebungen können für Pflanzenöl-BHKW-Module in etwa die in Abbildung 2 dargestellten leistungsabhängigen spezifischen Investitionskosten angesetzt werden. Für eine genaue Kostenkalkulation sind allerdings detaillierte Angebote einzuholen.

Investitionskosten für Tank und Kraftstoffzuführung sind, unabhängig davon, ob Pflanzenöl oder Heizöl eingesetzt wird, annähernd gleich hoch anzusetzen. Geringfügig höhere Kosten für Pflanzenöl-BHKW können sich lediglich bei der Verwendung von höherwertigen pflanzenöltauglichen Komponenten (z.B. Edeltank) ergeben. Im Gegensatz dazu kann aber auch der Kostenaufwand für die Lagerung von Heizöl größer sein als für Pflanzenöl, wenn dafür zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zum Boden und Gewässerschutz oder regelmäßige Tankprüfungen erforderlich sind. Die Abschreibungsdauer sollte entsprechend der üblichen Gesamtlaufzeit des BHKW festgelegt werden. Typische Zeiträume für die Abschreibung für motorisch betriebene BHKW liegen bei ca. 12-15 Jahren [17]. Die technische Lebensdauer aller Komponenten dürfte bei Pflanzenöl-BHKW mit ausgereifter Technik ebenso hoch sein wie bei Dieselaggregaten. Allerdings liegen für Pflanzenöl-BHKW bisher noch keine Daten über die tatsächliche maximale Laufleistung der Motoren vor. Erfahrungen zeigen, dass Aggregate mit einer Laufzeit von bis zu ca. 15.000 Betriebsstunden keine außergewöhnlichen Verschleißerscheinungen aufweisen.

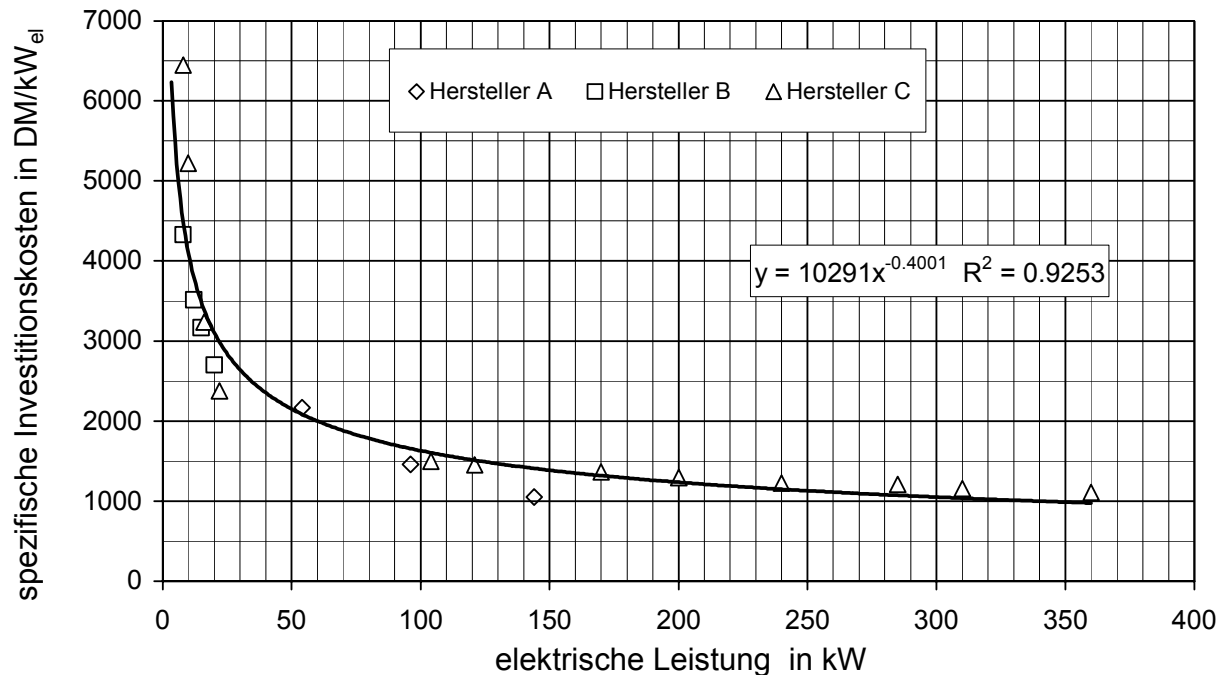


Abbildung 2: Leistungsabhängige spezifische Investitionskosten für Pflanzenöl-BHKW-Module im Netzparallelbetrieb (ohne Planung, Gebäude, Kamin, Kraftstofftank) (Quelle: Herstellerangaben)

Zu den **verbrauchsgebundenen Kosten** zählen Brennstoffkosten und die Hilfsenergiekosten wie etwa für Pumpen. Für Rapsöl als Brennstoff kann ein fester Bezugspreis angenommen werden, der allerdings je nach Lieferant, Bezugsmenge, Angebot und Nachfrage sowie der Jahreszeit Schwankungen unterworfen sein kann.

Die mittleren Preise für Rapsöl betragen derzeit zwischen ca. 0,80 DM/l und 1,10 DM/l zzgl. MwSt. Höhere Kraftstoffkosten innerhalb der Preisspanne können dann in Kauf genommen werden, wenn zuverlässig eine gesicherte hohe Rapsölqualität geliefert wird, wodurch Tankreinigungen, Kraftstofffilterwechsel oder andere Instandsetzungsmaßnahmen eingespart werden.

Unter **betriebsgebundene Kosten** fallen nach VDI 2067 in erster Linie die Instandhaltungskosten und ggf. Personalkosten. Die jährlichen Instandhaltungskosten werden nach VDI 2067 als Pauschalsätze in Prozent der Investitionskosten angenommen, wofür diese Norm auch Anhaltswerte gibt. Prinzipiell besteht hinsichtlich der betriebsgebundenen Kosten kein großer Unterschied zwischen Pflanzenöl- und Heizölaggregate. Dennoch sollte in Anbetracht der neueren Technologie und insgesamt geringeren Verbreitung von Pflanzenöl-BHKW tendenziell die oberen Kostenansätze der Vorgaben verwendet werden. Damit wird auch den bei manchen Aggregaten kürzeren Wartungsintervallen (v.a. Motoröl- und Kraftstofffilterwechsel) oder dem vorgeschriebenen Einsatz teurerer Betriebsmittel (Motoröl) Rechnung getragen.

Bei den Instandhaltungskosten durch einen Fachkundendienst z.B. den Anlagenbauer oder Motorenhersteller muss berücksichtigt werden, dass dafür im Einzelfall höhere Fahrtkosten einzurechnen sind, weil erfahrene Fachwerkstätten für Pflanzenölmotoren noch wenig verbreitet sind.

Der Kostenansatz für das notwendige Personal zur Bedienung und Überwachung der Anlage hängt davon ab, ob zusätzliches Personal eingestellt werden muss oder vorhandene Kapazitäten ausreichen. Auch dahingehend besteht kein Unterschied zwischen Pflanzenöl- und Heizölbetrieb. In beiden Fällen sollte allerdings engagiertes Fachpersonal für tägliche Routinekontrollen zur Verfügung stehen.

Sonstige Kosten nach VDI 2067 (z.B. Schornsteinfeger, Verwaltung) werden in Prozent der Gesamtinvestitionssumme abgeschätzt und unterscheiden sich normalerweise nicht zwischen Pflanzenöl- und Heizölaggregaten.

2.7.2 Erlöse, Einsparung bei Eigenverbrauch, Förderung

Die Wirtschaftlichkeit von BHKW wird neben den Kosten entscheidend von den erzielbaren Preisen für Strom und Wärme bestimmt. Je nach gewählter Betriebsart (v.a. Anteil der Abdeckung des Eigenstromverbrauchs) und den dadurch eingesparten Strombezugskosten sind bei der Kostenkalkulation entsprechende Gutschriften anzusetzen.

Erlöse durch Stromeinspeisung

Die Stromeinspeisung aus fossil betriebenen BHKW wird von vielen EVU nach der sogenannten Verbändevereinbarung von BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie), VIK (Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft) und VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke) vergütet. Die Höhe der Vergütung orientiert sich an den durch die Netzeinspeisung langfristig vermiedenen Kosten beim aufnehmenden EVU. Vergütet wird grundsätzlich ein Arbeitspreis für jede eingespeiste kWh (differenziert nach Jahres- und Tageszeit). Des Weiteren wird ein Leistungspreis für Sommer und Winter getrennt berechnet der von der Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit der angemeldeten Soll-Leistung abhängt. Für Kleineinspeisungen in das Niederspannungsnetz (bis etwa 30 kW) kann der Einspeiser auch eine vereinfachte Vergütung wählen, bei der der Leistungspreis auf den Arbeitspreis umgelegt wird, so dass auf teure Messeinrichtungen verzichtet werden kann [38].

Seit kurzem werden Netzbetreiber durch das Gesetz zum Schutz der Stromeinspeisung aus Kraft-Wärme-Kopplung („Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz“) vom 12. Mai 2000 [10] verpflichtet, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die vor dem 1. Januar 2000 in Betrieb genommen wurden an ihr Netz anzuschließen, den Strom abzunehmen

und zu vergüten. Die Vergütung betrug in 2000 (für fossile Kraftstoffe) mindestens 0,09 DM/kWh und wird jährlich um 0,005 DM/kWh gesenkt.

Das derzeitige „Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz“ wird voraussichtlich durch ein neues „Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz“ zum Jahresbeginn 2002 abgelöst.

Bei der Einspeisung von Strom aus Biomasse (Pflanzenöl) wird gemäß dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) [8] eine gesetzlich festgeschriebene Mindestvergütung von 0,20 DM/kWh für einen Leistungsanteil bis 500 kW_{el} gewährt (vgl. 2.6.6).

Eingesparte Strombezugskosten

Die Bewertung des Eigenverbrauchs der produzierten Elektrizität richtet sich nach den für den Nutzer relevanten Strompreisen, die sich für Tarifikunden (Niederspannungsebene) und Sondervertragskunden (vorrangig Mittelspannungsebene mit hohem Verbrauch) unterscheiden. Die Gestaltung der Strompreise für Tarifikunden ist in der Bundestarifordnung Elektrizität (BtoElt), strukturell festgelegt. Sie gilt für alle öffentlichen EVU und für Abnehmer auf der Niederspannungsebene. Je nach Abnehmergruppe, Verbraucherverhalten und EVU können die Durchschnittspreise jedoch stark voneinander abweichen [38].

Förderung

Die Nutzung erneuerbarer Energieträger und der Betrieb von Blockheizkraftwerken wird durch diverse Förderprogramme von EU, Bund, Länder, Kommunen und Energieversorger unterstützt. Je nachdem, ob Fördermittel oder Beihilfen angerechnet werden können, kann sich die Rentabilität von pflanzenölbetriebenen BHKW deutlich verbessern. Informationen über Förderprogramme und Mittelvergabe sind u.a. über die in Tabelle 12 (Seite 63) aufgeführten Kontaktadressen erhältlich.

2.7.3 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die beim Einsatz eines BHKW anfallenden Kosten können entweder nur auf die produzierte Wärme oder nur auf den erzeugten Strom bezogen werden, weil es sich um zwei verschiedene Energieformen handelt. Dabei ist es notwendig, den Preis bzw. den Erlös für entweder Wärme oder Strom vorzugeben, um die Gestehungskosten der jeweiligen anderen Energieform zu ermitteln. Die spezifischen Wärmegestehungskosten beispielsweise ergeben sich aus der Differenz der jährlichen Gesamtkosten und der Erlöse für die produzierte elektrische Energie, dividiert durch die jährlich erzeugte Wärmemenge. Sind diese Wärmegestehungskosten niedriger als die des Vergleichssystems, so ist das BHKW rentabel [38].

In Tabelle 6 werden für 3 Beispiele die Wärmekosten bei einer kombinierten Bereitstellung von Wärme und Strom durch Pflanzenöl-BHKW ermittelt. Dabei handelt es sich um eine Überschlagsrechnung, in der vereinfacht die innerhalb eines Gesamtenergiekonzeptes notwendigen Komponenten, wie Spitzenlastversorgung, Pufferspeicher und Wärmeverteilung nicht berücksichtigt werden. Ebenso wurden BHKW-Planungskosten nicht in die Wirtschaftlichkeitsberechnung miteinbezogen. Insgesamt wurden drei Szenarien aufgestellt, die durch zwei verschiedene Anlagengrößen und unterschiedliche Rahmenbedingungen charakterisiert sind (Tabelle 6).

In Szenario 1 (BHKW mit 8 kW_{el}) und Szenario 3 (BHKW mit 110 kW_{el}) wurden Annahmen getroffen, die sich weitgehend nach der VDI-Richtlinie 2067 Blatt 7 [30] richten. Um bei der noch weniger verbreiteten neueren Pflanzenöltechnologie den mitunter größeren Personal- und Wartungsaufwand zu berücksichtigen, wurden für Instandhaltung, Personal und Verwaltung durchweg die oberen Kostensätze angenommen.

Die spezifischen Investitionskosten für die BHKW-Module basieren auf eigenen Erhebungen und wurden für alle drei Szenarien in Abhängigkeit von der installierten elektrischen Leistung mithilfe der Kurvengleichung aus Abbildung 2 (Seite 33) errechnet. Die Investitionsanteile für Gebäude, Grundstück, Abgasabführung, Kraftstofflagerung sind in hohem Maße von der Anlagengröße und den jeweiligen standörtlichen Voraussetzungen abhängig. Bei größeren BHKW-Anlagen können für den baulichen Teil einschließlich Kamin und Schallschutz Investitionskosten von 300-400 DM/kW_{el} angesetzt werden [28]. Insbesondere bei kleineren pflanzenölbetriebenen BHKW sind aber auch spezifische Investitionskosten von 5000 DM/kW_{el} nicht auszuschließen [21]. In den hier betrachteten Szenarien 1 und 3 (Tabelle 6) wird eine mittlere spezifischen Investition für bauliche Anlagen von 2500 DM/kW_{el} angenommen.

In Szenario 2 werden besonders günstige Rahmenbedingungen vorausgesetzt. Dies sind im Wesentlichen: niedrigere Kraftstoffkosten (z.B. bei eigener Rapsölproduktion), hohe Anlagenauslastung (Wärmebedarf auch im Sommer, z.B. für Trocknungsanlagen etc.), geringe bauliche Investitionen (z.B. bei Vorhandensein von Aufstellraum, Lagertanks etc.), geringer Wartungsaufwand (durch freie Kapazitäten vorhandener Arbeitskräfte, bzw. Nichtanrechnung der eigenen Arbeitszeit) und eine 50 %ige Eigennutzung des erzeugten Stroms, der sonst für 0,25 DM/kWh fremdbezogen werden müsste.

Gemäß Tabelle 6 ergeben sich für das BHKW mit 8 kW_{el} in Szenario 1 Wärmegestehungskosten von 0,30 DM/kWh und für das BHKW mit 110 kW_{el} (Szenario 3) 0,255 DM/kWh. Ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Anlagen dürfte also bei den getroffenen Annahmen kaum möglich sein. Bei entsprechend günstigen Rahmenbedingungen (Szenario 2) können jedoch die Wärmegestehungskosten auch deutlich niedriger (0,106 DM/kWh) liegen.

Tabelle 6: Berechnung der Wärmekosten einer kombinierten Wärme- u. Stromerzeugung in Pflanzenöl-BHKW nach HARTMANN [15] (Quellen: [28][30])

Annahme/Kostenart	Kosten und Annahmen für verschiedene Szenarien		
	Szenario 1	Szenario 2 (günstig)	Szenario 3
Annahmen:			
BHKW elektrische Leistung [kW _{el}]	8	8	110
BHKW thermische Leistung [kW _{th}]	15	15	110
Anschaffung BHKW-Modul komplett [DM] ¹⁾	35 828	35 828	172 619
bauliche Investitionen (Gebäude, Tanks, Kamin) [DM] ²⁾	20 000	3 200	275 000
Gesamtinvestition [DM]	55 828	39 028	447 619
jährliche Instandhaltungskosten für BHKW-Modul in % der Investition	9,0	3,0	9,0
jährliche Instandhaltungskosten für bauliche Anlagen in % der Investition	1,5	0	1,5
jährliche Personal- und Verwaltungskosten in % der Investition (ohne Bauteil)	6,0	0	6,0
jährliche Versicherungskosten in % der Investition (ohne Bauteil)	1,5	0	1,5
jährliche Hilfsenergiekosten in % der Kraftstoffkosten	1,0	1,0	1,0
Kraftstoffverbrauch bei Nennlast [l/h]	3,1	3,1	31,0
Kraftstoffbezugskosten (inkl. Anlieferung) [DM/l]	1,00	0,80	1,00
Jahresauslastung BHKW bei Nennlast [Bh/a]	4 000	6 000	4 000
jährliche Kosten [DM/a]:			
Annuität ³⁾	5 650	4 208	42 551
Wartung, Instandhaltung gesamt ⁴⁾	3 525	1 075	19 661
Versicherung	537	0	2 589
Personal, Verwaltung, etc.	2 150	0	10 357
Hilfsenergie	124	149	1 240
Kraftstoff	12 400	14 880	124 000
Jahresenergieertrag [kWh]:			
thermisch	60 000	90 000	440 000
elektrisch	32 000	48 000	440 000
Erlöse (Stromgutschrift) [DM/a]:			
für Einspeisung nach EEG ⁵⁾	6 400	--	88 000
für Eigenverbrauch u. Einspeisung nach EEG (je 50 %) ⁶⁾	--	10 800	--
Wärmekosten (inkl. Gutschriften) [DM/kWh]:			
bei Stromgutschrift nach EEG	0,300	--	0,255
bei Stromgutschrift nach Eigenverbrauch u. EEG (je 50%)	--	0,106	--

¹⁾ Investitionskosten für BHKW-Modul (y) in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung (x): $y = 10291 \cdot x^{-0.4001}$ (vgl. Abbildung 2)

²⁾ Investitionskosten für bauliche Anlagen: Szenario 1 und 3: 2 500 DM/kW_{el}, Szenario 2: 400 DM/kW_{el}

³⁾ Zinssatz: 7 %, angenommene Nutzungsdauer: 15 Jahre für BHKW-Modul, bzw. 25 Jahre für baulichen Teil

⁴⁾ inklusive Motoröl (Ölwechselintervall 300 Betriebsstunden)

⁵⁾ Stromeinspeisevergütung nach Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG): 0,20 DM/kWh

⁶⁾ angenommene Kosten für Stromfremdbezug: 0,25 DM/kWh

Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse lässt sich die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Wärmegestehungskosten überprüfen. In Abbildung 3 werden für das Szenario 3 die Parameter Rapsölkosten, Investitionskosten für bauliche Anlagen (ohne BHKW-Modul) Stromvergütung und Jahresbetriebsstunden ausgehend von den Annahmen in Tabelle 6 zwischen -100% und $+100\%$ variiert. Je steiler die Kurven verlaufen, desto größer ist der Einfluss des jeweiligen Parameters auf die Wärmegestehungskosten (innerhalb der betrachteten Parametervariation).

Anhand der Kurvensteigungen in Abbildung 3 wird deutlich, dass sich die Kraftstoffkosten am stärksten auf die Wärmegestehungskosten auswirken. Beispielsweise reduzieren sich bei einem 25% niedrigeren Rapsölpreis ($0,75\text{ DM/l}$) die Wärmekosten von ca. $0,26$ auf $0,18\text{ DM/kWh}$. Die mögliche Minderung der Wärmegestehungskosten durch niedrigere Kraftstoffkosten dürfte allerdings bei diesem Beispiel bereits ausgeschöpft sein, da Rapsöl der erforderlichen Qualität kaum kostengünstiger zu beziehen sein wird. Lediglich bei Eigenerzeugung von Rapsöl sind unter bestimmten Voraussetzungen auch noch niedrigere Kraftstoffkosten anzusetzen.

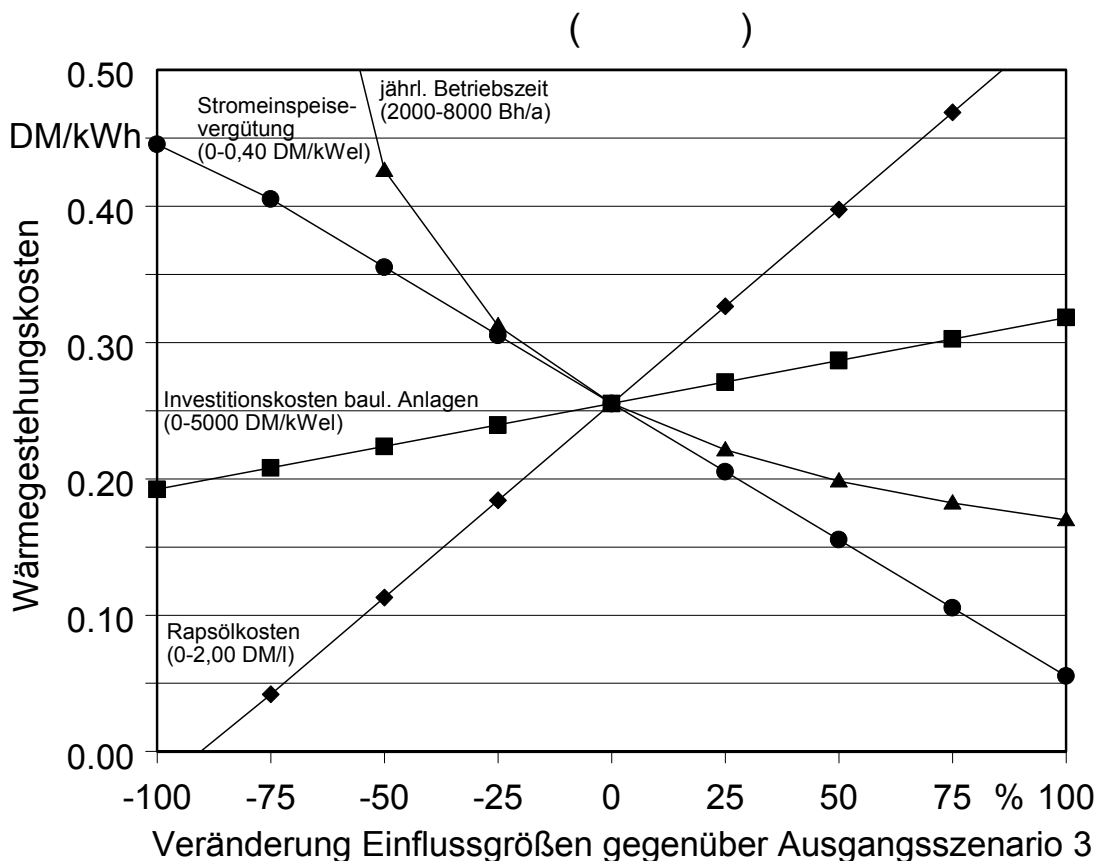


Abbildung 3: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Veränderung von Einflussgrößen gegenüber Ausgangsszenario 3 ($x = 0$ entspricht: Rapsölkosten = $1,00\text{ DM/l}$; bauliche Investition = $2\,500\text{ DM/kW}_{el}$; Stromeinspeisevergütung = $0,20\text{ DM/kW}_{el}$; jährliche Betriebszeit: $4\,000\text{ Bh/a}$)

Einen ebenfalls großen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten hat die Höhe der Stromvergütung. So würde ein um 50 % gesteigener Stromerlös (von 0,20 auf 0,30 DM/kWh_{el}) bei dem betrachteten Szenario 3 in einem Rückgang der Wärmegestehungskosten von ca. 0,26 DM/kWh auf ca. 0,16 DM/kWh resultieren. Analog ergeben sich auch durch anzusetzende Stromgutschriften niedrigere Wärmekosten, wenn sonst Strom bei einer herkömmlichen Energieversorgung teuer fremdbezogen werden müsste.

Mit zunehmender Auslastung des BHKW nimmt der Einfluss der jährlichen Betriebsstunden auf die Wärmegestehungskosten ab. Entsprechend führen niedrige jährliche Betriebszeiten zu einem überproportionalen Anstieg der Wärmekosten.

Die baulichen Investitionskosten wirken sich innerhalb der hier betrachteten Kostenspanne (0-5000 DM/kW_{el}) am wenigsten auf die Wärmegestehungskosten aus, was an dem flachen Kurvenverlauf zu sehen ist.

Zur wirtschaftlichen Optimierung von Pflanzenöl-BHKW sind also für jeden Einzelfall schon während der Planung die wechselnden Auswirkungen einer Vielzahl von Einflussgrößen sorgfältig zu überprüfen.

2.8 Umweltaspekte

Für eine umfassende Bewertung der Umwelteinwirkungen bei der Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff, sind ebenso wie bei anderen Biomasse-Energieträgern eine Vielzahl von Aspekten während des Gesamtverfahrens (Rapssaatherstellung, Rapsanbau, Ölgewinnung, Lagerung und Transport, Verwertung) einzubeziehen. In einer Studie von HARTMANN [15] wird eine Bewertung der Rapsölbereitstellung hinsichtlich qualitativer (nicht numerisch darstellbar) und quantitativer (numerisch darstellbar) Umweltauswirkungen vorgenommen.

Zu den qualitativen Umweltauswirkungen ist anzumerken, dass die Vorteile von Rapsöl gegenüber fossilen Kraftstoffen insbesondere in der geringen Wassergefährdung und hohen biologischen Abbaubarkeit liegen. Daneben geht aufgrund der geringen Flüchtigkeit von Rapsöl während der Produktion und Verteilung, ebenso wie von den eingesetzten Hilfs- und Begleitstoffen im Gegensatz zu mineralischen Kraftstoffen kein nennenswertes Emissionsrisiko aus. Deutlich schwieriger gestaltet sich die Bewertung der Umweltauswirkung hinsichtlich Bodenerosion, Bodenverdichtung, Bodenfruchtbarkeit, Nährstoffeintrag in Grundwasser und Gewässer, Lachgas (N₂O)-Emissionen, Risiken durch Pflanzenschutzmittelanwendung den spezifischen Flä-

chenbedarf, der Artenvielfalt, Beitrag zur Kulturlandschaft, Erholungswert und weitere. Da diese Umwelteinwirkungen keinen direkten Vergleich zu fossilen Kraftstoffen zulassen, soll darauf im Rahmen dieses Leitfadens nicht näher eingegangen werden. Als wichtigen Umweltaspekt sind jedoch die Schadstoffemissionen bei der Kraftstoffverbrennung zu berücksichtigen. Im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens, das vom *Bayerischen Landesamt für Umweltschutz* mit Mitteln des *Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen* gefördert wurde mit dem Titel: „*Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke - Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung*“, wurden an drei Praxis-BHKW unterschiedlicher Leistungsklassen umfangreiche Emissionsmessungen durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse dazu werden unter 2.9 auszugsweise dargestellt.

2.8.1 Energie- und CO₂-Bilanz bei der Rapsölbereitstellung

Häufig herangezogene Bewertungsmerkmale für den Vergleich verschiedener Verfahren der Energienutzung sind Energie- und CO₂-Bilanzen. Bei Hartmann [15] werden die Energieerträge sowie die Brutto-CO₂-Einsparungen (Output) von Rapsöl und den Beiprodukten dem eingesetzten fossilen Energieaufwand bzw. CO₂ (Input) bei der Rapsölbereitstellung gegenübergestellt. Der gesamte Input setzt sich aus den Inputs der einzelnen Verfahrensschritte, wie Saatgutherstellung, Rapsanbau, Ölgewinnung in zentralen Ölmühlen und Transport zusammen. Als Rapssaatertrag wird von ca. 3 t/ha ausgegangen, die erntbare Strohmenge unter Berücksichtigung der Ernteverluste mit 3,5 t TM/ha angesetzt. Der Gesamt-Energieertrag setzt sich bei dieser Untersuchung vereinfacht aus dem Energiegehalt des Rapsöls plus dem Energiegehalt der Koppelprodukte (Rapskuchen, Rapsstroh) zusammen, obgleich Rapskuchen üblicherweise als Tierfutter verwendet wird. Da Rapsstroh gemäß gängiger Praxis derzeit nicht zu Heizzwecken verwendet wird, sondern am Feld verbleibt, werden verschiedene Nutzungsintensitäten der Koppelprodukte (mit/ohne thermischer Rapsstrohnutzung) betrachtet. Als weitere Variante wird der Einsatz von Gülle anstelle einer Minereraldüngung kalkuliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Demnach ergibt sich bei einer unterstellten rein thermischen Nutzung von Rapsöl und Presskuchen (unterschiedliche Feuerungswirkungsgrade wurden berücksichtigt) eine Energiebilanz von 1:3,5 und eine CO₂-Bilanz von 1:4,7. Wird zusätzlich eine Strohnutzung und der teilweise Ersatz von Minereraldünger durch Gülle unterstellt, verbessert sich die Energiebilanz noch einmal deutlich auf 1:7,8 und die CO₂-Bilanz auf 1:8,9 (Tabelle 7).

Tabelle 7: Energie und CO₂-Bilanzen für die Rapsölbereitstellung durch Rapsanbau und Ölgewinnung mit unterschiedlicher Berücksichtigung der Koppelprodukte (nach HARTMANN 1995 [15])

Energieträger und Verfahren	Input		Output		Bilanzen Out./In.		primär-energetischer Substitutionswert GJ/(ha*a)	CO ₂ -Minderung	
	Primär-energie ¹⁾	CO ₂	Primär-energie ¹⁾	CO ₂	Energie	CO ₂		t/(ha*a)	t/GJ ²⁾
	GJ/(ha*a)	t/(ha*a)	GJ/(ha*a)	t/(ha*a)					
Rapsöl, inkl. Rapskuchen ohne Strohnutzung, ohne Gülle	20,98	1,22	74,27	5,72	3,5	4,7	53,3	4,50	0,063
Rapsöl, inkl. Rapskuchen ohne Strohnutzung, mit Gülle	14,66	1,01	74,27	5,72	5,1	5,6	59,6	4,71	0,066
Rapsöl, inkl. Rapskuchen mit Strohnutzung, ohne Gülle	23,52	1,35	134,01	10,10	5,7	7,5	110,5	8,75	0,069
Rapsöl, inkl. Rapskuchen mit Strohnutzung, mit Gülle	17,19	1,14	134,01	10,10	7,8	8,9	116,8	8,96	0,071

¹⁾ substituierte Primärenergie

²⁾ t je GJ substituierte Endenergie

2.8.2 Primärenergieeinsparung durch BHKW

Neben dem vorrangigen Ziel Energie einzusparen (z.B. durch bessere Wärmedämmung, effektivere Elektrogeräte) ist eine möglichst effiziente Primärenergienutzung anzustreben. Blockheizkraftwerke können durch die gekoppelte Bereitstellung von Wärme und Strom verglichen mit einer herkömmlichen getrennten Strom- und Wärmebereitstellung einen wesentlichen Beitrag dazu leisten. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob das BHKW mit Rapsöl oder Heizöl betrieben wird, da von annähernd gleichen Wirkungsgraden ausgegangen werden kann. Dennoch bleibt zu beachten, dass die Art der eingesetzten Energieträger (Pflanzenöl/Heizöl) unterschiedlich ist und für die Bereitstellung von Pflanzenöl nur ein Bruchteil der darin enthaltenen Energie als fossile Primärenergie aufgewendet werden muss (siehe 2.8.1).

Entscheidend für eine Bewertung der möglichen Primärenergieeinsparung durch ein BHKW ist:

- Wahl der Vergleichsgrundlage (BHKW mit oder ohne Spitzenlastkessel, Art des Brennstoffes)
- die Wahl des ungekoppelten Vergleichssystems (Wirkungsgrade, Art der eingesetzten Primärenergie)
- sowie die Wahl der Methodik

Auf zwei gebräuchliche Bewertungsmethoden soll nachfolgend kurz eingegangen werden. Bei der **Gutschrift-Methode** wird das gekoppelte System auf ein reines wärmebereitstellendes System vereinfacht. Die Differenz aus den Primärenergieeinsätzen von BHKW und Kraftwerk wird als eingesetzte Primärenergie zur Wärmebereitstellung durch das BHKW betrachtet und mit dem notwendigen Primärenergieeinsatz eines Heizkessels zur Bereitstellung der gleichen Wärmemenge verglichen. Hierbei können sich rechnerisch sehr hohe relative Einsparungsgrade ergeben.

Bei der **ASUE-Methode** (ASUE = Arbeitskreis für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch) wird die Strom- und Wärmebereitstellung gleichberechtigt betrachtet. Verglichen wird die gesamte durch das BHKW bereitgestellte Strom- und Wärmemenge mit einer ungekoppelten Bereitstellung von Strom durch z.B. ein Kondensationskraftwerk und Wärme durch z.B. einen Heizkessel. In dem Heft BHKW-Grundlagen [2] und unter GAILFUß [14] wird näher auf diese Methoden eingegangen. Hier soll nachfolgend beispielhaft ein stark vereinfachtes Vergleichsszenario aufgestellt werden:

Vergleichsgrundlage:

Strom- und Wärmebereitstellung durch ein Rapsöl-BHKW (ohne Spitzenkessel):

Brennstoffwärmeleistung: 30 kW (entspricht einem Kraftstoffverbrauch von ca. 3 l/h)

elektrische Leistung: 8 kW (Wirkungsgrad = 27 %)

thermische Leistung: 15 kW (Wirkungsgrad = 50 %)

Vergleichssystem:

Strombereitstellung durch Kondensationskraftwerk

Wirkungsgrad = 37 % (Durchschnitt des deutschen Kraftwerkbestandes 1998 [14])

Wärmebereitstellung durch Heizkessel

Wirkungsgrad = 90 %

Nach der ASUE-Methode ergeben sich die in Tabelle 8 dargestellten systemabhängigen Primärenergieeinsätze zur Bereitstellung von 8 kWh Strom und 15 kWh Wärme. Wird nun der Primärenergieaufwand der gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung durch das BHKW von 30 kWh mit der Summe des Primärenergieaufwandes von Kondensationskraftwerk und Heizkessel von 38,2 kWh verglichen, so ergibt sich eine Primärenergieeinsparung durch das BHKW von 8,2 kWh oder 21 %. Bei höheren elektrischen Wirkungsgraden von BHKW nimmt der Anteil eingesparter Primärenergie noch deutlich zu.

Der hier berechnete Wert von 21 % zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Angaben der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre". Danach verringert sich bei einem BHKW mit Spitzenlastkessel im Vergleich zu einem Kohlekraftwerk und einer Ölheizung der Primärenergieeinsatz im Durchschnitt um etwa 20 %.

Tabelle 8: Vergleich des Primärenergieeinsatzes von BHKW und entkoppeltem Vergleichssystem

System der Energiebereitstellung	Primärenergiemenge im Brennstoff kWh	Erzeugte Strommenge kWh _{el}	Erzeugte Wärmemenge kWh _{th}	Verluste kWh
1) BHKW	30	8	15	7
2a) Kondensationskraftwerk	21,6	8	--	13,6
2b) Heizkessel	16,7	--	15	1,7
2) Entkoppelt gesamt	38,2	8	15	15,3

2.9 Abgasemissionen

Trotz einer Reihe von Umweltvorteilen beim Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff hinsichtlich Boden- und Gewässerschutz, Regenerierbarkeit und geringerer CO₂-Eintrag in die Atmosphäre, sind auch schädliche Auswirkungen von Abgasemissionen zu berücksichtigen. Im Rahmen einer Literaturstudie wurden 20 Untersuchungen aus den Jahren von 1989 bis 1997 ausgewertet, in denen die Abgasemissionen von Diesel- und Pflanzenölmotoren, miteinander verglichen wurden [25][26].

Dabei wurde festgestellt, dass der Betrieb von **herkömmlichen Dieselmotoren** mit Pflanzenöl bei den Abgaskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC), Partikelmasse und Benzol im Mittel zu einer Erhöhung um etwa 50 %, bei den Aldehyden um ca. 120 % führt. Dies ist in erster Linie auf die nicht für Pflanzenöl geeigneten bzw. optimierten Motoren und die dadurch schlechtere Verbrennung zurückzuführen. Bei den Stickstoffoxiden (NO_x) und den polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffen war das Emissionsbild im Mittel aller Angaben etwa gleich. Bei den Schwefeloxidemissionen (SO_x) ist eine deutliche Minderung bei Pflanzenölbetrieb feststellbar, da Pflanzenöl im Gegensatz zu Dieselkraftstoff nur sehr geringe Mengen an Schwefel enthält.

Vergleicht man dagegen richtigerweise die Emissionen von pflanzenölbetriebenen **pflanzenöлтаuglichen Motoren** mit dieselbetriebenen Motoren, so ergeben sich gemittelt über alle Untersuchungen für CO und NO_x keine Veränderung, für HC und die Partikelmasse eine Halbierung des Emissionsniveaus gegenüber Dieselkraftstoff.

Das Emissionsverhalten von drei **pflanzenölbetriebenen BHKW** unterschiedlicher Leistungsklassen (8 kW_{el}, 60 kW_{el} und 110 kW_{el}) im Praxiseinsatz wurde erstmals von der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz im Rahmen des Vorhabens „*Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke - Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung*“ umfassend untersucht. Ein Vergleich mit Dieselmotoren- oder Heizölbetrieb erfolgt darin nicht, da es sich um Motoren handelt, die ausschließlich mit Pflanzenölkraftstoff betrieben werden.

Alle untersuchten BHKW weisen eine Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 MW (ca. 400 kW_{el}) auf und sind demnach immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig (vgl. Kapitel 2.6.1). Die angegebenen Emissionsbegrenzungen gemäß TA-Luft sind daher nicht einschlägig und dienen nur zur Einordnung.

Innerhalb des Beobachtungszeitraums von etwa 17 Monaten weisen die drei BHKW gemittelt über mehrere Messtage, Kohlenmonoxidemissionen (CO) von 23,6 mg/Nm³, 38,8 mg/Nm³ und 55,8 mg/Nm³ (Modul 1) bzw. 183,4 mg/Nm³ (Modul 2) auf (bezogen auf 5 % O₂) und liegen damit deutlich unter der Emissionsbegrenzung gemäß TA-Luft von 650 mg/Nm³ (für Anlagen > 1MW_{FWL}) (Tabelle 9). Die vergleichsweise niedrigen CO-Emissionen, sind ebenso wie die niedrigen Kohlenwasserstoffemissionen (HC) von ca. 4-11 mg/Nm³ in erster Linie auf die Verwendung von Oxidationskatalysatoren bei allen drei untersuchten BHKW zurückzuführen, womit Umsatzraten von ca. 70-90 % erzielt werden. Oxidationskatalysatoren werden heute vielfach eingesetzt und weisen einen hohen Entwicklungsstand auf. Da diese für den Einsatz von Pflanzenöl besonders geeignet sind und zu einer deutlichen Verringerung von CO, HC und vor allem auch von Aldehyden und Gerüchen beitragen, sollte auf ihren Einsatz nicht verzichtet werden.

Bei den Stickstoffoxidemissionen ist ein verbrennungsverfahrensbedingter Unterschied zwischen dem Aggregat mit Wirbelkammer (BHKW 1) und den beiden Motoren mit Direkteinspritzung (BHKW 2 und 3) erkennbar. Ergeben sich für das Wirbelkammer-BHKW 1 etwa 2000 mg/Nm³ NO_x im Abgas, so sind es bei BHKW 2 und 3 etwa 2800-3300 mg/Nm³ (angegeben als NO₂ und bezogen auf 5 % O₂). Der Vergleichswert der TA-Luft 86 von 4000 mg/Nm³ wird damit von allen BHKW eingehalten. Allerdings liegt der Zielwert, bzw. der nach dem derzeitigen Stand der Technik für Anlagen > 1 MW Feuerungswärmeleistung zu fordernde Grenzwert gemäß TA-Luft bei 1000 mg/Nm³ (siehe Tabelle 3). Dieser kann voraussichtlich nur durch nachmotorische Maßnahmen (Entstickungskatalysatoren) erreicht werden.

Bei den Staubemissionen zeichnet sich der Einsatz eines Rußfilters deutlich positiv im Ergebnis ab. Mit 2,6 bzw. 3,7 mg/Nm³ (bezogen auf 5 % O₂) liegt bei BHKW 3 der Partikelmasseausstoß deutlich niedriger als bei den anderen beiden BHKW, für die Staubemissionen von 80 bzw. 100 mg/Nm³ ermittelt wurden.

Entstickungskatalysatoren und Rußfilter können wie Oxidationskatalysatoren ebenfalls einen entscheidenden Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Jedoch handelt es sich hierbei noch um weniger verbreitete und ausgereifte Technologien, die z.T. mit hohen Investitionskosten behaftet sind. Deshalb ist insbesondere bei kleineren Anlagen die Verhältnismäßigkeit zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei BHKW die Vergleichswerte nach TA-Luft 86, gültig für Anlagen größer 1 MW_{FWL} einhalten (Tabelle 9). Hingegen wird der aktuelle Grenzwert für die Stickstoffoxidemissionen bei Anlagen > 1 MW_{FWL} von 1000 mg/m³, (angegeben als NO₂, bezogen auf 5 % O₂) von keinem Aggregat erreicht. In absehbarer Zeit ist mit einer verschärften Abgasgesetzgebung sowohl hinsichtlich der Emissionsbegrenzungen als auch in Bezug auf eine Erweiterung der Gültigkeit für Anlagen kleiner 1 MW_{FWL} zu rechnen. Aus den z.T. deutlichen Unterschieden im Emissionsbild der BHKW kann auf ein weiteres Optimierungspotential geschlossen werden. Neben den besonders wirksamen nachmotorischen und den motorischen Emissionsminderungsmaßnahmen, sollte auch einer hinsichtlich den Abgasemissionen verbesserten Pflanzenölqualität Bedeutung zukommen, wenn es gilt die Umweltvorteile von Rapsöl-BHKW in Zukunft noch stärker zu nutzen.

Tabelle 9: Abgasemissionen von Pflanzenöl-BHKW bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O₂-Gehalt

Abgas-komponente [mg/Nm ³] ¹⁾		BHKW 1 (IDI) ²⁾ Nennlast: 8 kW _{el}	BHKW 2 (DI) ³⁾ Teillast: 40 kW _{el}	BHKW 3 (DI) ³⁾ mit Rußfilter Nennlast 110 kW _{el}		Emissionsbe- grenzung ⁴⁾ TA-Luft 86 (vgl. Tabelle 3)
				Modul 1	Modul 2	
CO	Mittel	23,6	38,8	55,8	183,4	650
	Min	12,0	16,0	36,0	59,5	
	Max	36,7	49,4	75,7	291,0	
NO_x	Mittel	2026	2793	3329	2791	4000
	Min	1901	2220	3313	2691	
	Max	2295	3582	3345	2862	
HC	Mittel	3,7	11,2	7,0	10,2	--
	Min	2,0	9,2	6,7	6,5	
	Max	6,0	12,5	7,3	15,3	
Partikel- masse (Staub)	Mittel	79,5	100,3	2,6	3,7	130
	Min	60,0	68,8	1,7	2,4	
	Max	136,0	166,0	3,5	5	
<i>Anzahl Messtage</i>		6	4	2	3	--
<i>Anzahl 1/2h-Mittel</i>		25	16	6	12	--

¹⁾ Angaben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³), trockenes Abgas, 0 °C, 1013mbar, 5 % O₂

²⁾ IDI = Motor mit indirekter Einspritzung, hier: Wirbelkammer

³⁾ DI = Motor mit Direkteinspritzung

⁴⁾ Emissionsbegrenzung gemäß TA-Luft 86 (für Anlagen > 1 MW Feuerungswärmeleistung)

3 Praktische Hinweise

3.1 Kraftstoff

3.1.1 Kraftstoffqualität

Für einen wartungsarmen und wenig störanfälligen Betrieb von Blockheizkraftwerken sollte Kraftstoff von gesicherter hoher Qualität verwendet werden. Mit Abstand am meisten Einsatzerfahrungen liegen bei der Verwendung von Rapsöl vor. Für Rapsölkraftstoff ist auch die Standardisierung mit Festschreibung der Mindestanforderungen am weitesten fortgeschritten. Darüber hinaus ist Rapsöl mit einem geringen Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren im Vergleich zu anderen einheimischen Ölen wie z.B. Sonnenblume relativ stabil gegenüber Oxidations- und Alterungsprozessen, weist einen niedrigen Gehalt an Wachsen auf und eignet sich somit gut für eine längere Lagerung in Vorratstanks.

Es wird daher empfohlen, ausschließlich kaltgepresstes oder raffiniertes Rapsöl gemäß dem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard, Seite 6) einzusetzen. Rapsöl von ungewisser Herkunft und mit unbekanntem Eigenschaften sollte nicht verwendet werden. Beispielsweise führte bei einem Praxis-BHKW die Verwendung von ungenügend aufbereitetem Extraktionsöl zu einem Anstieg der Abgastemperatur innerhalb 2 h um ca. 80 °C und zur Bildung von Ablagerungen im Brennraum. Dies ist möglicherweise auf das Zusammenwirken von hohen Phosphorwerten (>100 mg/kg) und hohem Diglyceridgehalt (ca. 3 Gew.-%) sowie Restmengen an Lösungsmitteln (ca. 1 %) zurückzuführen. Auch nicht näher spezifiziertes meist in größeren Gebinden abgegebenes Pflanzenöl für Großküchen besteht oft aus einer Mischung verschiedener Pflanzenöle und sollte nicht als Kraftstoff eingesetzt werden. Abzuraten ist auch von der Verwendung gebrauchter Speiseöle (z.B. gebrauchte Fritieröle). Diese sind häufig stark schwankenden Qualitäten unterworfen und können sich hinsichtlich Fließverhalten, Korrosivität und Lagerstabilität, sowie den darin enthaltenen Verunreinigungen (z.B. NaCl) problematisch im BHKW-Betrieb verhalten, z.B. durch verschlechterten, unzureichenden Ausbrand und stark erhöhte Emissionen. Außerdem handelt es sich hierbei um die Verbrennung von Abfällen, für die die Anforderungen der „Siebzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe - 17. BImSchV)“ [24] zu beachten sind. Können die Abfälle nicht als Heizöl EL ähnlich eingestuft werden, haben die emissionsbegrenzenden Anforderungen an den Motor die entsprechenden Vorgaben der 17. BImSchV zu erfüllen. Vorgaben die von Motoren üblicherweise nicht erfüllt werden können. Öle unbekannter Herkunft sollten nur nach vollständiger Analyse und bei Einhaltung aller Qualitätskriterien für den Einsatz in Blockheizkraftwerken verwendet werden.

Ein Zwischentanken von Heizöl oder Dieselmotorkraftstoff sollte vermieden werden, da dadurch die Lagerungsstabilität der Mischung stark beeinträchtigt werden kann. Außerdem kommt es bei schwefelhaltigen Kraftstoffen im Oxidationskatalysator zur ungewollten Oxidation von SO_2 zu SO_3 sowie zur Bildung weiterer Schwefelverbindungen, die die katalytische Beschichtung der Oxidationskatalysatoren überziehen und deren Wirkung beeinträchtigen, was zu einem Anstieg der Abgasemissionen führt. Darüber hinaus können mineralische Kraftstoffe eventuell festgesetzte Pflanzenölrückstände in Tanks und Leitungen lösen, die dann die Kraftstoffversorgung des Aggregats durch Verstopfen von Filter und Leitungen beeinträchtigen können.

3.1.2 Beschaffung

Entscheidend für den Betreiber von BHKW ist eine einfache Beschaffung des Pflanzenöls mit einer hohen Versorgungssicherheit. Wird ein Lieferant gefunden, der das Pflanzenöl entsprechend den Wünschen des BHKW-Betreibers anbietet, werden häufig längerfristige Liefervereinbarungen getroffen. Direkte Geschäftsvereinbarungen zwischen Produzent und Anwender führen im Allgemeinen zu einer hohen Motivation des Öllieferanten, Versorgungssicherheit und hohe Qualität zu gewährleisten, um den Kunden längerfristig an sich zu binden und sich damit einen gesicherten Absatzmarkt aufzubauen. Nach eigenen Erhebungen bieten die in Tabelle 11 (Seite 61) aufgeführten Ölmühlen in Bayern Rapsöl als Kraftstoff an.

Die Anlieferung erfolgt bei kleineren Mengen häufig in Kunststoff- oder Stahlblechbehälter auf Paletten mit ca. 800-1000 l Inhalt. Diese können dann auch als Lagerbehälter beim BHKW-Betreiber dienen. Bei größeren BHKW mit hohen Kraftstoffverbräuchen und guter Auslastung, ist es sinnvoll, einen Kraftstofftank mit entsprechenden Befüll- und Entleerungseinrichtungen sowie Druckausgleichsventilen und Füllstandsanzeige zu installieren. Zur Anlieferung des Pflanzenöls werden dann meist Tanklastzüge eingesetzt. Dabei ist es wichtig, dass die Ladebehälter sauber und frei von Restmengen von zuvor transportierten Gütern sind. So führten z.B. Rückstände an Kartoffelstärke im Pflanzenöl, die ein Spediteur zuvor geladen hatte, in einem Fall dazu, dass nach aufgetretenen Filterverstopfungen am BHKW die gesamten kraftstoffführenden Komponenten entleert, gereinigt und zum Teil ausgetauscht werden mussten.

3.1.3 Qualitätskontrolle und -sicherung

Eine erste orientierende Qualitätsbeurteilung durch Sicht- und Geruchskontrolle einer repräsentativen Ölprobe sollte mindestens bei jedem Betankungsvorgang erfolgen. Frisches Rapsöl ist durchsichtig klar, hat eine goldgelbe Farbe und riecht leicht

nussartig. Bei einer Sichtkontrolle ist insbesondere auf feste Fremdstoffe im Öl, auf Trübungen, Verfärbungen (v.a. grünliche Verfärbungen), Phasentrennungen (z.B. durch freies Wasser) zu achten. Beim Geruchstest ist auf stechende Gerüche (z.B. durch Verunreinigung mit mineralischen Kraftstoffen oder Lösungsmittelrückständen) und auf ranzige Gerüche (z.B. durch stark oxidativ vorbelastete Öle) zu achten. Zur Überprüfung, ob die im RK-Qualitätsstandard geforderten Grenzwerte eingehalten werden, sind Schnelltests für die Kenngrößen: Wassergehalt, Neutralisationszahl und Gesamtverschmutzung verfügbar und bei der Firma ASG, Analytik-Service-Gesellschaft mbH in Augsburg¹ zu beziehen. An Schnelltests für weitere Kenngrößen wird derzeit noch gearbeitet. Diese Schnelltests dienen lediglich zu einer orientierenden qualitativen Einschätzung der Ölqualität, ersetzen aber nicht eine Ölanalyse entsprechend der vorgeschriebenen Prüfmethode. Eine Analyse der variablen Rapsöleigenschaften (siehe Kapitel 2.2.2) sollte bei Verdachtsfällen und bei der Ölmühle zumindest bei jedem Rapssaat-Chargenwechsel erfolgen. Eine Analyse aller Qualitätskriterien ist insbesondere bei Motortestläufen, Untersuchungen des Emissionsverhaltens oder bei aufgetretenen Motorschäden zur Schadensanalyse empfehlenswert. Zur besseren Vergleichbarkeit von Motorprüfungen und Emissionsmessungen wäre die Entwicklung eines Referenzrapsölkraftstoffs wünschenswert.

Probenahme

Das Ziel einer Probenahme von Rapsölkraftstoff ist, eine Teilmenge aus der Kraftstoffgesamtmenge zu entnehmen, die repräsentativ für die Gesamtmenge ist. Mit der Prüfung dieser Probe wird in den meisten Fällen beabsichtigt, die Gesamtkraftstoffmenge zu beurteilen. Neben der richtigen Entnahme der Probe ist es deshalb auch wichtig, die Probe mit den nötigen Informationen zu versehen, nämlich was, wann, von wem, wie entnommen wurde. Die Probenahme von Rapsöl kann in Anlehnung an die Probenahme von Mineralölen (DIN 51750 Teil 1 und 2) erfolgen. Vor der Probenahme aus einer Zapfanlage ist ein ausreichender Vorlauf zu entnehmen. Als Probenbehälter eignen sich neue oder sorgfältig gereinigte, trockene Gefäße mit dichten Verschlüssen. Beispielsweise können hierfür Chemikalien-Weithalsflaschen aus HDPE verwendet werden. Diese sind leicht, bruchstabil und preisgünstig. Geht es darum, den Wassergehalt auch nach längerer Probenlagerung noch genau bestimmen zu können, sind Probenflaschen aus Glas vorzuziehen. Die Probengefäße sind so zu befüllen, dass einerseits möglichst wenig Sauerstoff in das Öl eingetragen werden kann (hoher Füllstand) und andererseits noch genügend Luft für die Homogenisierung (Durchmischung) vor der Analyse im Probengefäß verbleibt. Nach dem

¹ ASG-Analytik-Service Gesellschaft mbH
Feldstraße 16-20, 86156 Augsburg

Befüllen werden die Behälter sofort verschlossen und, wenn erforderlich, verplombt oder versiegelt. Zur Probenbeschriftung eignen sich Anhängекarten oder selbstklebende Etiketten, die mit einem wasser- und öllunlöslichen Stift beschriftet werden. Die Probenmenge richtet sich nach der gewünschten Untersuchung. Für eine Kraftstoffanalyse gemäß RK-Qualitätsstandard ist eine Rapsölmenge von ca. 1 l ausreichend. Sollen Ölproben als Nachweis für eine vertraglich festgelegte gelieferte Qualität dienen, so sind 4 Ölproben zu entnehmen. Eine Ölprobe verbleibt beim Lieferanten, der für die Qualität garantiert, eine Ölprobe erhält der Empfänger, eine Ölprobe erhält das Analysenlabor und eine Ölprobe ist als Rückstellmuster im Falle einer Schiedsanalyse aufzubewahren. Alle Ölproben sind von beiden Vertragspartnern zu unterzeichnen und zu versiegeln. Bis zur Verwendung werden die Proben möglichst kühl (ca. 5 °C) und lichtgeschützt z.B. im Kühlschrank gelagert.

3.2 Kraftstofflagerung

Pflanzenöle sind im Gegensatz zu Heizöl und Diesekraftstoff nicht additiviert und sind daher auch stärker Alterungsvorgängen ausgesetzt (oxidativer Verderb, Bildung freier Fettsäuren). Die Oxidationsvorgänge von Ölen und Fetten werden begünstigt durch Sauerstoffzutritt, Licht und Wärme und durch katalytisch wirkende Schwermetallionen (z.B. Eisen, Kupfer). Bei dieser radikalischen Kettenreaktion (Autoxidation) erfolgt ein peroxidischer Einbau von Sauerstoff in das Ölmolekül. Dadurch erhöht sich die Neigung zur Polymerisierung des Öls, wobei einzelne Molekülstücke miteinander neu verbunden und vernetzt werden, was eine deutliche Erhöhung der Viskosität des Pflanzenöls und negative Auswirkungen auf die Eignung als Kraftstoff zur Folge hat. Neben Rückstandsbildung in Kraftstoffleitungen und Verharzungen an den Einspritzdüsen kann vorgealterter Kraftstoff, der in das Motorenöl gelangt verstärkt zu Wechselwirkungen zwischen Kraftstoff und Motorenöl führen, was die Schmierfähigkeit stark beeinträchtigen und Motorschäden hervorrufen kann. Die im Pflanzenöl natürlich vorkommenden Antioxidantien können diese Autoxidationsvorgänge verzögern. Um Autoxidationsvorgänge zu vermeiden, sind oben genannte Faktoren (Sauerstoff, Licht, Wärme, katalytisch wirkende Metalle) zu minimieren.

In Lagerungsversuchen wurde festgestellt, dass bei Unterschreiten einer Lagerungstemperatur von -10 °C Rapsöl nach spätestens 3 Tagen fest wird. Bei einer Temperatur von -25 °C kann Rapsöl bis zu 6 h flüssig gelagert werden. Die Versuche wurden in Probengefäßen mit einem Durchmesser von 30 mm durchgeführt und simulierten Bedingungen, ähnlich wie sie in Kraftstoffleitungen vorherrschen können. In größeren Lagertanks, bleibt das Pflanzenöl bei gleichen Temperaturen länger flüssig,

zumal festgewordenes Pflanzenöl am Behälterrand eine Isolationsschicht bildet. Im Gegensatz zu Dieselkraftstoff, wo sich bei tiefen Temperaturen irreversible Paraffinausscheidungen bilden, wird infolge niedriger Temperaturen festgewordenes Pflanzenöl beim Aufwärmen wieder rückstandsfrei flüssig. Dies gilt jedoch nur, wenn keine Verunreinigungen oder Wachse (z.B. Sonnenblumenöl) im Öl enthalten sind.

Als ortsfeste ober- und unterirdische Lagerbehälter ab einem Fassungsvermögen von etwa 1000 l eignen sich v.a. ein- und doppelwandige Stahl- oder Kunststoffbehälter mit Füll- und Entlüftungsleitungen, sowie Leckanzeigergeräten, Füllstandsanzeiger und Befüllsicherungseinrichtungen. Bestehende intakte Tankanlagen, die zur Lagerung von Heizöl benutzt werden, können nach vollständiger Entleerung und Reinigung auch für Pflanzenöl verwendet werden, sofern die nachfolgend angeführten Punkte berücksichtigt werden.

Folgende Empfehlungen können für die Lagerung von Rapsöl gegeben werden:

- möglichst konstant niedrige Lagerungstemperaturen (ca. 5-10 °C)
Eine gleichmäßig kühle Kraftstofflagerung wird am besten in Erdtanks realisiert. Ist die Errichtung eines Erdtanks nicht möglich, sollte der Vorratstank in einer kühlen Umgebung (z.B. in einem Keller) aufgestellt werden.
- keine Tankheizungen verwenden
Tankheizungen werden häufig zur Verbesserung der Fließ- und Pumpfähigkeit von kaltem Pflanzenöl eingesetzt. Aufgrund der mehrfach angesprochenen Alterungsproblematik ist jedoch von einem Aufwärmen des Pflanzenöls im Tank abzusehen. Zur Verbesserung der Pumpfähigkeit sollten stattdessen Kraftstoffleitungen mit größeren Querschnitten und/oder leistungsstärkere Förderpumpen verwendet werden. Kann auf eine Tankheizung nicht verzichtet werden, so sollte die Vorwärmung auf Raumtemperaturniveau (max. 25 °C) begrenzt bleiben.
- dunkler Aufstellungsort ohne direkte Sonneneinstrahlung
Licht fördert die Alterungsprozesse von Pflanzenöl. Deshalb sollte der Tank möglichst dunkel aufgestellt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn durchscheinende Kunststofftanks verwendet werden. Eine direkte Sonneneinstrahlung sollte in jedem Fall vermieden werden. Erfolgt die Aufstellung des Lagertanks im Freien, so ist für eine bestmögliche Beschattung der Tanks zu sorgen.
- Zutritt von Sauerstoff gering halten
Sauerstoffeintrag in das Pflanzenöl fördert dessen Oxidation. Deshalb sollte bei Tank- und Pumpvorgängen „Plätschern“ vermieden werden. Durch entsprechend geringe Fallhöhen oder durch „Abfließen lassen“ an den Tankinnenwänden kann Sauerstoffeintritt in das Pflanzenöl weitgehend vermieden werden. Nach dem Befüllen sollte der Tank immer gut verschlossen sein. Selbstverständlich ist jedoch eine ausreichende Tankbelüftung durch Be- und Entlüftungseinrichtungen zur Vermeidung von Unter- und Überdruck sicherzustellen. Je höher der Füllstand im Tank (geringes darüber liegendes Luftpolster) und je kleiner die Grenzfläche Pflanzenöl/Umgebungsluft ist, desto geringer ist die eingetragene Sauerstoffmenge.

- Eintrag von Wasser vermeiden
Um Wassereintrag in den Tank zu vermeiden, ist der Tank geschlossen zu halten. Auch sollte eine Kondenswasserbildung durch starke Temperaturunterschiede von Tank und Tankinhalt (z.B. Befüllung eines kalten Tanks mit warmen Pflanzenöl) weitgehend ausgeschlossen werden.
- Eintrag von Verschmutzungen ausschließen
- Tank und kraftstoffführende Teile nicht aus Kupfer oder Messing
Da Metalle (v.a. Kupferionen) stark katalytisch auf die Öloxidation wirken, sollten nur Tanks und Leitungen aus Stahl oder besser Edelstahl verwendet werden. Bei dunkler Aufstellung sind auch Kunststofftanks, z.B. aus Polyamid geeignet.
- Kraftstoffentnahmestelle nicht unmittelbar am Tankboden anbringen
Die Entnahme des Pflanzenöls sollte entsprechend der gängigen Praxis nicht unmittelbar am tiefsten Punkt des Tankbodens erfolgen, sondern, wie z.B. durch eine feste Entnahmeleitung oder eine Schwimmtnahme realisierbar, mehrere Zentimeter darüber. Dadurch gelangen sedimentierte Feststoffe nicht in die Kraftstoffzuführung.
- Lagertanks sollen vollständig und einfach entleerbar sowie leicht zu reinigen sein
Eine regelmäßige ca. 1-3jährige Tankreinigung ist empfehlenswert, um Bodensedimente und eventuell eingebrachtes Wasser entfernen zu können. Eine Tankreinigung verlängert die Lagerstabilität frischer Pflanzenölchargen, da die Umsetzungsvorgänge verstärkt im Sediment und an der Grenzschicht Wasser/Öl stattfinden. Um eine einfache Tankentleerung zu gewährleisten, sind großzügige Reinigungsöffnungen und Abpumpeinrichtungen vorzusehen.
- Die Tankgröße bemisst sich nach dem Kraftstoffverbrauch. Für Heizöl-Lagerbehälter wird empfohlen, dass deren Fassungsvermögen etwa so groß ist, dass Öl für mindestens eine Heizperiode eingelagert werden kann und keine Zwischenbefüllung notwendig ist. Bei BHKW mit einer hohen jährlichen Auslastung und entsprechend hohem Kraftstoffverbrauch, kann zur Minderung des Lagerplatzbedarfs auch eine halb- bis vierteljährliche Betankung sinnvoll sein. Die Lagerdauer von Pflanzenöl sollte bei guten Lagerungsbedingungen ca. 12 Monate nicht überschreiten.

3.3 Kraftstoffzuführung und Einspritzsystem

Um eine ausreichende Kraftstoffversorgung des Motors zu gewährleisten sind v.a. aufgrund der höheren Viskosität von Pflanzenöl die Komponenten der Kraftstoffzuführung besonders zu berücksichtigen. Prinzipiell gelten die für die Lagerung von Pflanzenöl aufgeführten Empfehlungen entsprechend auch für die Kraftstoffzuführung.

- Kraftstoffführende Leitungen u. Verschraubungen nicht aus Kupfer oder Messing
Bewährt haben sich Rohrleitungen und Verschraubungen aus chromatiertem Stahl z.B. aus dem Hydraulikbereich oder besser Edelstahl. Daneben können pflanzenölbeständige flexible Schlauchleitungen (z.B. Hydraulikschläuche aus

NBR-Kautschuk mit 1-2 Gewebelagen) verwendet werden. Die Leitungen sollen druckbeständig bis etwa 5-10 bar sein und an den Verbindungsstellen gut abdichten. Müssen Schlauchverbindungen z.B. an einem nicht ortsfest aufgestellten Tank häufiger gelöst werden, so empfiehlt sich die Verwendung von Schnellkupplungen mit Rückschlagventilen, um das Leerlaufen von Leitungen zu vermeiden.

- Leitungsquerschnitte

Aufgrund der größeren Zähflüssigkeit des Pflanzenöls sind ausreichend dimensionierte Rohrleitungsquerschnitte eine wichtige Voraussetzung für eine sichere Kraftstoffversorgung. Rohrleitungen mit einem Innendurchmesser von ca. 10-12 mm haben sich bei kleineren BHKW bewährt und erlauben Kraftstoffdurchflüsse von mindestens 3-30 l/h.

- Probenahmeverrichtung und Schauglas

Zur einfachen Kontrolle der Pflanzenölqualität ist ein Hahn zur Probenahme in die Kraftstoffzuleitung zum BHKW vorzusehen. Ein Schauglas, z.B. auch in Verbindung mit einem Vorfilter oder einer Rücklaufzuführereinheit ermöglicht eine kontinuierlich Überwachung eventuell im Öl enthaltener Feststoffe oder von Lufteintrag in Leitungen.

- Kraftstoffförderpumpe

Die bei stationären Dieselmotoren üblicherweise an der Einspritzpumpe angebrachte mechanisch angetriebene Kraftstoffförderpumpe reicht meist nicht aus, das hoch viskose Pflanzenöl dauerhaft und in ausreichender Menge zu fördern. Selbst bei kurzen Leitungslängen und niedrigen Saughöhen kann es zu Versorgungsschwierigkeiten kommen.

Aggregatexterne Elektro-Förderpumpen gewährleisten im Allgemeinen eine zuverlässige Kraftstoffförderung und ermöglichen ein einfaches Entlüften der Kraftstoffleitung nach dem Filterwechsel oder bei Lufteintrag. Die Position sollte nahe dem Kraftstoffvorratsbehälter gewählt werden, um saugseitig die Leitungslänge möglichst gering zu halten und damit Lufteintrag oder Verstopfung der Leitungen entgegenzuwirken. Dies gilt insbesondere dann, wenn das Pflanzenöl aus einem tieferliegenden Lagerbehälter angesaugt werden muss. Die Elektropumpe sollte so dimensioniert sein, dass ihr Fördervolumen etwa 50-100 % über dem maximalen Kraftstoffverbrauch des BHKW liegt. Dies bedeutet, dass bei einem Kraftstoffverbrauch von ca. 20 l/h die Förderleistung der Pumpe etwa 30-40 l/h betragen sollte. Zur Kontrolle des Kraftstoffdrucks können saug- und druckseitig Manometer eingebaut werden. Die elektrisch betriebene Kraftstoffförderpumpe sollte dabei so eingestellt sein, dass der zulässige Maximaldruck druckseitig nicht überschritten wird. Die überschüssige Kraftstoffmenge strömt entweder innerhalb der Pumpe in einem Kurzschlusskreislauf wieder zurück oder gelangt extern über eine Schlauchleitung und eine Rücklaufzuführung wieder in den Vorlauf.

- Leitungsführung

Grundsätzlich sollte die Kraftstoffzuleitung vom Tank zum Motor möglichst kurz und die Saughöhe gering sein. Daneben ist darauf zu achten, dass ein einfaches Auswechseln der Leitungen möglich ist. Keinesfalls sollte die Kraftstoffleitung unter Putz oder im Boden verlegt werden. Beim Anschluss der Zuleitung an die Kraftstoffleitungen des Motors ist zu berücksichtigen, dass dazu flexible Leitungen verwendet werden müssen, um die Schwingungen des Motors nicht auf das feste Rohrleitungssystem zu übertragen.

Um den Eintrag von thermisch vorbelastetem Pflanzenöl in den Tank zu vermeiden, ist es empfehlenswert, die Kraftstoffrücklauf- und Leckölleitung wieder dem Vorlauf zuzuführen. Zur Realisierung dieses sogenannten Einstrangverfahrens hat sich eine Einheit zur Rücklaufzuführung mit Filtereinsatz und Entlüftung bewährt. Dieses vor allem im Heizungsbau verwendete Bauteil, besitzt ein transparentes Gehäuse und lässt somit eine Sichtkontrolle des Pflanzenöls im laufenden Betrieb zu. Die Rücklaufzufuhr muss saugseitig erfolgen.

- **Filtereinrichtungen**

Kraftstofffilter werden eingesetzt, um Schäden am Einspritzsystem durch Fremdkörper vorzubeugen. Die Filterwirkung nimmt beim Gebrauch durch den Aufbau von Filterkuchen zu. Dabei erhöht sich gleichzeitig auch der Durchflusswiderstand. Bei der Verwendung von Pflanzenöl mit einer hohen Gesamtverschmutzung kann bei herkömmlichen Wechselfiltern die Beladung mit Partikeln nach wenigen Betriebsstunden so stark ansteigen, dass ein Filterwechsel bereits vor dem empfohlenen Wartungsintervall notwendig wird. Zudem führen die höhere Viskosität, ein hoher Gehalt an Phospholipiden (Schleimstoffe) oder wachshaltige Pflanzenöle zu einer schnelleren Filterverstopfung. Um den Wartungsaufwand und eventuelle Ausfallzeiten nicht zu erhöhen, sollte Pflanzenöl mit einer geringen Gesamtverschmutzung und einem niedrigen Phosphorgehalt gemäß dem RK-Qualitätsstandard eingesetzt werden. Ebenso sollten wachshaltige Pflanzenöle, wie z.B. Sonnenblumenöl vermieden werden. Zur Verlängerung der Filterstandzeit bei größerem Schmutzanfall, können auch gröbere Vorfilter (meist Siebfilter) dem Feinfilter vorgeschaltet werden. Anstatt eines herkömmlichen Diesel-Wechselfilters können auch Motorenölfiler als Kraftstofffilter eingesetzt werden, die sich für das höher viskose Pflanzenöl oft besser eignen. Die notwendige mittlere Filterfeinheit beträgt für Reiheneinspritzpumpen etwa 5 μm und für Verteiler-einspritzpumpen etwa 10 μm [20]. Zur Minimierung von BHKW-Standzeiten sind parallelgeschaltete Kraftstoffbypassfilter empfehlenswert.

- **Kraftstoffvorwärmung**

Eine Kraftstoffvorwärmung sollte wenn überhaupt, nur dort eingesetzt werden, wo das Pflanzenöl in kurzer Zeit dem Motor zur Verbrennung zugeführt wird, um Verharzungen im Kraftstoffsystem zu vermeiden. Keinesfalls sollte eine Vorwärmung über Raumtemperaturniveau hinaus in Lagerbehältern oder während Stillstandszeiten des Motors stattfinden. In der Praxis traten hierbei z.T. erheblich Schäden an BHKW-Anlagen auf.

- **Einspritzpumpe und Einspritzdüse**

Das gesamte Einspritzsystem insbesondere aber Einspritzpumpen und Einspritzdüsen mit schnell wechselndem Druckauf- und -abbau werden durch die höhere Viskosität von Pflanzenöl meist stärker belastet als bei Dieselbetrieb. Hinzu kommt, dass beim Betrieb mit Pflanzenöl häufig ein höherer Düsenabspritzdruck eingestellt wird. Die bei Stationärmotoren üblicherweise verwendeten Reiheneinspritzpumpen sollten deshalb von hoher Qualität hinsichtlich Werkstoffauswahl und Verarbeitung sein, um einem dauerhaften Betrieb standzuhalten. Gemäß den Aussagen von Umrüstfirmen haben sich Einspritzpumpen der Firma Bosch für den dauerhaften Einsatz mit Pflanzenöl meist als tauglicher erwiesen als Pumpen anderer Hersteller. Zur Vermeidung von Verklebungen im Einspritzsystem, sollte nur Kraftstoff mit hoher Oxidationsstabilität eingesetzt werden. Insbesondere bei längeren Stillstandszeiten des Aggregats besteht die Gefahr des Verklebens oder Verlackens von vorgealtertem Pflanzenöl im Einspritzsystem.

Einspritzdüsen sind für die dosierte Einspritzung, Kraftstoffaufbereitung, den Einspritzverlauf und das Abdichten gegen den Brennraum verantwortlich. Beim Betrieb des Motors kommt es in Abhängigkeit von der Düsenbauart, der Betriebsweise, der Verbrennungstemperatur und nicht zuletzt der Kraftstoffqualität zu Verkokungen an den Düsenöffnungen. Ein wichtiger Anhaltspunkt für die Bildung von Ablagerungen im Einspritzsystem stellt die Kraftstoffkenngroße Koksrückstand dar. Durch Verkokungen und Ablagerungen im Einspritzsystem erhöht sich der Verschleiß von bewegten Bauteilen und es besteht die Gefahr, dass es bei eingeschränkter Freigängigkeit der Düsennadel zu einer unkontrollierten Kraftstoffdosierung mit deutlich erhöhten Emissionen insbesondere an Ruß kommt. Besonders am Ende der Einspritzung ist ein schnelles Schließen der Düsennadel mit einer guten Abdichtung zum Brennraum wichtig. Wird das Spritzende ungünstig verschleppt, kann es zum Nachtröpfeln und zur Erhöhung der HC- und Rußemissionen führen. Neben einer allgemein schlechteren Verbrennung, besteht bei schlecht abdichtenden Düsen darüber hinaus verstärkt die Gefahr, dass unverbrannter Kraftstoff über die Zylinderwände in das Motoröl gelangt. Reichert sich Pflanzenöl im Schmieröl an, so kann es unter bestimmten Bedingungen zu einer Eindickung des Motoröls und zum Ausfall der Schmierfähigkeit kommen. Eine derartige Motoröleindickung führte als Folge von schlecht abdichtenden Einspritzdüsen in der Vergangenheit zu schweren Motorschäden durch Kolbenfresser. Auch Verstopfungen durch Partikel, die mit dem Kraftstoff in die Einspritzdüsen gelangen, sollten durch die Verwendung von Pflanzenöl mit hohem Reinheitsgrad gemäß RK-Qualitätsstandard möglichst vermieden werden.

3.4 Motor

Um einen Motor sicher und dauerhaft mit Pflanzenöl betreiben zu können, ist der Einsatz von ausgereiften pflanzenöлтаuglichen Motoren ebenso wichtig, wie die Verwendung von hochwertigem Pflanzenöl, vorzugsweise Rapsöl gemäß dem RK-Qualitätsstandard. Neben fremdstoffbeladenen Pflanzenölen, sind Schmieröleindickung und Motorüberhitzungen weitere wichtige Ursachen von Schäden an Pflanzenölmotoren.

Um Hitzeschäden zu vermeiden, sollten thermisch hoch belastbare Bauteile verwendet werden. Zusätzlich muss eine ausreichende Wärmeabfuhr durch eine leistungsfähige Belüftung des Motors und saubere Wärmetauscherflächen sichergestellt sein. Überschüssige Wärme ist auch nach Abstellen des Aggregats durch entsprechende Nachlaufzeiten von Wasserpumpen und Lüftern abzutransportieren.

Unbedingt einzuhalten sind die gemäß Wartungsplan vorgegebenen Intervalle für entsprechende Wartungsarbeiten. Eine hohe Bedeutung kommt dem Wechsel des Motoröls zu. Wenn Pflanzenöl infolge häufigerer Kaltstarts oder bei fehlerhaften Einspritzdüsen vermehrt in das Schmieröl gelangt, kommt es dabei anders als bei Dieselmotoren zu einer verstärkten Anreicherung. Der Schmierölpegel im Motor sinkt

deshalb beim Einsatz von Pflanzenöl in vielen Fällen nicht. Fortschreitende Motorölverdünnung mit Pflanzenöl kann unter bestimmten Bedingungen chemische Reaktionen zwischen Kraftstoff und Schmieröl auslösen. Als Folge davon entstehen feste Verbindungen, die die Schmierfähigkeit herabsetzen bzw. binnen kurzer Zeit vollständig zum Erliegen bringen. Vorrichtungen zur automatischen Schmierölnachfüllung verlängern bei Pflanzenölmotoren weder das Ölwechselintervall noch ersetzen sie eine regelmäßige Ölstandskontrolle, da es im Falle von unzureichendem Ölnachfluss, zu erheblichen Motorschäden kommen kann. Eine automatische Ölnachfüllung dient in erster Linie zur einfacheren Ölbefüllung des Motors nach einem Ölwechsel.

3.5 Aufstellungsort

Für die Unterbringung des BHKW-Aggregats ist ein geeigneter Aufstellungsraum zu wählen sowie für eine ausreichende Verbrennungsluftversorgung und Abgasabführung zu sorgen. Die dafür geltenden Richtlinien sind in der Feuerungsverordnung – FeuV – Bayern (vgl. 2.6.1) bzw. der TA Luft aufgeführt. Schallschutzmaßnahmen sind bei der Aufstellung ebenso zu berücksichtigen, wie Maßnahmen zur Vibrations- und Schwingungsdämpfung. Das Aggregat sollte rutschfest auf tragfähigem Boden stehen. Neben einer ausreichenden Raumbelüftung, ist auch für die Abfuhr der durch die Motorabwärme aufgeheizten Kabinenluft zu sorgen, um ein Überhitzen des Motors und/oder des Aufstellungsraums zu vermeiden. Bei Bedarf kann diese Warmluft zur Raumbeheizung dienen. Des weiteren ist eine möglichst allseitige gute Zugänglichkeit des Aggregats für Wartungs- und Reparaturmaßnahmen sicherzustellen.

3.6 Wartung und Überwachung

Der Anlagenbauer gibt die Wartungsarbeiten, die in bestimmten Intervallen durchzuführen sind, in einem Wartungsplan vor. Dieser ist, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten und um eventuelle Garantieansprüche geltend zu machen, unbedingt einzuhalten. Abweichungen davon sollten nur in Abstimmung mit dem Motorenhersteller oder Anlagenbauer erfolgen.

Kleinere und häufig wiederkehrende Wartungsarbeiten wie z.B. Kraftstofffilterwechsel und Motoröl-/filterwechsel kann üblicherweise ein ortsansässiger fachkundiger Kundendienst nach entsprechender Einweisung durchführen. Dies mindert die Wartungskosten und Ausfallzeiten, die insbesondere bei längeren Wegstrecken zwischen

dem Sitz des Anlagenbauers und BHKW-Standort anfallen können. Motoröl- und Kraftstofffilter sind je nach Aggregat etwa alle 300-600 Betriebsstunden, d.h. bei gut ausgelasteten BHKW ca. alle 2-4 Wochen zu wechseln.

Größere Inspektionen und Inspektionen während der Garantiezeit (üblich: 1 Jahr, z.T. mit Stundenbegrenzung) sollten dem Anlagenbauer oder einem von ihm beauftragten Fachkundendienst überlassen werden. Der Abschluss eines Wartungsvertrags garantiert dem BHKW-Betreiber normalerweise einen zuverlässigen, fachkundigen und darüber hinaus besser kalkulierbaren Wartungsdienst. Bei den größeren Wartungen sollte insbesondere die richtige Einstellung und die Funktionstüchtigkeit des Einspritzsystems (Förderzeitpunkt der Einspritzpumpe, Düsenöffnungsdruck und Düsenstrahlbild) überprüft werden.

Neben den üblichen Wartungsintervallen, sollten regelmäßige am besten tägliche Routinekontrollen am BHKW von einer eingewiesenen fachkundigen Person stattfinden. Von Vorteil ist es, wenn sich das Betreuungspersonal in gewissem Maße mit der Anlage identifiziert. Bei den Routinekontrollen gilt es den Gesamtzustand der Anlage zu überwachen. Wichtige Aspekte hierbei sind die Dichtigkeit von kraftstoff-, öl-, wasser- und gasführenden Komponenten zu überprüfen, regelmäßig den Motoröl- und Kühlwasserstand zu kontrollieren, sowie die an der Anlage installierten Mess- und Überwachungseinrichtungen abzulesen. Zusätzlich sollte auf unübliche Geräusche auf eine visuelle Kontrolle der Abgasfahne (bei Rußschwärzung ggf. Einspritzsystem warten), den Festsitz aller Bauteile und einen ausreichenden Kraftstoff- und Motorölvorrat geachtet werden.

Es ist empfehlenswert wichtige Größen, wie Betriebsstundenzählerstand, Zustand des Aggregats, angezeigte Fehlermeldungen, eventuell beobachtete Auffälligkeiten sowie durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. letzter Einspritzdüsenwechsel) und weitere Ereignisse (z.B. Kraftstofflieferung) mit Datum und Name des Beobachters/Ausführenden in einem Anlagenbuch täglich festzuhalten. Darin sollten auch die wichtigsten Betriebsdaten, wie Motor- und Abgastemperatur notiert werden. Ein lückenlos geführtes Anlagenbuch ermöglicht in aller Regel eine frühere Erkennung von Störungen und deren Ursachen und trägt zu einer schnellen sowie kostengünstigen Fehlerbehebung bei. Zudem kann mithilfe eines „Logbuchs“ ein Nachweis über die ordnungsgemäß durchgeführten Wartungsarbeiten erbracht werden.

4 Schlussfolgerungen

Pflanzenölbetriebene BHKW zeichnen sich durch eine Reihe von Umweltvorteilen aus. Neben einer effizienten Energieumwandlung durch Kraft-Wärme-Kopplung, trägt Pflanzenölkraftstoff durch dessen schnelle biologische Abbaubarkeit und geringe Ökotoxizität entscheidend zum Boden- und Gewässerschutz bei.

Deshalb eignet sich der Einsatz vor allem dort, wo Kraftstoff durch Unfälle und Leckagen bei Transport und Lagerung vermehrt in die Umwelt gelangen kann und wo beim Austritt von Dieselmotorkraftstoff oder Heizöl gewaltige Schäden entstehen können, wie z.B. im Alpengebiet. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von pflanzenölbetriebenen BHKW sind ländliche Gebiete, in denen bei regionaler Produktion und Nutzung des Pflanzenöls sowie des Presskuchens durch den niedrigen Transportaufwand eine hohe Ausnutzung des Energiegehaltes im Rapsöl erzielt wird und positive Impulse auf die Strukturentwicklung im ländlichen Raum ausgehen.

Stehen bei der Überlegung, ob ein Pflanzenöl-BHKW errichtet werden soll, Umweltaspekte nicht allein im Vordergrund, so gilt es nach ausführlichen Ist- und Bedarfsanalysen die Wirtschaftlichkeit von Pflanzenöl-BHKW zu prüfen und mit anderen Energieversorgungskonzepten zu vergleichen. Werden verschiedene Varianten kalkuliert, so ist zu berücksichtigen, dass der Preis für Pflanzenöl derzeit (noch) über dem Preis von Heizöl liegt und die dadurch bedingten höheren Wärmegestehungskosten nicht immer durch die höhere Einspeisevergütung für Strom aus Biomasse wettgemacht wird. Aufgrund der relativen Neuheit der Technologie, ist im Vergleich zu Stationär-Dieselmotoren tendenziell mit höheren Investitions- und Instandhaltungskosten zu rechnen.

Um den Wartungs- und Reparaturaufwand zu minimieren, erscheint es vorteilhaft, v.a. bei der Auswahl des speziellen oder umgerüsteten Pflanzenöl-Motors, aber auch bei den anderen Komponenten auf bewährte hochwertige Technik erfahrener Hersteller zu vertrauen. Betriebsstörungen können vermieden werden, wenn kraftstoffführende Bauteile, wie Tanks, Förderpumpe, Filter und Leitungen sowie die Einspritzdüsen entsprechend den Anforderungen des hochviskosen Pflanzenöls richtig dimensioniert werden. Auch ist die Verträglichkeit der verwendeten Materialien mit Pflanzenöl zu überprüfen. Ölbeständige, Leitungen und Verschraubungen (z.B. aus Edelstahl oder Stahl) eignen sich besonders gut für Pflanzenöl und führen auch längerfristig nicht zu einer vorzeitigen Kraftstoffalterung, wie dies z.B. bei Leitungen aus Kupfer oder Messing der Fall ist.

Doch nicht nur die Peripheriekomponenten, auch das Pflanzenöl selbst muss, um einen störungsarmen Betrieb zu gewährleisten, als Kraftstoff gewisse Mindestanforderungen erfüllen. Rapsöl ist in Mitteleuropa weit verbreitet und eignet sich aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften (geringer Gehalt an mehrfach ungesättigten Fett-

säuren, niedriger Gehalt an Wachsen, gute Kältestabilität) besonders gut als Kraftstoff. Auch sind die Qualitätsanforderungen für Rapsöl als Kraftstoff im „RK-Qualitätsstandard 5/2000“ bereits festgeschrieben worden. Dieser sollte als Vertragsgrundlage beim Einkauf von Rapsöl zur Sicherung der von den Motoren geforderten Qualität dienen.

Wichtig ist es darüber hinaus, dass der Rapsölkraftstoff bis zu seiner endgültigen Nutzung im Motor diese Qualitätsanforderungen erfüllt, um Ablagerungen und Verkokungen am Einspritzsystem und im Brennraum sowie Verstopfungen von Filtern, Leitungen und Düsen mit den sich daraus ergebenden Folgen zu vermeiden. Dies kann durch kühle, dunkle, saubere und trockene Lagerungsbedingungen erreicht werden. Das in der Praxis weit verbreitete Aufheizen des Pflanzenöls sollte, sofern die Raumtemperatur dabei überschritten wird, keinesfalls in Tanks sondern erst unmittelbar vor dem Einspritzen erfolgen, um eine hohe Oxidationsstabilität und niedrige Neutralisationszahl sicherzustellen. Dadurch können Verharzungen, korrosive Schädigungen von Leitungen und Motor sowie Motoröleindickung vermieden werden. Der Betrieb von Pflanzenöl-BHKW erfordert ebenso wie bei anderen motorisch betriebenen BHKW einen gewissen Kontroll- und Wartungsaufwand. Zwar sorgen vielfach automatische Sicherungs- und Überwachungseinrichtungen für die Anzeige von Störursachen und auch für das automatische Abschalten bei kritischen Betriebszuständen, aber dennoch können sie regelmäßige Routinekontrollen von Fachpersonal nicht ersetzen. Für einen erfolgreichen Betrieb von Pflanzenöl-BHKW ist fachkundiges, eingewiesenes und interessiertes Bedienungspersonal in hohem Maße ausschlaggebend. Nur so können Störungen frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Ein störungsarmer Betrieb von Pflanzenöl-BHKW ist also vor allem dann möglich, wenn der Rapsölkraftstoff bestimmte Qualitätskriterien erfüllt, wenn die kraftstoffführenden Komponenten des BHKW für Pflanzenöl ausgelegt sind und wenn Überwachungs- und Instandhaltungsmaßnahmen von fachkundigem Personal ausgeführt werden, das eine gewisse Identifikation mit der Anlage mitbringt.

5 Wichtige Adressen

Tabelle 10: Hersteller und Umrüster pflanzenölauglicher Motoren (Stand 07/2001)
(ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit) - Seite 1/2

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Pkw	Nfz	BHKW
AAN Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH Herr Dr. H.-J. Kampmann	Alte Leipziger Straße 50 D-99735 Bielen/Stadt Nordhausen Phone: ++49/(0)3631/918350 Telefax: ++49/(0)3631/918340		✓	✓
AMS Antriebs- und Maschinentechnik Herr C. Vorstadt	Barbarastraße 9 D-39218 Schönebeck Phone: ++49/(0)3928/4540 Telefax: ++49/(0)3928/6030 http://www.ams-schoenebeck.de/		✓	✓
Bio Car Lohmann Prototypenbau Herr G. Lohmann	Welfenstraße 12 D-81541 München Phone: ++49/(0)89/484837 Telefax: ++49/(0)89/484837 http://www.biocar.de/	✓	✓	
Elsbett Technologie GmbH Herr G. Elsbett	Weißburger Straße. 15 D-91177 Thalmässing Phone: ++49/(0)9173/77940 Telefax: ++49/(0)9173/77942 http://www.elsbett.com/	✓	✓	
Hausmann Lackiererei Karosserie Herr S. Hausmann	Am Angertor 3 D-97618 Wülfershausen Phone: ++49/(0)9762/506 Telefax: ++49/(0)9762/506	✓	✓	✓
Henkelhausen GmbH & Co. KG KHD-Deutz Herr Zehner	Hafenstr. 51 D-47809 Krefeld Phone: ++49/(0)2151/574-168 Telefax: ++49/(0)2151/574-112 http://www.henkelhausen.com/		✓	✓
Konrad Weigel Energietechnik Herr K. Weigel	Hauptstr. 33 D-92342 Freystadt-Sulzkirchen Phone: ++49/(0)9179/5880 Telefax: ++49/(0)9179/90562			✓
KPM Pflanzenöl-Marine-Motoren Herr J. Krahwinkel	Ahlershof 18 D-56112 Lahnstein Phone: ++49/(0)2621/40550 Telefax: ++49/(0)2621/18398 http://www.krahwinkel-kpm.de/		✓	✓
KTV-Greenpower Herr B. Schnitzer	Schlingenerstraße 2-3 D-87668 Rieden Phone: ++49/(0)8346/9206-15 Telefax: ++49/(0)8346/9206-11 http://www.krueger-tv.de/	✓	✓	

Tabelle 10: Hersteller und Umrüster pflanzenöлтаuglicher Motoren (Stand 07/2001)
(ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit) – Seite 2/2

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Pkw	Nfz	BHKW
Natur-Energie-Technik Dosch & Stumpf G.b.R. Herr M. Stumpf	Bocksbeutelstraße 2 D-97337 Dettelbach Phone: ++49/(0)9324/980-899 Telefax: ++49/(0)9324/980-811	✓	✓	✓
Naturpower Pflanzenöltechnik Herr J. Heinrich	Weinberge 26 D-15806 Zossen Phone: ++49/(0)3377/302307 Telefax: ++49/(0)3377- 302308 http://www.naturpower.de/	✓	✓	
OIKO Energy GmbH Herr H. Stephan	Pilgerndorf 40 D-96142 Hollfeld Phone: ++49/(0)9206/992425 Telefax: ++49/(0)9206/992426 http://www.oikoenergy.de/			✓
Raps Bio Power System Herr E. Bugelmüller	Espanstraße 6 D-90602 Seligenporten Phone: ++49/(0)9180/2263 Telefax: ++49/(0)9180/930778 http://www.rpsbiopowersystem.de/	✓	✓	
VWP Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöl- technologie GbR Herr T. Kaiser	Am Steigbühl 2 D-90584 Allersberg Phone: ++49/(0)9174/2862 Telefax: ++49/(0)9174/2621 http://www.pflanzenoel-motor.de/	✓	✓	✓
Wolf Pflanzenöl-Technik Herr H. Wolf	Ringstr. 28 D-97508 Untereuerheim Phone: ++49/(0)9729/6948 Telefax: ++49/(0)9729/6948 http://www.wolf-pflanzenoel-technik.de/	✓		

Tabelle 11: Ölgewinnungsanlagen in Bayern (Stand 07/2001) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit) - Seite 1/2

Firma/ Ansprechpartner	Straße	Ort
Herr Wörl	Galgen 3	82216 Maisach
Gut Gossenhofen Herr Berghaus		82362 Gossenhofen
Herr Stauderer	Brünhausen 1	83308 Trostberg
Volksbank Raiffeisenbank Salzachtal Waging Trostberg eG Herr Huber	Rupertstraße 12	83413 Fridolfing
AGRANA GmbH & Co. Pflanzenölhandels KG Herr Els	Hauptstr. 2	84103 Postau
Herr Wagner	Walperstetten 161	84183 Niederviehbach
Gebrüder Lechner GmbH Herr Lechner	Furth 33	84371 Triftern
Herr Strasser	Fundhobl 4	84494 Niederbergkirchen
Hauser-Öl Herr Schmidhammer	Leitgering 5	84529 Tittmoning
Herr Kraller sen.	Wies 4	84529 Tittmoning
Herr Weinberger	Plackersdorf 2	84568 Pleiskirchen
Biogene Fernwärme Unterneukirchen GmbH & CO KG Herr Dipl.-Ing. Ohnesorg	Garching Str. 1	84579 Unterneukirchen
Herr Landes	Rottmannshart 1	85077 Manching
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Herr Dr. Widmann	Vöttinger Str. 36	85354 Freising
Ölmühle Hartmann Herr Hartmann	Lindenfeldweg 12	86420 Diedorf/Biburg
Trocknungswerk Achsheim e.G. Herr Kastl	Kellerberg 1	86462 Langweid-Achsheim
Herr Jakob	Allmering 3	86508 Rehling
Sedlmayer Ölsaaten-Verarbeitungs GmbH Herr Sedlmayr	Weitenwinterried 2	86567 Tandern
Herr Stegmair	Brünntalweg 5	86641 Rain am Lech - Überacker
Landhandel Xaver Röder Herr Röder	Stehlesmühle 1	86647 Buttenwiesen
wiol GbR Herr Wiedemann	Gewerbestraße 3	86707 Westendorf
Herr Fries	Schulstraße 8	86707 Westendorf
Herr Greisl	Eglingerstraße 14	86931 Prittriching
Safransölde Straß Herr Frey	Ortsstr. 13	89278 Straß bei Nersingen
Herr Egle	Hauptstr. 47	89282 Pfaffenhofen a.d. Roth
Pegnitztaler Pflanzenöle Herr Dr. Martin	Alfalter Nr. 20	91247 Vorra
Herr Werner	Eisenberg 10	91361 Pinzberg
Genossenschaft zur Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe e.G. (GNR) Herr Reißlein	Walderstraße 5	91710 Gunzenhausen
Herr Hegner	Alemannenstraße 12	91723 Dittenheim

Tabelle 11: Ölgewinnungsanlagen in Bayern Stand (07/2001) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit) - Seite 2/2

Firma/ Ansprechpartner	Straße	Ort
Landwirtschaftliche Lehranstalten Triesdorf		91746 Weidenbach
Klostergut Plankstetten Herr Pater Schmidt	Klosterplatz 1	92334 Berching
Plankmühle Herr Plank	Schweigersdorfer Str. 11	92334 Plankstetten
Herr Grünbauer	Artesgrün 11	92702 Kohlberg
Raiffeisen Wurz e.G. Herr Kühner	Dorfstraße 13	92715 Püchersreuth
Herr Bücherl	Irlach 1	93464 Tiefenbach
Bieringer Mühle Herr Hofbauer	Niedermühle 2	94086 Karpfham b. Bad Griesbach
Herr Osterholzer	Hoisberg 4	94149 Kösslarn
Herr Wagner	Pfelling Nr. 20	94327 Bogen
Herr Jahrstorfer	Wochenweis 4	94428 Eichendorf
AGROservice Pflanzenöle GmbH Co KK Herr Wagner	Dreisesselstraße 1	94486 Osterhofen
LVO Landwirtschaftliche Marketing- und Vertriebs GmbH Oberfranken Herr Bauer	Markersreuth 43	95213 Münchberg
Herr Marth	Dorfplatz 6	95659 Arzberg
Freiherr von Rotenhan	Ahornweg 3	96117 Memmelsdorf- Drosendorf
Herr Will	Hohenhäusling 5	96187 Stadelhofen
MARA GmbH & Co. KG Herr Martin	Lichtenfelser Straße 2	96275 Marktzeuln-Zettlitz
Herr Ruppert	Gössersdorf 17	96369 Weißenbrunn
Agrarhandel Schilling Herr Gräf	Frankenbergstr. 5	97215 Uffenheim
Engert Technic GmbH Herr Zumbroich	Herrnberchtheim 87	97258 Ippesheim
Herr Urvat	Seestrasse 5	97258 Lipprichausen
Herr Gräf	Gutshof	97340 Martinsheim-Gnötzheim
Ölfruchtmühle Oberes Werntal Herr Reuß	Lerchenhof 1	97440 Werneck-Ettleben
Herr Wassermann	Schloßgut	97618 Unsleben
Herr Horsch	Gutsstraße 25	97650 Fladungen- Weimarschmieden

Tabelle 12: Ausgewählte Internetadressen

Förderung	http://www.bawi.de/ http://www.bayern.de/Umwelt/ http://www.bhkw-info.de/info-bhkw/foerderung.html http://www.bine.fiz-karlsruhe.de/bine/indexnew.html http://www.bml.de/ http://www.bmu.de/ http://www.carmen-ev.de/ http://www.dainet.de/fnr/de http://www.dbu.de/ http://www.stmelf.bayern.de/ http://www.stmwvt.bayern.de/ http://www.ufop.de/ http://www.uni-muenster.de/Energie/bio/markt/foerder/Welcome.html
Informationen zu Pflanzenöl	http://www.admin.ch/sar/ http://www.asg-analytik.de/ http://www.bayern.de/lfu/luft/umweltforsch.htm#rand http://www.bioenergie.inaro.de/ http://www.carmen-ev.de/ http://www.dainet.de/fnr/ http://www.dainet.de/ktbl/ http://www.edv.agrar.tu-muenchen.de/blm/leu/index.html http://www.tec.agrar.tu-muenchen.de/pflanzoel/index.html http://www.ufop.de/ http://www.uni-hohenheim.de/
Informationen zu BHKW	http://www.bhkw-infozentrum.de/ http://www.bhkw-info.de/

Quellenverzeichnis

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen - Bekanntmachung der Auskunft- und Dokumentationsstelle nach Nummer 3 der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe vom 17.05.99. Bundesanzeiger vom 29.05.99 Nummer 98a, Jahrgang 51. Bundesministerium für Justiz (Hrsg.)
- [2] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (1999): BHKW - Grundlagen. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch E.V., S. 31+ Bildübersicht
- [3] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) (2001): Mustergutachten zum Immissionsschutz für stationäre Dieselmotore, Augsburg; Stand 2001
- [4] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2000): Gewässerschutz beim Umgang mit Hydraulikölen sowie Schmier- und Treibstoffen auf Rapsölbasis, Merkblatt Nr. 3.2/6, München, Stand: 14.07.2000
- [5] Bayerische Bauordnung (BayBO), Fassung vom 4. August 1997 (GVBl. S. 434; ber. 1998 S. 270, 1998 S. 439; 1999 S. 521, 532) <http://www.umwelt-online.de/recht/bau/laender/bay/bo1.htm>
- [6] BERTRAMS, J. (1994): Rechtsfragen bei Erzeugung, Logistik und Anwendung von Rapsöl und auf Rapsöl basierenden Produkten in der Technik. Diplomarbeit: Technische Universität München-Weihenstephan, Institut für Landtechnik (1-68 Seiten)
- [7] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27. Februar 1986 (GMBI. S. 95, ber. S. 202)
- [8] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) vom 29. März 2000 (BGBl. I, Nr. 13, S.305-309)
- [9] Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform vom 24. März 1999 (BGBl. I, Nr. 14, S.378-384)
- [10] Gesetz zum Schutz der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) vom 12. Mai 2000 (BGBl. I, Nr. 22, S.703-704)
- [11] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG Fassung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I S. 880, 1193; 1997 S. 808; 1998 S. 510, S. 3178)
- [12] Gesetz zur Fortführung der ökologischen Steuerreform vom 16. Dezember 1999 (BGBl. I, Nr. 56 S.2432-2440)
- [13] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts Wasserhaushaltsgesetz - WHG Fassung vom 12. November 1996 (BGBl. I S. 1695; 1998 S. 832, 2455)
- [14] GAILFUß, M.: BHKW-Infozentrum: <http://www.bhkw-infozentrum.de/>

- [15] HARTMANN, H.; A. STREHLER; Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (1995): Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht, Bd. 3. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH (1-397 + Anhang Seiten)
- [16] KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN (2001): Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin: Springer-Verlag (770 Seiten)
- [17] KLIEN, J. (1991): Praxis Kraft-Wärme-Kopplung - Planungshilfe Blockheizkraftwerke, Bd. 3. Karlsruhe: Verlag C.F. Müller (158 Seiten)
- [18] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (1999): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung - Arbeitspapier 267. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH (1-130 Seiten)
- [19] Mineralölsteuergesetz (MinöStG) vom 21. Dezember 1992 (BGBl. I S. 2150, 2185) (BGBl. III 612-14-20)
- [20] MOLLENHAUER, K. (1997): Handbuch - Dieselmotoren. Berlin: Springer-Verlag (1029 Seiten)
- [21] ORTMAIER, E. (1994): Betriebswirtschaftliche Aspekte von Blockheizkraftwerken auf Pflanzenölbasis. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126, S. 239-252
- [22] REMMELE, E.; K. THUNEKE; B. WIDMANN; T. WILHARM und H. SCHÖN (2000): Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - Endbericht zum Forschungsvorhaben., Bd. "Gelbes Heft" Nr. 69. München: Hrsg. und Druck: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (217 Seiten)
- [23] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) Vom 26. August 1998 (GMBI. 1998 S. 503)
- [24] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 17. BImSchV - Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe vom 23. November 1990 (BGBl. I S.2545, ber. S.2832; 1999 S.186; 2000 S.632; 27.7. 2001 S. 1950)
- [25] THUNEKE, K. (1999): Emissionen Rapsöl betriebener Dieselmotoren. Landtechnik, Vol. 54, Nr. 3, S. 176-177
- [26] THUNEKE, K. und C. KERN (1998): Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW-Motoren in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und Eigenschaften der Pflanzenölkraftstoffe sowie Abgasreinigungssystemen -Literatur- und Technologieübersicht. Abschlußbericht: Bayerische Landesanstalt für Landtechnik (Freising-Weißenstepahn) (105 Seiten)

- [27] VDI-Gesellschaft: Energietechnik (1996): VDI 3 985 (Entwurf): Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungskraftmaschinen. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [28] VDI-Gesellschaft: Energietechnik (1991): Rationelle Energieversorgung mit Verbrennungs-Motoren-Anlagen, Teil II: BHKW-Technik. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, VDI-Verlag 44 Seiten
- [29] VDI-Gesellschaft: Technische Gebäudeausrüstung (2000): VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [30] VDI-Gesellschaft: Technische Gebäudeausrüstung (1988): VDI 2067, Blatt 7: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen - Blockheizkraftwerke. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [31] Verordnung über Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung brennbarer Flüssigkeiten zu Lande - Verordnung über brennbare Flüssigkeiten – VbF. Fassung vom 13. Dezember 1996 (BGBl. I S 1938, ber. 1997 S. 447)
- [32] Verordnung über Feuerungsanlagen, Wärme- und Brennstoffversorgungsanlagen (Feuerungsverordnung - FeuV) vom 6. März 1998 (GVBl. S. 112) <http://www.umwelt-online.de/recht/bau/laender/bay/feu.htm>
- [33] Verordnung zur Durchführung des Mineralölsteuergesetzes (Mineralölsteuer-Durchführungsverordnung – MinöStV) vom 15. September 1993 (BGBl. I S. 1692) (BGBl. III 612-14-20-1)
- [34] Verordnung zur Durchführung des Stromsteuergesetzes (Stromsteuer-Durchführungsverordnung - StromStV) vom 31. Mai 2000 (BGBl. 1 S. 794)
- [35] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 4. BImSchV - Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen Fassung vom 14. März 1997 (BGBl. I 1997 S. 504, S. 548; 1998 S. 723; 1999 S. 186)
- [36] WIDMANN, B. (1999): Hintergründe und Zielsetzung der dezentralen Ölsaatenverarbeitung. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH, S. 7-15
- [37] ZELL, B., Bayerisches Landesamt für Umweltschutz „Emissionsauflagen und Genehmigungspraxis bei Biogas- und Pflanzenöl-BHKW“, Zweites Anwenderforum Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg; 23. November 2000 in Kloster Banz, Staffelstein
- [38] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg <http://www.bhkw-info.de/>