

Inhalt

Verzeichnis der Abbildungen.....	IV
Verzeichnis der Tabellen.....	XI
Verzeichnis der Abkürzungen.....	XIII
1. Einleitung	1
2. Ziel- und Aufgabenstellung.....	3
2.1 Zielstellung.....	3
2.2 Aufgabenstellung	5
2.2.1 Rohstoffcharakteristik und Produktion.....	5
2.2.2 Verbesserung der Kältefestigkeit	5
2.2.3 Motortechnische Anwendung.....	6
2.2.4 Ökobilanz.....	8
3. Stand der Erkenntnisse.....	9
3.1 Rohstoffpotenziale	9
3.2 Kältefestigkeit des Biodiesels.....	12
3.3 Anwendung als Motorkraftstoff.....	15
3.3.1 Heizwert und Kraftstoffverbrauch.....	15
3.3.2 Cetanzahl.....	16
3.3.3 Emissionen	17
3.3.4 Schmierverhalten.....	21
3.4 Ökobilanz.....	23
4. Material und Methoden.....	25
4.1 Rohstoffcharakteristik	25
4.2 Verbesserung der Kältefestigkeit	26
4.2.1 Variation der Rohstoffe und Additiveinsatz	26
4.2.2 Fraktionierung durch Destillation.....	27
4.2.3 Fraktionierung durch Kristallisation	28
4.2.3.1 Apparatur	28
4.2.3.2 Versuchsdurchführung.....	30
4.3 Anwendung als Motorkraftstoff.....	34
4.3.1. Schmierölanalysen durch Flottenbegleituntersuchungen	34
4.3.1 Motordiagnose	37

4.3.3	Motorprüfstandsuntersuchungen	38
4.4	Ökobilanz.....	40
4.4.1	Schrittfolge der Bearbeitung einer Ökobilanz.....	40
4.4.2	Sachbilanz	42
4.4.2.1	Präzisierung der Schnittstelle am Lebensweganfang der FME-Linie	43
4.4.2.2	Stoffstromnetz FME	45
4.4.2.3	Behandlung der Kuppelprodukte K_2SO_4 und Glycerin.....	45
4.4.2.4	Definition der funktionellen Einheit.....	48
4.4.3	Umweltwirkungsabschätzung.....	48
5.	Ergebnisse und Interpretation	51
5.1	Rohstoffcharakteristik und Produktion.....	51
5.1.1	Fettqualitäten im Jahresgang.....	51
5.1.2	Produktion.....	55
5.1.3	Bewertung.....	59
5.2	Verbesserung der Kältefestigkeit	62
5.2.1	Variation der Rohstoffe	62
5.2.2	Additiveinsatz.....	68
5.2.2.1	Empirische Ermittlung des Kälteverhaltens.....	68
5.2.2.2	Rechnerische Ermittlung des Kälteverhaltens.....	72
5.2.3	Fraktionierung durch Destillation.....	73
5.2.4	Fraktionierung durch Kristallisation	77
5.2.5	FAME-Zudosierung zu DK gemäß DIN EN 590	86
5.2.6	Bewertung.....	89
5.3	Anwendung als Motorkraftstoff.....	91
5.3.1	Schmierölanalysen im Rahmen der Flottenbegleituntersuchungen.....	91
5.3.1.1	Fuhrpark Entsorgungswirtschaft	91
5.3.1.2	Fuhrpark Tierkörperbeseitigung	94
5.3.1.3	Qualitätsparameter der Schmieröle	98
5.3.1.4	Schmierfähigkeit	102
5.3.2	Motordiagnose	103
5.3.3	Motorprüfstandsuntersuchungen, Voruntersuchungen	104
5.3.3.1	Kraftstoffverbrauch und Verbrennungsprozess.....	104
5.3.3.2	Emissionen	108
5.3.4	Motorprüfstandsuntersuchungen, Hauptuntersuchungen...	110
5.3.4.1	Kraftstoffverbrauch und Verbrennungsprozess.....	110

5.3.4.2	Emissionen	119
5.3.5	Cetanzahl.....	130
5.3.6	Bewertung.....	132
5.4	Ökobilanz.....	134
5.4.1	Einfluss der einzelnen Wirkungsparameter auf das Indikatorergebnis der untersuchten Wirkungskategorien ..	134
5.4.2	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen	143
5.4.3	Bezug der Ergebnisse auf den Einsatz von 1l FME	148
5.4.4	Bewertung.....	149
6.	Schlussfolgerungen	151
7.	Zusammenfassung	155
8.	Literaturverzeichnis.....	159
Anhang	167

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 3.1-1:	Verwendung tierischer Fette im Jahr 2004 (nach [NIEMANN, 2005]).....	11
Abb. 3.3-1:	Verbrennungswärme von Fettsäuremethylestern (nach [KNOTHE, 2002])	15
Abb. 3.3-2:	Cetanzahlen von Fettsäuremethylestern (nach [MITTELBACH, 2004]).....	16
Abb. 3.3-3:	Vergleich der CO-Emissionen von FAME und FAME/DK-Mischungen gegenüber DK (nach [EPA, 2002])	18
Abb. 3.3-4:	Vergleich der NO _x -Emissionen von FAME und FAME/DK-Mischungen gegenüber DK (nach [EPA, 2002])	19
Abb. 3.3-5:	Vergleich der PM-Emissionen von FAME und FAME/DK-Mischungen gegenüber DK (nach [EPA, 2002])	20
Abb. 4.3-1:	Lastpunkte des ECE-R49 13-Stufen-Testes (Quelle: [NOCKE et al., 2003])	39
Abb. 4.4-1:	Schrittfolge bei der Erarbeitung einer Ökobilanz (Quelle: [TACK et al., 2003])	40
Abb. 4.4-2:	Fließbild für ein Produktionssystem (Quelle: [TACK et al., 2003])	41
Abb. 4.4-3:	Bestandteile der Wirkungsabschätzung (Quelle: [TACK et al., 2003]).....	42
Abb. 4.4-4:	Vergleich der Produktsysteme alt und neu für eine exakte Bestimmung der Schnittstelle am Lebensweganfang von FME (Quelle: [TACK et al., 2003]).....	44
Abb. 4.4-5:	Stoffstromnetz der Produktlinie FME (Quelle: [TACK et al., 2003])	46
Abb. 5.1-1:	Freie Fettsäuren in den untersuchten Fetten	52

Abb. 5.1-2:	Gehalt an Unverseifbarem (UV) in den untersuchten Fetten	53
Abb. 5.1-3:	Gehalt an Schmutz (PUV) in den untersuchten Fetten	53
Abb. 5.1-4:	Gehalt an Schwefel in den untersuchten Fetten	54
Abb. 5.1-5:	Gehalt an Wasser in den untersuchten Fetten.....	54
Abb. 5.1-6:	Verfahrensfießbild Biodieselanlage Malchin	55
Abb. 5.2-1:	Fettsäuremuster der Rohstoffe	63
Abb. 5.2-2:	Fettsäuren der Rohstoffe, Summenparameter.....	63
Abb. 5.2-3:	Anteil Fettsäure in Tierfettmethylester	64
Abb. 5.2-3.1	Anteil der gesättigten Fettsäuren in Methylestern.....	65
Abb. 5.2-4:	Zusammenhang zwischen Fettsäurezusammensetzung und CFPP-Wert in logarithmischer Darstellung	66
Abb. 5.2-4.1:	Zusammenhang zwischen Fettsäurezusammensetzung und CFPP-Wert in linearer Darstellung	66
Abb. 5.2-5:	Fettsäurezusammensetzung in FME/RME- und AME/RME-Mischungen	67
Abb. 5.2-6:	Zusammenhang zwischen FAME-Anteil in RME bzw. DK und CFPP-Wert	68
Abb. 5.2-7:	Zusammenhang zwischen Anteil FAME in Winter-RME und CFPP-Wert bei Einsatz verschiedener Additive	69
Abb. 5.2-8:	Zusammenhang zwischen Anteil FAME in Übergangs-DK und CFPP-Wert bei Einsatz verschiedener Additive.....	70
Abb. 5.2-9:	Zusammenhang zwischen Anteil FAME in Winter-DK und CFPP-Wert bei Einsatz verschiedener Additive	71
Abb. 5.2-10:	Destillation Tierfettmethylester 2002.....	73
Abb. 5.2-11:	Destillation Geflügelfettmethylester (GFME) 2002.....	74
Abb. 5.2-12:	Destillation Altspeiseölmethylester (AME) 2002	75

Abb. 5.2-13:	Anteil der Fettsäuren in Sumpf- und Einsatzprodukt im Verhältnis zu dem CFPP-Wert.....	76
Abb. 5.2-14:	Anteil der Stearinmethylester in FME/RME-Mischungen und Einsatz- und Sumpfprodukt der Destillation im Verhältnis zu dem CFPP-Wert.....	76
Abb. 5.2-15:	Fettsäureverteilung nach Kristallisation und Pressfiltration in Testreihe 1, Schritt 5.....	77
Abb. 5.2-16:	Fettsäureverteilung in Inputmaterial und Oleinphasen bei Pressung in verschiedenen Druckstufen.....	78
Abb. 5.2-17:	Einfluss der Filtrationstemperatur auf Fettsäurezusammensetzung der fraktionierten Phasen.	79
Abb. 5.2-18:	Anteile der Fettsäuremethylester in der Olein- und Stearinphase in% des Gehaltes in dem Ausgangsprodukt FME	80
Abb. 5.2-19:	Zusammenhang zwischen Filtrationstemperatur und CFPP-Wert der Oleinphase	80
Abb. 5.2-21:	Zusammenhang zwischen CFPP-Wert und Anteil der Oleinphase an FME	82
Abb. 5.2-22:	2-stufige Fraktionierung von FME.....	84
Abb. 5.2-23:	Zusammenhang zwischen Anteil Olein in Winter-DK sowie additiviertem RME und CFPP-Wert	85
Abb. 5.2-24:	Zusammenhang zwischen Anteil FAME in Sommer-DK und CFPP-Wert	87
Abb. 5.2-25:	Zusammenhang zwischen Anteil FAME in Winter-DK und CFPP-Wert bei Einsatz des Additives Infineum R 488	87
Abb. 5.2-26:	Zusammenhang zwischen Anteil FAME in Winter-DK und CFPP-Wert bei Einsatz des Additives Chimec 6536	88
Abb. 5.2-27:	Zusammenhang zwischen Dosiertrate des Additives in 5%FME in DK und CFPP-Wert.....	88

Abb. 5.3-1:	Viskositätsverlauf 1.Ölwechselintervall Fuhrpark 1 Entsorgungswirtschaft	92
Abb. 5.3-2:	Kraftstoffeintrag 1.Ölwechselintervall Fuhrpark 1 Entsorgungswirtschaft	92
Abb. 5.3-3:	Viskositätsverlauf 1. Ölwechselintervall Fuhrpark 2 Entsorgungswirtschaft	93
Abb. 5.3-4:	Kraftstoffeintrag 1.Ölwechselintervall Fuhrpark 2 Entsorgungswirtschaft	93
Abb. 5.3-5:	Viskositätsverlauf Ölwechselintervall Fuhrpark Langstrecke TBA.....	94
Abb. 5.3-6:	Kraftstoffeintrag Ölwechselintervall Fuhrpark Langstrecke TBA.....	95
Abb. 5.3-7:	Viskositätsverlauf Ölwechselintervall Fuhrpark Kurzstrecke TBA.....	96
Abb. 5.3-8:	Kraftstoffeintrag Ölwechselintervall Fuhrpark Kurzstrecke TBA.....	96
Abb. 5.3-9:	Viskositätsverlauf über alle Ölwechselintervalle Gesamtfuhrpark TBA.....	97
Abb. 5.3-10:	Kraftstoffeintrag über alle Ölwechselintervalle Gesamtfuhrpark TBA.....	97
Abb. 5.3-11:	Eisengehalt über alle Ölwechselintervalle Gesamtfuhrpark TBA und Entsorgungswirtschaft	99
Abb. 5.3-12:	Oxidation des Schmieröls über alle Ölwechselintervalle Gesamtfuhrpark TBA und Entsorgungswirtschaft	100
Abb. 5.3-13:	Nitration des Schmieröls über alle Ölwechselintervalle Gesamtfuhrpark TBA und Entsorgungswirtschaft	101
Abb. 5.3-14:	Sulfation des Schmieröls über alle Ölwechselintervalle Gesamtfuhrpark TBA und Entsorgungswirtschaft	101
Abb. 5.3-15:	Zusammenhang zwischen Gehalt an FME und Schmierfähigkeit in FME-/DK-Mischungen	102

Abb. 5.3-16:	Darstellung des Brennstoffvolumen- und – massenstroms über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK,1999]).....	104
Abb. 5.3-17:	Darstellung der Brennstofftemperatur im Drucksystem über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK,1999]) .	104
Abb. 5.3-18:	Darstellung der Abgastemperaturen über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK,1999])	105
Abb. 5.3-19:	Darstellung des Zylinderdruck- u. Einspritzdruckverlaufs über Grad Kurbelwinkel bei DK-Einsatz (Quelle [MOECK,1999]).....	106
Abb. 5.3-20:	Darstellung des Zylinderdruck- u. Einspritzdruckverlaufs über Grad Kurbelwinkel bei FME-Einsatz (Quelle [MOECK,1999])	106
Abb. 5.3-21:	Darstellung des Zylinderdruckverlaufs über Grad Kurbelwinkel im Vergleich DK- und FME-Einsatz ($M_d =$ $1,5 \text{ kNm}$) (Quelle [MOECK,1999]).....	107
Abb. 5.3-22:	Darstellung des Einspritzdruckverlaufs über Grad Kurbelwinkel im Vergleich DK- und FME-Einsatz ($M_d =$ $1,5 \text{ kNm}$) (Quelle [MOECK,1999])	107
Abb. 5.3-23:	Darstellung der O_2 -Emission über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK,1999])	108
Abb. 5.3-24:	Darstellung der CO_2 -Emission über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK,1999])	108
Abb. 5.3-25:	Darstellung der CO -Emission über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK, 1999])	109
Abb. 5.3-26:	Darstellung der NO -Emission über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK, 1999])	109
Abb. 5.3-27:	Darstellung der NO_2 -Emission über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK, 1999])	109
Abb. 5.3-28:	Darstellung der NO_x -Emission über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK, 1999])	110
Abb. 5.3-29:	Darstellung der Rußzahl nach Bacharach über dem Motordrehmoment (Quelle [MOECK, 1999])	110

Abb. 5.3-30: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (volumetrisch) (Quelle [NOCKE et al., 2003]).....	113
Abb. 5.3-31: Zündverzögerungen bei Vollast in Sekunden (Quelle [NOCKE et al., 2003])	115
Abb. 5.3-32: Zündverzögerungen in °KW dargestellt (Quelle [NOCKE et al., 2003])	116
Abb. 5.3-33: Maximaldrücke (Quelle [NOCKE et al., 2003]).....	117
Abb. 5.3-34: Lage der Maximaldrücke (Quelle [NOCKE et al., 2003]).....	118
Abb. 5.3-35: Lambda (Quelle [NOCKE et al., 2003])	124
Abb. 5.3-36: Stickoxide (Quelle [NOCKE et al., 2003]).....	125
Abb. 5.3-37: Partikelbelastung (Partikel laut EPA-Definition (Quelle [NOCKE et al., 2003])	126
Abb. 5.3-38: Kohlenwasserstoffe (Quelle [NOCKE et al., 2003]).....	127
Abb. 5.3-39: Kohlenmonoxid (Quelle [NOCKE et al., 2003]).....	128
Abb. 5.3-40: Schwärzungszahl (Quelle [NOCKE et al., 2003])	129
Abb. 5.3-41: Wirkung von FME sowie Olein- und Stearinfraktion auf die Cetanzahl in Mischungen mit DK.....	131
Abb. 5.4-1: Wirkungskategorie – Ressourcenverbrauch erschöpflicher Energieträger (Quelle [TACK et al., 2003]).....	135
Abb. 5.4-2: Wirkungskategorie – Verbrauch mineralischer Ressourcen (Quelle [TACK et al., 2003])	136
Abb. 5.4-3 : Wirkungskategorie – Treibhausgase (Quelle [TACK et al., 2003])	137
Abb. 5.4-4 : Wirkungskategorie – Versauerungspotential (Quelle [TACK et al., 2003]).....	138
Abb. 5.4-5 : Wirkungskategorie – Eutrophierungspotenzial (Quelle [TACK et al., 2003]).....	139
Abb. 5.4-6 : Wirkungskategorie – Photooxidantienbildung (Quelle [TACK et al., 2003]).....	140

Abb. 5.4-7:	Wirkungskategorie – Krebsrisiko (Quelle [TACK et al., 2003]).....	141
Abb. 5.4-8:	Wirkungskategorie – PM 10 (Quelle [TACK et al., 2003]).....	142
Abb. 5.4-9:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen für die DK-Produktlinie (Quelle [TACK et al., 2003]).....	143
Abb. 5.4-10:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen für die RME-Produktlinie (Quelle [TACK et al., 2003]).....	143
Abb. 5.4-11:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen für die Produktlinie FME mit TBA (Quelle [TACK et al., 2003]).....	144
Abb. 5.4-12:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen für die Produktlinie FME ohne TBA (Quelle [TACK et al., 2003]).....	144
Abb. 5.4-13:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen der Produktlinie FME ohne TBA im Vergleich zur DK-Produktlinie (Quelle [TACK et al., 2003]).....	145
Abb. 5.4-14:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen der Produktlinie FME ohne TBA im Vergleich zur RME-Produktlinie (Quelle [TACK et al., 2003]).....	145
Abb. 5.4-15:	Gesamtergebnis der Umweltwirkungen der Produktlinie FME ohne TBA im Vergleich zur Produktlinie FME mit TBA (Quelle [TACK et al., 2003]).....	146

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 3.1-1:	Anbau- und Erntemengen Raps 2003 (nach UFOP [2005]).....	9
Tab. 3.1-2:	Tierische Nebenprodukte und daraus gewonnene Fette im Jahr 2004 (nach [NIEMANN, 2005].....	11
Tab. 3.2-1:	Schmelzpunkte der Methylester einzelner Fettsäuren (nach [MITTELBACH, 2004]).....	13
Tab. 3.2-2:	CFPP-Werte von Mischungen aus FME mit DK (nach [KINAST, 1999])	13
Tab. 4.1-1:	Untersuchte Fette	25
Tab. 4.1-2:	Untersuchungsmethoden.....	26
Tab. 4.2-1:	Eingesetzte Additive	26
Tab. 4.2-2:	Vorversuche Kristallisation	28
Tab. 4.2-3:	Erhöhung des Pressdruckes je Zeiteinheit	31
Tab. 4.2-4:	Kühlkurve Testreihe 1.....	32
Tab. 4.2-5:	Kühlkurve Testreihe 2.....	33
Tab. 4.2-6:	Kühlkurve Testreihe 3, zweistufige Kristallisation	34
Tab. 4.3-1:	Fahrzeuge eines Fuhrparks der Entsorgungswirtschaft...	36
Tab. 4.3-2:	Fahrzeuge eines Fuhrparkes zur Erfassung von Schlachtabfällen, Tierkörpern und Speiseresten	36
Tab. 4.3-3:	Ölintervalle Fuhrpark Entsorgungswirtschaft	37
Tab. 4.3-4:	Ölintervalle Fuhrpark TBA-Betrieb	37
Tab. 4.4-1:	Übersicht der Literaturquellen zur RME-Bilanzierung (Quelle: [TACK et al., 2003])	43
Tab. 4.4-2:	Allokation der Vorketten für die vier untersuchten Systeme in% (Quelle: [TACK et al., 2003])	47
Tab. 4.4-3:	Betrachtete Wirkungskategorien (Quelle: [TACK et al., 2003])	49
Tab. 5.2-0:	Produktdatenblatt FME	60
Tab. 5.2-1:	Mittelwerte der Fettsäuregehalte der Rohstoffe	64

Tab. 5.3-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Motordiagnose(nach[BÖHN, 2004])	103
Tab. 5.3-2:	Emissionskennwerte nach ECE-R 49 im 13-Stufen-Test (Quelle [NOCKE et al., 2003])	120
Tab. 5.3-3:	Vergleich der Emissionsmesswerte mit Literaturwerten (nach [NOCKE et al., 2003]).....	122
Tab. 5.3-4:	Kalkulatorische Ermittlung der Cetanzahl (in Anlehnung an [MITTELBACH,2004])).....	130
Tab. 5.4-1:	Ergebnisse der ökologischen Bewertung von RME im Vergleich mit DK [UBA, 1999] (Quelle [TACK et al., 2003]).....	147
Tab. 5.4-2:	Vergleich der Bewertung von RME gegenüber DK nach [UBA, 1999 und den eigenen Untersuchungen (Quelle [TACK et al., 2003])	148
Tab. 5.4-3:	Beitrag der Herstellung und Nutzung von 1l FME zur Umweltentlastung (nach [TACK et al., 2003]).....	149