



Untersuchungsbericht / Veröffentlichung

Kraftstoffeigenschaften verschiedener Pflanzenöle

Hochschule Offenburg, Badstraße 24, 77652 Offenburg,
Tel:+49 (0)781 /205-248, Fax:+49 (0)781 /205-242,
E-Mail: benjamin.dorn@fh-offenburg.de , Web: www.fh-offenburg.de,

www.biokraftstoffforschung.de

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EIGENSCHAFTEN DER KRAFTSTOFFE..... | 3 |
| 1.1 | DICHTEMESSUNG | 6 |
| 1.2 | VISKOSITÄTSMESSUNG | 8 |
| 1.3 | BRENNWERTBESTIMMUNG | 12 |
| 2 | QUELLENANGABEN | 16 |

1 Eigenschaften der Kraftstoffe

In diesem Kapitel werden die Pflanzenöle auf verschiedene physikalische Eigenschaften hin untersucht. Die Dichte, die Viskosität und der Brennwert der Öle werden bestimmt und mit den Literaturwerten aus Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verglichen. Eine Hilfestellung bei der Auswahl der wichtigen Eigenschaften beim Einsatz von Pflanzenölen in Dieselmotoren gibt der diesem Abschnitt folgende Auszug aus einem Schreiben von Günter Elsbett, der vor über 25 Jahren mit dem Elsbett-Motor den Markt der Pflanzenöltechnik begründete. Er beschreibt selbst den Sinn des Artikels als Hilfestellung für den Betreiber eines Pflanzenölmotors zur Prüfung des Pflanzenöles. Bei dieser Diplomarbeit interessieren weniger die Eigenschaften, die eine langjährige Verwendung des Motors begünstigen, sondern diejenigen, die schon vor der Verbrennung Hinweise auf die entstehenden Partikel geben können. Aus Gründen der Machbarkeit in der Hochschule werden nur die in diesem Abschnitt bereits aufgezählten Eigenschaften untersucht.

Zitat aus „Die Normung von Pflanzenölen“ von Günter Elsbett

„... **Pflanzenöl-Kennwerte, Einfluss auf sicheren Motorbetrieb**

Dichte: Die Dichte der verschiedenen Pflanzenöle unterscheidet sich nicht wesentlich. Sie liegen etwa 10% höher als bei Diesel. Die Messung der Dichte ist gut geeignet, um festzustellen, ob es sich um Pflanzenöl handelt, oder um Vermischungen aufzudecken, z.B. mit Diesel oder Biodiesel. Unterschiedliche Dichten wirken sich auf einen sicheren Motorbetrieb nicht negativ aus. Bewertung: Weniger wichtig.

Flammpunkt: Der liegt für alle Pflanzenöle wesentlich höher als bei Diesel. Höhere Flammpunkte wirken sich auf einen sicheren Motorbetrieb nicht negativ aus. Bewertung: Weniger wichtig.

Heizwert: Ist für alle Pflanzenöle ungefähr gleich, aber etwa 10 % niedriger als bei Diesel. Auf Grund der höheren Dichte ist aber der Energieinhalt pro Liter Pflanzenöl jedoch etwa wieder gleich mit Diesel.

Unterschiedliche Heizwerte verschiedener Pflanzenöle wirken sich auf einen sicheren

Motorbetrieb nicht negativ aus, da sie geringfügig sind. Bewertung: Weniger wichtig.

Kinematische Viskosität: Die meisten Pflanzenöle sind dickflüssiger als Diesel. Sie unterscheiden sich in diesem Punkt auch sehr stark untereinander. Die Viskosität ist ein wichtiges Kriterium für den problemlosen Betrieb des Motors. Zu hohe Viskosität wirkt sich auf den Motorbetrieb negativ aus (Blockierung von Filter, Leitungen, Pumpe). Eine (temperaturabhängige) Nachkontrolle der Viskosität ist deshalb wichtig.

Kälteverhalten: Hierfür sind noch keine Prüfbedingungen festgelegt. Es liegt aber auf der Hand, dass dies ein wichtiger Punkt beim Starten und Kaltbetrieb des Motors ist. Hilfsweise kann man sich zunächst an der Viskosität orientieren. In der Praxis wird Pflanzenöl bei tiefen Temperaturen mit Petroleum oder Winterdiesel verdünnt. Eine Nachkontrolle des Kälteverhaltens ist - auch unter Beachtung des Punktes über die Viskosität - für die Gebrauchsfähigkeit wichtig.

Zündwilligkeit: Wird bisher - wie bei Diesel - mit der Cetanzahl angegeben, die jedoch für Pflanzenöle nicht sehr aussagekräftig ist, d.h. niedriger ist, obwohl Pflanzenöl unter motorischen Bedingungen zündwilliger ist. Eine neue Testmethode wird noch gesucht. Deshalb ist die Cetanzahl weniger wichtig.

Koksrückstand: Dies ist eine wichtige Kenngröße, da zwischen Koksrückstand und Ablagerungen im Motor eine deutliche Korrelation besteht. Zu hoher Koksrückstand wirkt sich auf einen sicheren Motorbetrieb negativ aus. Bewertung: Wichtig.

Iodzahl: Dies ist das Maß für die Anzahl der Doppelbindungen und wirkt sich auf Ablagerungsrückstände im Motor aus, ebenso auch auf die Lagerfähigkeit des Öls. Bei einigen Ölen können hier größere Abweichungen von den Werten für Raps auftreten. Bewertung: Wichtig.

Schwefelgehalt: Schwefel ist ein Katalysatorgift und erzeugt SO_x und Sulfate an Partikeln. Es kommt in natürlichem Pflanzenöl kaum vor und ist eher ein Indiz für Beimischungen anderer Öle. Zu hoher Schwefelgehalt wirkt sich auf einen sicheren Motorbetrieb negativ aus. Bewertung: Wichtig.

Gesamtverschmutzung: Wichtigste Größe! Sie wirkt sich auf Filter- und Düsenverstopfungen

aus und hat abrasive Wirkung im Brennraum. Bewertung: Sehr wichtig.

Neutralisationszahl: Sie ist das Maß für den Gehalt an freien Fettsäuren, was durch den Raffinationsgrad und die Alterung beeinflusst wird. Sie kann sich auf die Motorenölqualität negativ auswirken. Hier kann es sowohl innerhalb einer Ölsorte, als auch zwischen den verschiedenen Ölsorten größere Unterschiede geben. Bewertung: Wichtig.

Oxidationsstabilität: Sie beschreibt die Voralterung des Öls und ist auch für mögliche Wechselwirkungen des Pflanzenöls mit dem Schmieröl verantwortlich. Mit fortschreitender Alterung steigt auch die Viskosität stetig. Bewertung: Wichtig.

Phosphorgehalt: Er liegt in Form von Phosphorlipiden vor und ist stark vom Herstellungsprozess abhängig. In der Regel hält man bei kaltgepresstem Öl und bei Raffinaten den Grenzwert ein. Phosphor ist ein Motorschädling (abrasive Ablagerungen). Bewertung: Sehr wichtig.

Aschegehalt: Beschreibt den Gehalt an Oxid- oder Rohasche. Wirkt abrasiv und kann auch ein Hinweis auf Fremdstoffe im Kraftstoff sein. Er wird schon teils durch die Messung von anderen Kenngrößen erfasst. Bewertung: Wichtig.

Wassergehalt: In emulgierten Zustand ist auch ein höherer Wasseranteil nicht direkt nachteilig, er senkt sogar die Stickoxidemissionen. Jedoch entemulgiert Wasser nach einiger Zeit immer und verursacht dann durch Kavitation Schäden am Einspritzsystem, kann zu Vereisungen führen und provoziert mikrobiellen Befall. Bewertung: Sehr wichtig.

Der Sinn der oben angestellten Bewertungen liegt darin, diejenigen Kriterien herauszufiltern, die für eine unmittelbare Prüfung durch den Betreiber eines Pflanzenölmotors von großer Wichtigkeit sind. Es handelt sich hier um langjährige Erfahrungen, welche der Werte häufig nicht eingehalten werden und welche sich besonders schädlich auswirken können. Das bedeutet nicht, dass man die übrigen Werte nicht einhalten muss, sondern nur, dass sie bei Schnelltests hintan gestellt werden können. In diesem Sinne wird vorgeschlagen, folgende Kennwerte für einen regelmäßigen Schnelltest als besonders wichtig zu kennzeichnen:

- Gesamtverschmutzung
- Phosphorgehalt

- Wassergehalt ...“

Zitat Ende

1.1 Dichtemessung

Die Dichte (ρ in kg/dm^3) der verwendeten Kraftstoffe hat Einfluss auf mehrere Parameter im Betrieb des CR-Dieselmotors. Der Heizwert erhöht sich mit steigender Dichte, zu hohe Dichte erhöht die Rußemission, zu geringe Dichte führt zu Leistungsminderung. Außerdem wird die Dichte zur Umrechnung des Kraftstoffvolumenstromes zu einem Kraftstoffmassenstrom benötigt, der wiederum zur Berechnung von motorischen Kenngrößen, Wirkungsgraden oder beispielsweise dem Gemischheizwert hinzugezogen werden kann. Weiter wird sie zur Umrechnung verschiedener Darstellungen von Viskositäten benötigt, wie im nachfolgenden Abschnitt zu lesen ist.

Im Rahmen der Diplomarbeit wird die Dichte aller verwendeten Pflanzenöle bei unterschiedlichen Temperaturen mit einem Aärometer aus dem Physiklabor der Hochschule Offenburg ermittelt (siehe Abbildung 4.1-1).



Die

Abbildung 1.1-1: Aärometer

Messmethode beruht auf dem Prinzip der Verdrängung. Je nach Dichte der zu untersuchenden Flüssigkeit sinkt der zylinderförmige Körper mehr oder weniger tief ein. In dem Körper ist eine Skala befestigt, die die Dichte beispielsweise in g/dm^3 angibt. Es gibt unterschiedliche Aärometer für verschiedene Dichten, da das Messgerät für eine Messung soweit eintauchen muss, dass es nicht kippt, aber auch nicht vollständig einsinken darf. Das für die Messungen verwendete Aärometer ist auf den Bereich zwischen $880 \text{ g}/\text{dm}^3$ und $940 \text{ g}/\text{dm}^3$ ausgelegt. Dieser Bereich hat sich für die verwendeten Kraftstoffe als sinnvoll herausgestellt. In das Aärometer ist ein Quecksilber-Thermometer eingelassen, das im Temperaturbereich zwischen 10 °C und 30 °C die Temperatur des betrachteten Mediums angeben kann. Da die Messungen in einem Messzylinder innerhalb eines temperierten

Wasserbades durchgeführt werden, kann ohne diese Temperaturanzeige bis 40 °C die Dichte gemessen werden. Höhere Temperaturen werden aber vermieden, um das Messinstrument nicht übermäßig zu belasten.

Die Abbildung 1.1-2 zeigt die gemessenen Werte für die Dichte zwischen 15 °C und 40 °C.

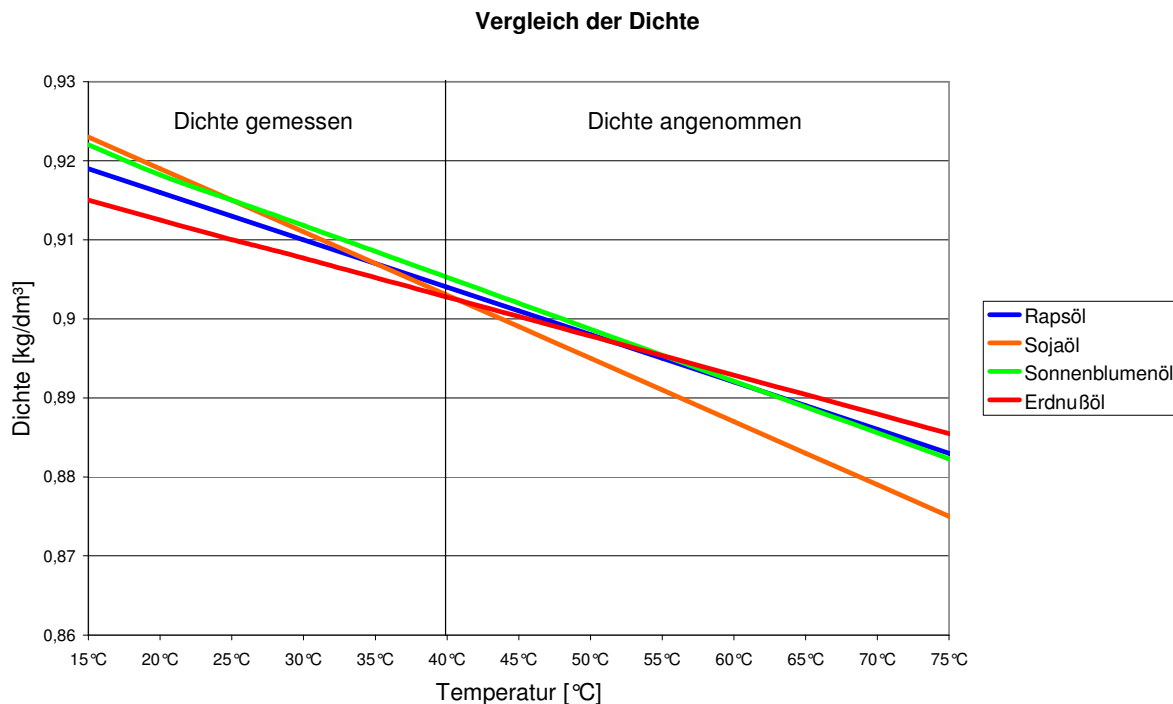


Abbildung 1.1-2: Dichte der Pflanzenöle

Da bei allen Pflanzenölen in diesem Bereich ein linearer Verlauf festgestellt werden kann und der Siedepunkt der Pflanzenöle über 300 °C liegt, wird der Kurvenverlauf als lineare Trendlinie bis 75 °C fortgesetzt, um eine Vorstellung von der Dichte der Pflanzenöle bei Betriebstemperatur zu haben. Bei Sojaöl nimmt die Dichte mit zunehmender Temperatur am stärksten ab ($0,80 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kg/dm}^3\text{K}$), bei Erdnussöl am geringsten ($0,49 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kg/dm}^3\text{K}$); bei Rapsöl beträgt die Abnahme $0,6 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kg/dm}^3\text{K}$, bei Sonnenblumenöl $0,68 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kg/dm}^3\text{K}$. Die Dichte von Diesel liegt nach EN ISO 12185 bei 15 °C zwischen $0,82 \text{ kg/dm}^3$ und $0,85 \text{ kg/dm}^3$. Sie nimmt um ca. $0,00064 \text{ kg/dm}^3$ pro Temperaturerhöhung von 1 °C ab.

1.2 Viskositätsmessung

Bei Verschiebungen innerhalb von Flüssigkeiten und Gasen treten Reibungswiderstände auf, die im jeweiligen Fluid Schubspannungen verursachen. Ein Maß für die auftretenden Schubspannungen ist die Viskosität. Sie hat Bedeutung bei allen technischen Vorgängen, bei denen Fluide bewegt werden müssen, denn sie beeinflusst das Geschwindigkeitsprofil einer Strömung und ist mitverantwortlich für die zum Transport eines Fluids notwendige Energie.

Das Einspritzsystem des Common-Rail-Dieselmotors ist auf die Viskosität von Diesel ausgelegt. Wird ein Kraftstoff mit höherer Viskosität verwendet, benötigt dieser für den Transport mehr Energie wegen der zusätzlichen Reibleistung, die von der Motorleistung abgezogen werden muss. Eine zu hohe Viskosität verschlechtert die Einspritzstrahlaufbereitung und hat damit direkten Einfluss auf den Verbrennungsvorgang und die Partikelemission. Schlimmstenfalls kann kein Kraftstoff mehr eingespritzt werden.

Weiter kann durch die Kenntnis der Viskosität eine Aussage zur Schmierfähigkeit eines Fluids gemacht werden. Die Hochdruckpumpe, die den Druck im Rail bereitstellt, wird ausschließlich durch den Kraftstoff geschmiert und wird bei fehlender Schmierung, beispielsweise verursacht durch Luft in der Kraftstoffleitung oder ein schlecht schmierendes Fluid, aufgrund von Verschleiß zerstört. Tribologische Effekte, also auch der Einfluss der Viskosität auf die Schmierfähigkeit eines Kraftstoffes werden hier aber nicht weiter behandelt.

Bei der Viskositätsmessung wird zwischen der dynamischen (η in Pas) und der kinematischen (ν in mm^2/s) Viskosität unterschieden. Die kinematische Viskosität ist das Produkt von der dynamischen Viskosität und dem Kehrwert der Dichte nach Formel 1.2-1.

Es gilt

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

Formel 1.2-1

wobei

| | | |
|--------|-------------------------|-----------------------------|
| ν | dynamische Viskosität | [Pas] |
| η | kinematische Viskosität | [mm^2/s] |
| ρ | Dichte | [kg/dm^3] |

Bei der Berechnung der kinematischen Viskosität bei unterschiedlichen Temperaturen ist darauf zu achten, sowohl den Wert der dynamischen Viskosität als auch den Wert der Dichte bei der entsprechenden Temperatur zu verwenden.

Diesel hat im Temperaturbereich, in dem es für die Verbrennung in Dieselmotoren eingesetzt wird, eine kinematische Viskosität von weniger als $5 \text{ mm}^2/\text{s}$. Da der Motor auf die Eigenschaften von Diesel-Kraftstoff ausgelegt ist, ein Einsatz dieses Kraftstoffes im Motor also technisch unbedenklich ist, werden keine Viskositätsmessungen mit Diesel durchgeführt. Im Technikum Mechanische Verfahrenstechnik der Hochschule Offenburg wurden die dynamischen Viskositäten der verwendeten Kraftstoffe mit Ausnahme derer von Diesel im Temperaturbereich zwischen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $75 \text{ }^\circ\text{C}$ mithilfe eines Rotationsviskosimeters (siehe Abbildung 1.2-1) gemessen. Dieses nutzt die Möglichkeit, dass das Geschwindigkeitsprofil im konzentrischen Ringspalt durch eine Übertragung der Betrachtungen der Couette-Strömung vom ebenen Spalt auf einen rotationssymmetrischen Spalt berechnet werden kann. Die Berechnungen finden im Gerät mithilfe gespeicherter Berechnungsfaktoren statt. Angezeigt werden die Fluidtemperatur [$^\circ\text{C}$], die Drehzahl des Rotors [min^{-1}], das dazu aufgewandte Drehmoment [Ncm], das Schergefälle [$1/\text{s}$] und die dynamische Viskosität [mPas].

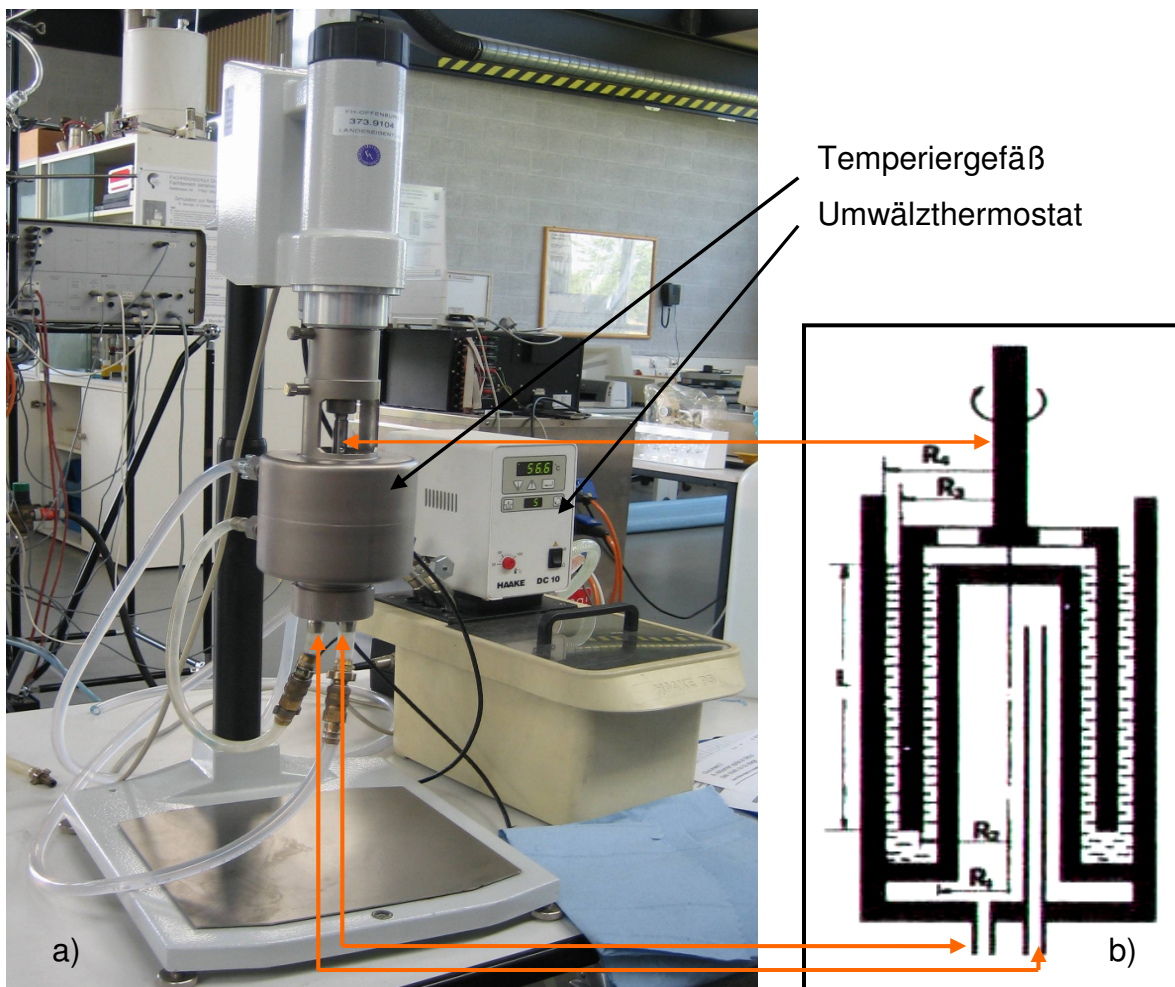


Abbildung 1.2-1 a) Messereinrichtung zur Viskositätsmessung;
b) Querschnitt des Drehkörpers im Messbecher

Die verwendete Messeinrichtung wird zur Messung niedrigviskoser Flüssigkeiten im mittleren Scherbereich eingesetzt. Sie besteht aus einem glockenförmigen Drehkörper und einem Messbecher mit Innenzylinder (siehe Abbildung 1.2-1b)). Man erreicht so über zwei Scherflächen doppelte Empfindlichkeit, so dass auch geringe Widerstände, wie der von Öl, zwischen den Scherflächen registriert werden können. Die Messeinrichtung wird mit einem Temperiergefäß eingesetzt, welches an einen Umwälzthermostaten angeschlossen ist und von diesem mit Wasser mit der in den Thermostat eingegebenen Temperatur durchspült wird. Um auch für den inneren Messspalt eine gute Temperierung zu erreichen, wird auch das Messbecher-Innenteil an den Umwälzthermostaten angeschlossen.

Die Abbildung 1.2-2 zeigt als Ergebnis die kinematischen Viskositäten der Kraftstoffe Rapsöl, Sojaöl, Sonnenblumenöl und Erdnussöl bei unterschiedlichen Temperaturen. Wie aus den

Kurvenverläufen ersichtlich, sinkt die Viskosität von Pflanzenölen bei einer Erhöhung der Fluidtemperatur. Bei Umgebungstemperatur haben die untersuchten Pflanzenöle eine vielfach höhere Viskosität als Diesel, die aber mit einer Erhöhung der Temperatur abnimmt, so dass bei etwa 80 °C die Öle in einem für das Einspritzsystem geeigneten Viskositätsbereich liegen. Sojaöl und Sonnenblumenöl haben einen fast identischen Viskositätsverlauf. Rapsöl hat im Vergleich unterhalb von etwa 35 °C eine höhere Viskosität und oberhalb eine niedrigere. Erdnussöl hat im gesamten betrachteten Temperaturbereich eine um etwa 5 mm²/s höhere Viskosität als Rapsöl, unterhalb von 60 °C eine höhere Viskosität als Soja- und Sonnenblumenöl, oberhalb eine niedrigere.

Vergleich der Viskosität

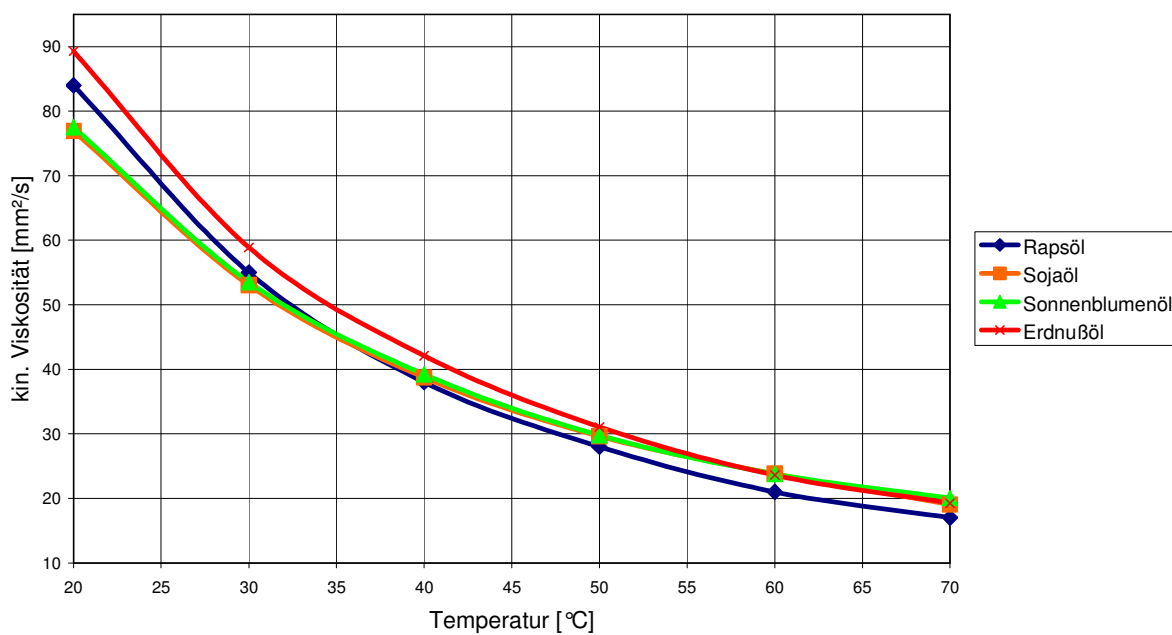


Abbildung 1.2-2: Vergleich der Viskosität

1.3 Brennwertbestimmung

Der Brennwert bzw. obere Heizwert (H_o in kJ/kg) eines Stoffes ist die Energie, die bei der Verbrennung des Stoffes mit Sauerstoff in der Form von Wärme freigesetzt wird. Der untere Heizwert (H_u in kJ/kg) ist die maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt und ist damit für die Bewertung der Qualität einer Verbrennung (indizierter (η_i) und effektiver (η_e) Wirkungsgrad) eines Kraftstoffes in einem Verbrennungsmotor notwendig. Er kann durch Subtraktion der Kondensationswärme vom oberen Heizwert ermittelt werden. Jedoch können weder der obere noch der untere Heizwert direkt, sondern nur als Energiedifferenz gemessen werden. Um diese messen zu können, muss Wärme übertragen werden, wozu eine Temperaturdifferenz erforderlich ist.

Wird der zu untersuchende Stoff in einem geschlossenen System verbrannt und ist die Wärmekapazität des Systems bekannt, so kann man über die Differenz der gemessenen Temperaturen vor und nach der Verbrennung den Brennwert des Stoffes nach Formel 1.3-1 berechnen. Der ermittelte Brennwert ist allerdings der Brennwert vom gesamten brennbaren Material im geschlossenen System, das aus mehreren bzw. mindestens zwei Bestandteilen besteht, wie noch gezeigt wird.

Es gilt

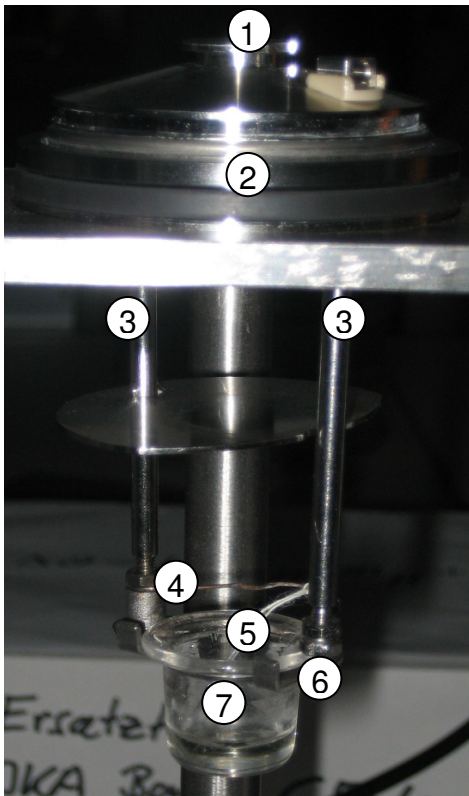
$$\Delta Q = C \cdot \Delta T,$$

Formel 1.3-1

wobei

| | | |
|------------|---|--------|
| ΔQ | übertragene Wärme/"Brennwert" | [kJ] |
| C | Wärmekapazität des Systems/Kalorimeters | [kJ/K] |
| ΔT | Temperaturänderung. | [K] |

Das geschlossene System, in dem der zu untersuchende Stoff verbrannt wird, wird Bombe genannt. Der Inhalt der Bombe des verwendeten Kalorimeters ist in Abbildung 4.3-1 dargestellt. Die Funktionen der Komponenten werden bei der Beschreibung der Verfahrensweise zur Brennwertbestimmung erläutert.



- 1: Sauerstoffventil
- 2: Deckel mit Dichtung
- 3: elektrische Zündkontakte
- 4: Zünddraht
- 5: Baumwollfaden
- 6: Tiegelhalter
- 7: Tiegel

Abbildung 1.3-1: innerer Aufbau der Bombe

Zur Brennwertbestimmung wird wie folgt vorgegangen:

Zuerst wird das Messgerät kalibriert, d.h. die Wärmekapazität C des Kalorimeters, also der Kalorimetersubstanz, des Rührers, des Thermometers, der Wandung, etc. ermittelt. Dazu wird ein brennbarer Stoff mit definiertem Brennwert benötigt, die sog. Kalibrierprobe. Diese wird in den Tiegel (7) gegeben, der vor und nach der Probenzugabe gewogen wird. Der Tiegel wird in den Tiegelhalter (6) gesetzt und ein Baumwollfaden (5) mit definiertem Brennwert vom Zünddraht (4) zur Probe gelegt. Der Brennwert des Baumwollfadens muss bei der Berechnung des zu bestimmenden Brennwertes berücksichtigt werden. Die Bombe muss nach DIN 51900 vor der Zündung mit Sauerstoff gefüllt werden und mindestens einen Innendruck von 30 bar haben. Dazu wird der Deckel (2) auf der Bombe mit einer Überwurfmutter verschraubt und das System über das Sauerstoffventil (1) im Deckel gefüllt. Die Dichtung im Deckel dichtet auch den bei der Verbrennung entstehenden Überdruck ab. Auf das Sauerstoffventil wird nach dem Füllvorgang ein Zündadapter gesteckt, über den von außen die Zündung erfolgen kann. Der Strom zur Zündung fließt über die elektrischen Zündkontakte und den Zünddraht, der einen wesentlich kleineren Querschnitt als die Kontakte hat und sich durch den Strom soweit aufheizt, dass er den Baumwollfaden und darüber die Probe entzündet. Die Bombe wird zur Zündung in ein mit 19,2 °C bis 20,2 °C warmem Wasser

gefülltes und mit einem Temperatursensor und einem Rührer (zur homogenen Durchmischung des Wassers) versehenes Kalorimetergefäß gestellt, welches das Messsystem bildet. Ein weiterer Temperatursensor ist im Kalorimetermantel angebracht. Wird der Stoff in der Bombe gezündet, dann erwärmen sich die Bombe und das Wasser, so dass eine Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Kalorimetermantel registriert werden kann, mit der bei bekannter Wärmekapazität nach Formel 1.3-1 die übertragene Wärme und damit der Brennwert berechnet werden kann. Die Vorbereitung der Bombe geschieht manuell. Der Einfüllvorgang für das temperierte Wasser und die Zündung, sowie die Registrierung der Temperaturen und schließlich die Berechnung der Wärmekapazität werden automatisch vom Messsystem übernommen.

Für die Brennwertbestimmung wird der bei der Kalibrierung ermittelte Wert der Wärmekapazität für das System angenommen und auf dem gleichen Weg der Brennwert bestimmt. Bei der Probenvorbereitung muss darauf geachtet werden, dass der maximal zulässige Energieeintrag bei der verwendeten Messeinrichtung 40.000 J beträgt, d.h. der Brennwert der Probe muss grob geschätzt und entsprechend die Masse der Probe angepasst werden, um unterhalb von 40.000 J zu bleiben.

Im Rahmen der Diplomarbeit werden von Raps-, Sonnenblumen-, Soja- und Erdnussöl die Brennwerte bestimmt. Vorgegangen wird nach der „Kurzanleitung zur automatischen Betriebsweise des Bombenkalorimeters IKA® C 200“ aus dem Technikum Thermische Behandlung, wie sie hier in kurzer Form wiedergegeben wird. Mit dem Kalorimeter kann auf verschiedene Arten der Brennwert bestimmt werden. Für die Versuche wird die isoperibole Betriebsart gewählt, d.h. der Betrieb des Kalorimeters mit konstanter Umgebungstemperatur bei eventuell unterschiedlicher Temperatur des Messsystems und somit einem endlichen Wärmewiderstand zwischen Messsystem und Umgebung. Diese Betriebsart liegt zwischen der isothermen (kleinster Wärmewiderstand zwischen Messsystem und Umgebung) und der adiabaten (praktisch unendlich großer Wärmewiderstand zwischen System und Umgebung) Betriebsart. Die Umgebungstemperatur ist die Temperatur im Temperiermantel.

Die Ergebnisse der Brennwertbestimmung werden in Tabelle 1.3-1 angegeben.

| | Rapsöl | Sojaöl | Sonnenblumenöl | Erdnussöl |
|-----------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| Brennwert | 39.520 kJ/kg | 39.365 kJ/kg | 39.520 kJ/kg | 39.580 kJ/kg |

Tabelle 1.3-1: Brennwerte der verwendeten Pflanzenöle

Die gemessenen Werte stimmen auch mit Ausnahme des Brennwertes von Sojaöl, der etwa 200 kJ/kg zu niedrig liegt, mit den Werten aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** überein.

Der Brennwert kann auf verschiedene Bezugszustände nach DIN 51700 umgerechnet werden. Der untere Heizwert H_u kann nach Formel 1.3-2 aus dem Brennwert H_o und der bei einer Elementaranalyse des Brennstoffs anfallenden Wassermenge berechnet werden.

Es gilt

$$H_u = H_o - 24,41 \cdot F, \quad \text{Formel 1.3-2}$$

wobei

| | | |
|-------|--------------------------------|--------------|
| H_u | unterer Heizwert | [kJ/kg] |
| H_o | oberer Heizwert bzw. Brennwert | [kJ/kg] |
| F | Feuchtegrad | [Gewichts-%] |

Die bei der Elementaranalyse anfallende Wassermenge F setzt sich zusammen aus der beim Verbrennen der wasserstoffhaltigen Verbindungen des Brennstoffs gebildeten Wassermenge und aus dem Wassergehalt der Analysenprobe. Nach den Spezifikationsdatenblättern des Öllieferanten beträgt der Wasseranteil der verwendeten Ölsorten maximal 0,05 %. Eine Elementaranalyse der Brennstoffe kann im Rahmen der Diplomarbeit nicht durchgeführt werden. Jedoch lassen sich die unteren Heizwerte der Pflanzenöle über Relationen der Brennwerte ermitteln, wenn man für ein Pflanzenöl einen Heizwert annimmt. Der Literatur-Heizwert für Soja-Öl beträgt beispielsweise im „VDI-Bericht 794 / Energie aus nachwachsenden Rohstoffen und organischen Reststoffen“ 36,1 MJ/kg bis 37,1 MJ/kg. Der Heizwert von Dieselmotorkraftstoff wird dort mit 42 MJ/kg angegeben.

Im Rahmen der Diplomarbeit wird für das verwendete Sojaöl ein unterer Heizwert von 36,5 MJ/kg angenommen und die unteren Heizwerte der anderen Pflanzenöle nach Formel 1.3-3 berechnet.

$$H_{u,Pflanzenöl} = H_{u,Sojaöl} \cdot \frac{H_{o,Pflanzenöl}}{H_{o,Sojaöl}}, \quad \text{Formel 1.3-3}$$

wobei

- $H_{u,Sojaöl}$ angenommener unterer Heizwert von Sojaöl
- $H_{u,Pflanzenöl}$ berechneter unterer Heizwert von anderem Öl
- $H_{o,Sojaöl}$ gemessener oberer Heizwert von Sojaöl
- $H_{o,Pflanzenöl}$ gemessener oberer Heizwert von anderem Öl

Mit dieser Gleichung können untere Heizwerte nach Tabelle 1.3-2 errechnet werden:

| | Rapsöl | Sojaöl | Sonnenblumenöl | Erdnussöl |
|------------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| unterer Heizwert | 36.650 kJ/kg | 36.500 kJ/kg | 36.650kJ/kg | 36.700 kJ/kg |

Tabelle 1.3-2: untere Heizwerte der Pflanzenöle

Die Formel 1.3-3 geht von einem gleichen Feuchtegrad bei den verschiedenen Pflanzenölen aus, also einem gleichen Wassergehalt der Öle und von einer gleichen Menge an wasserstoffhaltigen Verbindungen in den Molekülen. Diese Annahme führt zu keinem exakten Ergebnis, insbesondere da der untere Heizwert von Sojaöl angenommen wird. Jedoch wird sich bei verschiedenen Lastzuständen des Motors unter Verwendung der verschiedenen Kraftstoffe zeigen, dass die Annahme doch wahrscheinlich relativ genau ist, da bei gleichem Betriebspunkt unter Zuhilfenahme des gemessenen Kraftstoffmassenstroms auch ein fast gleicher effektiver Wirkungsgrad berechnet werden kann.

2 Quellenangaben

Hochschule Offenburg 2006: Diplomarbeit Christian Wehmann