

„Untersuchungen zur Stabilität von flüssigen Brennstoffen“

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Jayadi Lukito

aus Jakarta / Indonesien

Berichter: Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Heinrich Köhne
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Dezember 2011

Berichte aus der Verbrennungstechnik

Band 34

Jayadi Lukito

**Untersuchungen zur Stabilität
von flüssigen Brennstoffen**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0730-5

ISSN 1430-9629

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für
Stephani, Christabelle
und meine Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Projektingenieur an der Oel-Waerme-Institut GmbH im Rahmen der Berarbeitung des Forschungsvorhabens 702 der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK), sowie weiterer durch das Institut für Wärme und Oeltechnik e.V. (IWO) finanzierter Projekte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Köhne für die Förderung und Betreuung sowie die zahlreichen, nicht nur fachlichen Gespräche.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff danke ich sehr für die freundliche Übernahme der Korreferate und das Interesse an dieser Arbeit.

Allen Mitarbeitern der Oel-Waerme-Institut GmbH, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, sei ebenfalls herzlich gedankt.

Herrn Andre Steinmetz und Herrn Tim Katzwinkel danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei den Untersuchungen an der tribologischen Prüfapparatur. Frau Sandra Barth und Herrn Simon Eiden danke ich ebenfalls für die Unterstützung von der analytischen Seite.

Ferner möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Helma Dirks, Frau Eva Köhne M.A. und Frau Christine Meurer sowie Herrn Dipl.-Ing. Hajo Hoffmann für die Korrekturvorschläge für diese Arbeit bedanken.

Meinen Eltern und meinem Bruder sowie meiner Schwester, die mir diesen Weg erst eröffnet und mich immer unterstützt haben, gilt mein herzlicher Dank.

Einen ganz besonderer Dank möchte ich meiner Frau Stephani und meiner Tochter Christabelle aussprechen, die viele Stunden auf mich verzichten mussten und darüber hinaus viel Verständnis und Unterstützung aufgebracht haben.

Aachen, 22. Dezember 2011

Jayadi Lukito

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	vii
Inhaltsverzeichnis.....	ix
1 Einleitung.....	13
2 Stand des Wissens.....	15
2.1 Fatty Acid Methyl Ester (FAME) Herstellungsprozess.....	15
2.1.1 Umesterungsverfahren mit homogenen alkali-basierten Katalysatoren.....	15
2.1.2 Umesterungsverfahren mit homogenen säure-basierten Katalysatoren.....	16
2.1.3 Umesterungsverfahren mit heterogenen alkali- und säure-basierten Katalysatoren.....	16
2.1.4 Umesterungsverfahren mit Hilfe von Enzymen.....	17
2.1.5 Umesterungsverfahren mit super- und subkritischen Alkoholen.....	17
2.1.6 Umesterungsverfahren mit Hilfe von Mikrowellen.....	17
2.1.7 Umesterungsverfahren mit Hilfe des Ultraschalls.....	18
2.1.8 FAME Herstellung aus Algenöl.....	18
2.2 Problematik bei der Nutzung von FAME als Brenn- und Kraftstoff.....	18
2.2.1 Oxidationsmechanismus der mineralölstämmigen Brennstoffe.....	19
2.2.2 Oxidationsmechanismus von FAME.....	21
2.2.3 Hydrolyse.....	22
2.2.4 Bildung von Metallseifen.....	23
2.3 Verfahren zur Bestimmung der Stabilität.....	23
2.3.1 Sedimentbildende Verfahren zur Bestimmung der thermischen Stabilität (DIN 51371).....	24
2.3.2 Lagerstabilität (DIN 51471).....	25
2.3.3 Verfahren zur Bestimmung der Oxidationsstabilität.....	26
2.3.3.1 Oxidationsstabilität nach DIN EN 14112 / 15751.....	28
2.3.3.2 PetroOXY.....	29
2.3.4 Bestimmung des Wassergehalts.....	30
2.3.5 Bestimmung der Säurezahl.....	31
2.3.6 Bestimmung der Peroxidzahl.....	32
2.3.7 Bestimmung der Viskosität.....	33
2.3.8 Bestimmung der Iodzahl.....	34
2.4 Pumpenprüfstand.....	35
3 Auslegung und Aufbau der tribologischen Prüfapparatur zum Nachweis der Betriebssicherheit.....	37
3.1 Funktion der Prüfapparatur.....	37
3.2 Auswertung der Versuchsergebnisse.....	39

3.3	Axialer Probenkörper	40
3.4	Radialer Probenkörper	41
4	Untersuchung der brennstoffspezifischen Einflüsse mittels der tribologischen Prüfapparatur.....	43
4.1	Entwicklungsphase der tribologischen Prüfapparatur	43
4.1.1	Anpresskraft.....	43
4.1.2	Drehzahl	44
4.1.3	Betriebstemperatur	45
4.1.4	Probenkörperform	46
4.1.5	Probenkörpergröße.....	47
4.2	Erprobungsphase der tribologischen Prüfapparatur	49
5	Untersuchung der Oxidationsstabilität über die Chemilumineszenz	53
5.1	Ansatz Chemilumineszenz: hydroperoxidbildendes Verfahren.....	53
5.1.1	Alterung (Oxidation) und Chemilumineszenzstrahlung.....	53
5.1.2	Chemilumineszenz als Messverfahren	53
5.1.3	Anwendung der Chemilumineszenz	53
5.2	Angestrebte Forschungsergebnisse	55
5.3	Versuchsdurchführung und Versuchsmatrix	56
5.3.1	Prüfstands Aufbau.....	56
5.3.2	Versuchsdurchführung.....	58
5.4	Ermittlung der optimalen Parameter	58
5.4.1	Oxidationsmitteleinfluss	58
5.4.2	Probenkonditionierungseinfluss.....	59
5.4.3	Tiegelformeinfluss.....	60
5.4.4	Volumen- und Temperatureinfluss.....	62
5.4.5	Festgelegte Randbedingungen für die weitere Untersuchung.....	65
5.4.6	Versuchsauswertung	65
5.5	Einfluss der Kalibrierung der Messzelle 3	66
5.6	Untersuchung mit reinen Brennstoffen.....	67
5.7	Ursache des Signalverlaufs bei FAME-Beimischungen.....	68
5.8	Untersuchung der Heizöl EL schwefelarm–Rapsmethylester-Beimischungen und deren Vergleichbarkeit	69
5.9	Stabilitätskennwert als neues Auswertungskriterium des Verfahrens.....	72
5.10	Validierung des Verfahrens mit Proben aus dem Langzeitlagerungsprojekt	75
5.11	Untersuchung zur Vorhersage der Oxidationsstabilität über den Arrhenius Ansatz	82
6	Zusammenfassung	87

7	Summary.....	91
8	Literaturverzeichnis.....	95
9	Formelzeichen	105
10	Tabellenverzeichnis	107
11	Abbildungsverzeichnis	109
Anhang A:	Anstieg des mittleren Anlaufdrehmoments bei der Untersuchung mit der tribologischen Prüfapparatur im Vergleich zur thermischen Stabilität.....	113